



*Al servicio  
de las personas  
y las naciones*

**Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo**

## **INFORME DE PROYECTO ANUAL 2015**



**Proyecto: “Producción de etanol a partir de sustratos alternativos”**

---

**Fecha: 12 de febrero de 2016**



Al servicio  
de las personas  
y las naciones

**Cuba**

## INFORME DE PROYECTO (ITP)

### 1. Información básica del proyecto

Número y título del proyecto: **Producción de etanol a partir de sustratos alternativos**

Asociado en la implementación / Entidad Nacional de Ejecución:

**Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)**

Otras partes responsables: (si las hubiera)

Escuela Estadual de Lorena, Brasil

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Fecha de inicio:

Prevista originalmente: **enero 2014**

Real: **agosto 2014**

Fecha de término:

Prevista originalmente: **diciembre 2015**

Estimada: **diciembre 2016**

Período del informe: **enero–diciembre 2015**

### 2. Progreso en la implementación del proyecto

**Estado de los Riesgos en la actividad:**

Definición del riesgo	Acción	Responsable
<p><u>En relación con la gestión comercial pueden presentarse:</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>Afectaciones en la compra de equipos dado el nivel de especialización que requieren.</li><li>Aumento de los precios de los equipos en el mercado.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Búsqueda de alternativas de proveedores en el exterior y en algunos casos sustitución por artículos nacionales.</li><li>Planificar para inicios del proyecto los insumos de mayor complejidad e iniciar la licitación desde el inicio. Establecer un orden de prioridad de adquisición de equipamiento.</li></ul>	ICIDCA

Disponibilidad de transporte para viajes al interior del país donde se encuentren las plantas de alcohol para la realización de las tareas.	Seguimiento de los aportes locales constituidos por el ICIDCA, Grupo Empresarial AZCUBA y empresas involucradas para los apoyos en transportación, hospedaje y atención a los especialistas implicados en las tareas.	ICIDCA
Cambios de personal técnico que puedan duplicar esfuerzos de capacitación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de seguimiento con las instituciones y empresas comprometidas en cuanto a la asignación de recursos humanos a capacitarse.</li> <li>• Propiciar encuentros a través de sesiones de trabajo, intercambios y talleres entre los técnicos capacitados de las empresas involucradas.</li> </ul>	ICIDCA
Afectación en la extensión de los resultados del proyecto y la aplicación de las soluciones tecnológicas propuestas.	Interactuar en el marco del proyecto con las autoridades del G. E. AZCUBA para la elaboración e inclusión en los planes de inversión e investigación y extensión de los resultados del proyecto.	ICIDCA
Afectación en la ejecución de tareas planificadas con los recursos del PNUD por atrasos en liberación de fondos.	Reprogramar tareas en base a otros recursos disponibles entre las entidades participantes.	ICIDCA,
Incidencia de ciclones y otros fenómenos meteorológicos que afecten los cultivos de sorgo.	Prever obtener material para experimentación antes de la temporada ciclónica. Tomar medidas en los campos de cultivo que consideren los riesgos y mitiguen los daños.	ICIDCA

**Problemas de implementación:**

**Obstáculo identificado**

**Acción**

Atraso en la liberación de fondos del proyecto

- Uso de recursos propios de las entidades participantes, para la no detención del proyecto durante el primer semestre del

proyecto.

- Modificación de estrategias para la ejecución de algunas acciones necesarias a cumplimentarse en el 2016.

### 3. Desempeño del Proyecto – Grado de avance hacia el logro de los resultados

#### Resultados esperados en el marco de resultados estratégicos PNUD (2014-2017):

- Fortalecimiento de las capacidades nacionales y regionales brindando servicios sostenibles hacia la generación de energías alternativas. Desarrollo de medidas para la mitigación y adaptación al cambio climático.

#### Línea de servicio del MYFF que se aplica:

#### Indicadores de resultados:

1. Puesta en marcha de nuevas iniciativas que persiguen mejorar la eficiencia energética a través del uso de energías renovables y la adaptación y mitigación del fenómeno del cambio climático.
2. Especialistas capacitados de los países involucrados (personal científico- técnico): 20
3. Publicación científica: Carrillo, D.; Zumalacárregi, L.; Sánchez, O.; Michelena, G.; Yznaga, H.; Martínez, J.L. y Noé, C. Pretreatments employed in lignocellulosic materials for bioethanol production: an overview Revista ICIDCA Sobre los derivados de la caña de azúcar (2014). Vol. 48 (1): 71-79.
4. Danay Carrillo Nieves; José Luis Martínez Hernández; Héctor A. Ruiz; Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas; Georgina Michelena Alvarez; Cristóbal N. Aguilar; Anna Ilyina, Enzymatic hydrolysis of chemically pretreated mango stem bark residues at high solid loading Crops and Products (2015)

#### Meta anual (año):

1. Trabajos asociados con el desarrollo de nuevas tecnologías para la producción de bioetanol a partir de sustratos alternativos. Al menos 3 sustratos alternativos.

#### Cumplimiento de meta:

Esto fue cumplimentado al 100%

#### Grado de avance en la contribución al resultado corporativo:

- X Cambio Positivo  
 Cambio Negativo  
 Sin cambios

**Resultado (Producto) Previsto en el Proyecto**

**Resultado 01.**

Act. 01. Desarrollo de tecnologías para la producción de bioetanol a partir de fuentes renovables.

Esta actividad abarcó la puesta en marcha de nuevas iniciativas para mejorar la eficiencia energética, el uso de las energías renovables y la adaptación al cambio climático. La exploración fue dirigida hacia sustratos lignocelulósicos como residuos de producciones de fármacos a partir de plantas, corteza de tuna del nopal y bagazo de caña de azúcar.

**POTENCIALIDAD PRODUCTIVA DEL SORGO DULCE PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL.**

En la actualidad es de gran interés la producción a gran escala de etanol de origen biológico (bioetanol) a partir de cultivos agrícolas por la naturaleza renovable de las materias primas. Se obtiene generalmente a través de materias primas de primera generación, es decir, azúcares (caña de azúcar, remolacha azucarada y sorgo dulce) o de cereales ricos en almidón (trigo, maíz, cebada, yuca) y sustancias celulósicas (desechos agrícolas y forestales). En la Fig 1 se muestra el proceso de producción de etanol a partir de las diferentes materias primas. Las principales fuentes de producción de etanol son: maíz, yuca, remolacha caña de azúcar y sorgo dulce.

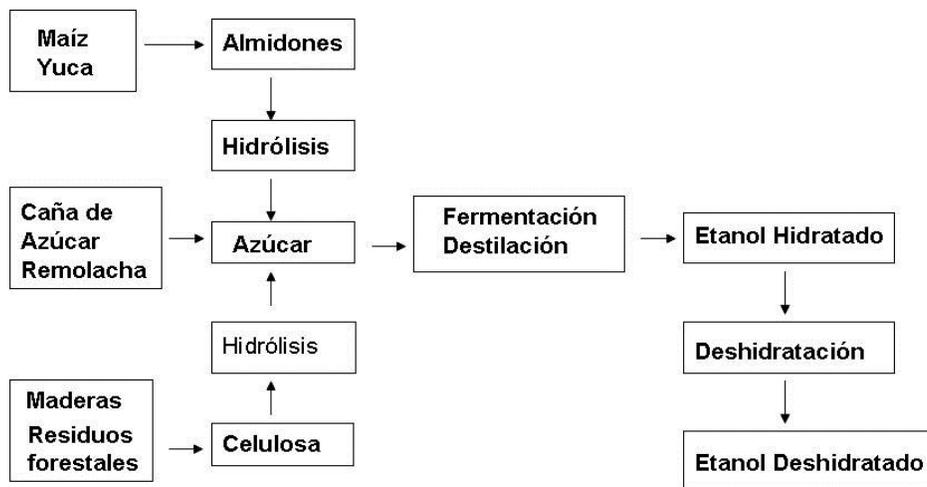


Fig1 Producción de bioetanol a partir de diferentes materias primas

**Producción de etanol de maíz**

Es la materia prima de mayor uso en Estados Unidos, se destina un 3.7% del total de

tierra cultivable y unos 45 millones de toneladas del cereal para producir etanol. En el 2007 un 25% de la producción nacional de maíz fue destinada a estos fines. Se obtiene 400 litros de etanol / ton de maíz y la relación Energía entregada / Energía utilizada es de 1.22.

#### **Producción de Alcohol a partir de yuca**

La yuca, es un cultivo prácticamente exclusivo de los países en vías de desarrollo. Nigeria es el precursor de la producción Mundial de Alcohol de yuca pero su producción no alcanza niveles industriales competitivos, produce unos 39 Millones de toneladas y su meta es utilizar la mayor parte de esta como materia prima para etanol. Se obtiene 530 litros / ton de yuca y la relación Energía entregada / Energía utilizada es de 1.17

#### **Producción Mundial de Alcohol a partir de remolacha**

Francia es uno de los países que ha desarrollado tecnología para obtener etanol de remolacha. Tiene un sistema para producir en la misma planta, etanol de remolacha durante el otoño y de trigo el resto del año. Se obtienen 200 litros / ton de remolacha y la relación Energía entregada / Energía utilizada es de 2.92. Tiene dos plantas de producción de etanol de 260 y 300 Millones de litros

#### **Producción de Alcohol a partir de caña de azúcar**

Este cultivo ha demostrado a escala mundial que es autosuficiente energéticamente con excedentes en electricidad. Brasil es el principal productor Mundial de etanol de caña de azúcar. Produce unas 315 Millones de toneladas de caña y cerca de 2/3 de esta es utilizada para la producción de etanol destinando solo 1% de su área cultivable. Las fabricas de etanol en Brasil mantiene un balance energético positivo (entre 8.3 a 10.2 veces) al quemar la parte que no produce azúcar de la caña. Cuenta con cerca de 300 destilerías y más de 225 ingenios produciendo aproximadamente 15000 Millones de litros de etanol por año. Se obtiene 85 litros de etanol / ton de caña de azúcar y la relación Energía entregada / Energía utilizada es de 2.92.

#### **Producción de Alcohol a partir de sorgo dulce**

El sorgo dulce en la actualidad esta ganando la atención mundial como un cultivo bio-energético promisorio y como materia prima alternativa para la producción de etanol por su gran producción de masa verde, mínimos requerimientos generales, tolerancia a enfermedades, sequías e inundaciones. En la India esta en funcionamiento desde junio del 2007 la primera planta comercial de 40000 litros diarios,. Se estima que con 100 destilerías de esta capacidad la India podría satisfacer sus necesidades de alcohol. Se obtiene 140 litros / ton de sorgo dulce y la relación Energía entregada / Energía utilizada es de 2.14

Es sabido que cada vez son mas los granos de maíz y sorgo destinados a la producción

de etanol, los mismos que años atrás se destinaban para la alimentación humana y animal. El auge de los biocombustibles, su crecimiento acelerado y muchas veces desmedido hace que el Mundo se replantee caminos a seguir para su producción. En este sentido la atención se dirige hacia dos cultivos: el sorgo dulce y la caña de azúcar como materias primas ideales para la producción de etanol,

### **Sorghum bicolor (L) Moench**

Los sorgos (*Sorghum* spp) son un género botánico de unas 20 especies de gramíneas oriundas de las regiones tropicales y subtropicales de África oriental. La principal especie de uso alimentario del sorgo es el *Sorghum bicolor* (L) Moench descubierta por Moench en 1794. Las muchas subespecies cultivadas se agrupan en: sorgo grano, sorgo dulce, sorgo forrajero y sorgo escoba. Se cultivan en África, Europa, América y Asia como cereal para consumo humano,

Los sorgos graníferos tienen granos relativamente grandes y el tallo no es dulce. Es el quinto cereal en importancia en el Mundo tras el arroz, maíz, trigo y cebada. Se cultiva en más de 42 millones de hectáreas en 99 países. El grano del sorgo es comparado con el del maíz al tener sus mismas cualidades nutritivas pero en cuanto a su exigencia como cultivo difieren. Las exigencias en temperatura del sorgo grano son más elevadas que las del maíz. Para germinar necesita temperatura de 13 °C y para su crecimiento óptimo de 32 °C. El descenso de temperatura en la floración puede reducir el rendimiento del grano. El sorgo grano resiste mucho mejor que el maíz las altas temperaturas y la sequía. Es capaz de resistir periodos largos de sequías, y recuperar su crecimiento cuando esta cesa. A igual superficie cultivada, el sorgo consume dos veces menos agua que el maíz, en consecuencia necesita poca o ninguna irrigación.

Estados Unidos es el principal productor seguido de la India, Nigeria y México. Otros países latinoamericanos que producen el sorgo son: Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Uruguay y Venezuela.

El uso alternativo del sorgo en grano incluye la utilización comercial del grano en la industria de alimentos (golosinas, producción de pan, y para la industria cervecera), producción de forrajes, ensilajes y la producción de etanol.

El sorgo grano al igual que el maíz constituye insumos relevantes de diversas cadenas productivas con base en la producción animal representando este destino más del 95% - 97% del consumo. El sorgo se utiliza en mayor porcentaje como grano molido y el volumen demandado por la industria de alimentos de origen animal es en orden de importancia: avicultura, lechería, producción de carne de cerdo y producción vacuna). Su empleo se ha incrementado drásticamente en los últimos tiempos debido a los

precios competitivos del maíz ; el resto del consumo (3% - 5%) se destina para la producción de alcohol

En Estados Unidos por más de 20 años el grano de sorgo ha sido utilizado para la industria del etanol ya que rinde igual cantidad de etanol que el maíz al contener la misma cantidad de almidón. Alrededor del 15% del cultivo del sorgo grano es utilizado cada año para estos fines. Existen unas 8 plantas que utilizan esta materia prima. Como subproducto se obtiene granos destilados con valor nutricional igual al obtenido del maíz utilizado para la alimentación animal

Si bien se tiene la tecnología y muy buenas variedades e híbridos de sorgo grano esta se está encareciendo y cada vez mas se destina el sorgo grano a la producción de etanol Una alternativa prometedora es producir etanol a partir de sorgo dulce.

El sorgo dulce es un cultivo similar al sorgo grano pero con un tallo rico en azúcares fermentables por lo que es comparable con la caña de azúcar (Fig 2). La caña de azúcar es sin duda una muy buena productora de etanol, no obstante, En la actualidad se ha encontrado en el sorgo dulce un sustituto promisorio de la caña de azúcar, la cual para producir etanol es aún contaminante y emisora de gases con efecto invernadero. Según el programa de Bio Power en Estados Unidos el sorgo dulce llamado también “cultivo inteligente” porque produce alimento además de combustible no es contaminante por ser neutro en dióxido de carbono. También se le denomina “el camello de los cultivos” por su gran producción de masa verde con mínimos requerimientos generales, tolerancia a enfermedades, sequía e inundaciones.

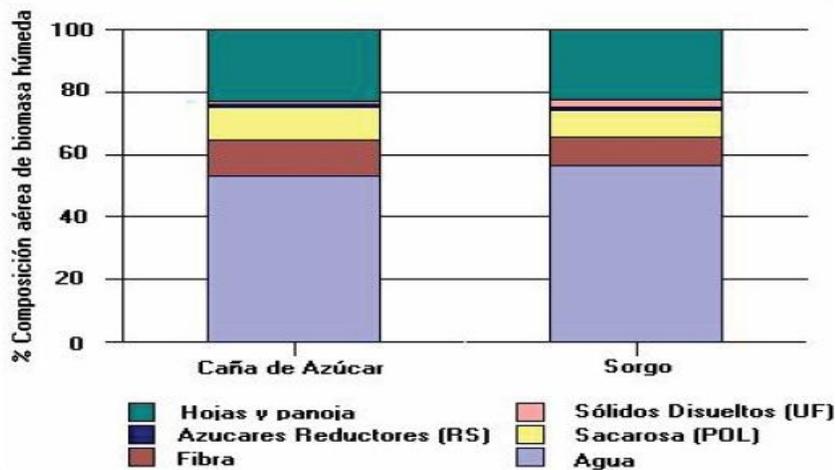


Fig 2 Composición de la biomasa aérea de la Caña de azúcar y el Sorgo dulce

Sorgo dulce vs caña de azúcar

Entre los aspectos comparativos más significativos entre ambos cultivos se encuentran las siguientes

- El sorgo dulce es tolerante a la sequía se desarrolla bajo condiciones de clima cálido, con lluvias moderadas bien distribuidas necesita entre 450 – 500 mm, siendo su óptimo entre 600-750 mm por año. Es de 2 a 4 veces menor el requerimiento hídrico comparado con la caña de azúcar para producir la misma cantidad de toneladas de masa verde
- El sorgo dulce puede sembrarse en tierras no aptas para otros cultivos adaptándose a todo tipo de suelo desde arenosos hasta arcillosos desarrollándose bien en terrenos alcalinos-salinos en presencia en el suelo de carbonato de calcio que incrementa el contenido de sacarosa en el tallo, además tolera inundaciones aunque se necesita un buen drenaje interno y externo. La caña de azúcar necesita de suelos adecuados para óptimo desarrollo.
- La caña de azúcar se propaga a partir de trozos del tallo, del sorgo se siembra las semillas y basta con 8 a 10 kg / ha en comparación con las 4500 a 6000 trozos de caña de azúcar
- El periodo vegetativo del sorgo dulce es de 3 meses y medios a 4 pudiéndose modificar o ajustar en función del grado de acumulación de azúcares a diferencia del ciclo de maduración de la caña de azúcar que varía entre 11 a 17 meses dependiendo de la variedad de caña y de la zona (tropical y subtropical). En consecuencia con una misma superficie de tierra puede el sorgo dulce ser cosechado varias veces en el año.
- El sorgo dulce y la caña de azúcar tiene muy evolucionado su mecanismo fisiológicos, favorecidos por ser plantas del ciclo de carbono C4 (o vía del ácido dicarboxílico), sin embargo, el sorgo dulce presenta una eficiencia fotosintética y de producción de biomasa mucho mayor al obtenerse en poco menos de 6 meses (2 ciclos) la misma cantidad de volumen de masa verde de la caña de azúcar por ciclo.
- El sorgo dulce tiene un sistema radicular extenso y ramificado la longitud de las raíces exploran y rompen los primeros perfiles del suelo. En terrenos permeables puede llegar hasta 2 metros de profundidad facilitando el drenaje y la implantación de cultivos posteriores preservando la degradación de los suelos. Para la caña de azúcar por el contrario las opciones de intercalamiento o rotación de cultivos no son generalmente consideradas propiciando como principal problema la degradación de los suelos por compactación, erosión, pérdida de humedad, drenaje deficiente, disminución de la materia orgánica, acidez y salinización.
- Los requerimientos de fertilizantes para el sorgo dulce en N:P:K (kg/ha) son de 100:50:50 casi dos veces y media menor que el de la caña de azúcar 250:115:115
- Para ambos cultivos la concentración de azúcares fermentables en tallo (% p/p) es de 11– 13%. Estos azúcares son principalmente sacarosa en mayor medida y glucosa

y fructosa en pequeñas cantidades.

- El sorgo dulce puede ser cosechado manual o mecánicamente utilizando las mismas cosechadoras que se usan para la caña de azúcar. De igual manera su procesamiento en el ingenio su descarga, extracción, concentración y evaporación de los jugos se realiza con las mismas maquinarias de la industria azucarera.
- El etanol obtenido del sorgo dulce es de superior calidad con menos contenido de sulfuro y alto octanaje a diferencias de la caña de azúcar
- El bagazo obtenido del sorgo dulce al igual que el de la caña de azúcar es de alto valor biológico, rico en micronutrientes que puede ser utilizado para alimentación animal y para la cogeneración de energía.
- Dado que el grano de sorgo dulce no es usado en la producción de etanol y no esta en alta demanda en el mercado de alimentos, tiene poco impacto en el precio de los alimentos y la seguridad alimentaria: Su uso esta dirigido a la alimentación animal En la Tabla I se presenta los parámetros productivos de mayor interés del sorgo dulce y la caña de azúcar

Tabla I Parámetros productivos del Sorgo dulce y la Caña de azúcar

Parámetros	Sorgo dulce	Caña de azucar
Ciclo de cosecha	3- 4 meses / 2 veces por año	11 a 17 meses
Requerimiento de agua	25 % a 45%	100%
Requerimiento de fertilizantes	35% a 40%	100%
Producción (ton/ha/ciclo)	88 a 108 (2 ciclos)	64 a 120
Concentración de azúcar fermentable (% p/p)	9 a 11	11 a 13
Productividad de azúcar (ton/ha/ciclo)	8 a 12 (2 ciclos)	7 a 10
Productividad alcohol carburante (99.5% Litros/ha/ciclo)	4000 a 7500 (2 ciclos)	4000 a 7000
Bagazo /ha/ciclo	Bagazo ( con 50% humedad) 25% en sorgo 20 a 28 (2 ciclo)	Bagazo ( con 50% humedad) 30% en caña 19 a 24

Alcohol Production from Sweet Sorghum. PRAJ Industries. Oct, 2003

### Marco internacional y regional del bioetanol

Las perspectivas de agotamiento de los biocombustibles sólidos sumado a la demanda creciente de energía, sitúan a los biocombustibles líquidos como una alternativa energética renovable, en el marco de la creciente valoración de combustibles que tengan bajo impacto en la emisión de carbono. El bioetanol constituye el 90% del biocombustible producido a escala mundial

Los principales destinos del bioetanol son la producción de combustibles (64%) y en menor medida, la industria (27%) y bebidas (9%). En la Tabla II se presenta la proyección

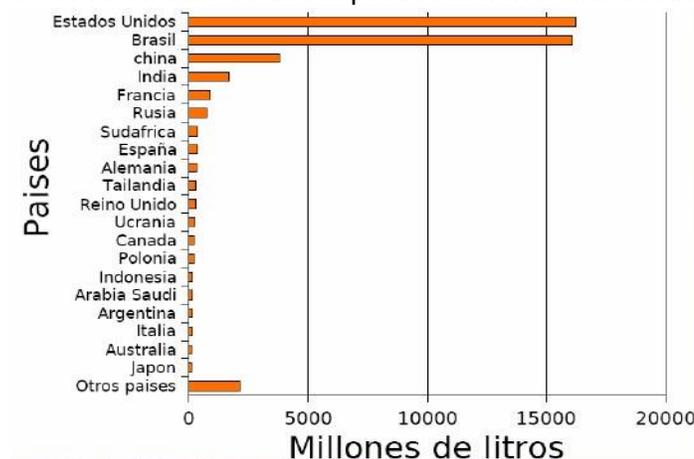
de la producción Mundial de Alcohol 2001 – 2010 (Protecciones F. O. Linch, 2006 ) en la que se evidencia una tendencia de crecimiento del biocombustible, con un incremento interanual de alrededor del 5%.

Tabla II Proyección de la producción Mundial de Alcohol 2001-2010

Unidad de medida: Millones de litros

Año	Total	Destino		
		Combustible	Industria	Bebidas
2001	31.8	19.0	9.8	3.0
2002	33.1	20.0	10.0	3.1
2003	34.7	21.0	10.5	3.3
2004	34.8	21.5	10.0	3.3
2005	37.4	23.0	11.0	3.4
2006	39.7	25.0	11.2	3.5
2007	42.1	27.0	11.5	3.6
2008	43.5	27.5	12.2	3.8
2009	45.5	29.0	12.7	3.8
2010	47.3	30.5	12.9	3.9

Entre los principales productores a nivel mundial se ubican Estados Unidos (45%) , Brasil (44%) China (6%), Unión Europea (3%), India (1%) y otros países el restante 1%. En la Fig 3 se muestra en detalle la producción Mundial de Alcohol.



Elaborado a partir de datos de: F. O. Licht, "Ethanol: World Production, by Country," table, World Ethanol and Biofuels Report, vol. 2, no. 19 (9 marzo 2007), p. 395.

**Fig 3 Producción Mundial de Bioetanol 2007**

En la actualidad el mundo se enfrenta a un auge desmedido y un crecimiento acelerado de los biocombustibles por lo que se requiere de cultivos que no comprometan la

seguridad alimentaria humana y animal ni causen daños al medio ambiente para su producción. El limitado desarrollo de cultivos energéticos constituye una debilidad cuya superación implica un desafío tecnológico

Hoy día la obtención del bioetanol se realiza a través de materias primas de primera generación como azúcares o cereales. La obtención de etanol de granos tiene como desventaja que es un proceso que requiere de mayor inversión y gastos de energía. Otra alternativa de cosechas dedicadas a fines energéticos, es el uso de residuos de procesos agrícolas, forestales o industriales denominados de segunda generación. Pero presenta como desventaja que su tecnología esta aun en fase de desarrollo, pues necesita de enzimas con mayor especificidad y microorganismos modificados genéticamente para hacer más eficiente el proceso productivo y disminuyan los costos de producción. Una solución viable es desarrollar cultivos como la caña de azúcar de probadas potencialidades de producción de etanol y de sorgo dulce que se "postula" como una buena materia prima para tales fines.

La India en años recientes ha incrementado el interés en la utilización del sorgo dulce para la producción de etanol por su amplia adaptabilidad y rápida cosecha. El Instituto Internacional de Investigaciones en Cultivos para las Zonas Tropicales Semiaridas (ICRISAT, por sus siglas en ingles)) con fines no lucrativos con sede en la India se pronuncia con dos estrategias: una desarrollar variedades de sorgo dulce, e híbridos parentales y dos impulsar la tecnología de producción de etanol en base a sorgo dulce en asociación con el Sistema Nacional de Investigaciones (NARS, por sus siglas en ingles). El ICRISAT a través de la Agri-Business Incubator (ABI) proporciona el desarrollo de la agrotecnología, dos variedades fueron liberadas para su comercialización la NTJ 2 y SSV 84 por su contenido de azúcar en tallo. ABI-ICRISAT en colaboración con la Rusni Distilleries Ltd comercializan la producción de etanol. La Rusni Distilleries se propone la producción de alcohol combustible y Alcohol Extra Neutro (ENA) a partir de sorgo dulce (ICRISAT, 2006) Actualmente producen entre 35000 a 40000 Litros diarios con un requerimiento de toneladas de tallos en 105 días de 84000-97875 y un área total de siembra de 6000-6800 ha que comprende la estación de lluvia (2300-2600 ha) y post lluvia (3700-4200 ha). En la India el costo de un galón de etanol de sorgo cuesta 1.74 dólares comparado con 2.19 de la caña de azúcar y 2.12 dólares del maíz según informa el ICRISAT (Agrobiotecnología, 2008). Señalan que planifican duplicar la producción a 80000 litros por día en marzo del 2008 y se esta planificando la construcción de otra planta de 200000 litros. Cuando los proyectos concluyan la capacidad total de producción de etanol de sorgo dulce será de 400000 litros (Kurmanath, 2007)

La tecnología ha sido compartida tanto en el desarrollo de semillas como en el proceso de producción del cultivo. Muestras de semillas han sido suministradas a Filipinas, Tailandia, Turquía, Egipto, Japón, Colombia, Uruguay, y Azerbaiyán.

Proyectos desarrollados sobre el modelo de asociación están en marcha en México, Filipinas, Mozambique y Kenia (Agrobiotecnología, 2008). El Grupo Corporativo Mexicano Jade se ha unido a los esfuerzos de investigación del sorgo. La Texas Agricultural Experimental Station ha desarrollado una técnica que consiste en inyectar sacarosa a la planta para conocer como mueve y almacena el azúcar en su interior. Los ingenieros fotografían los vasos del sorgo para conocer con exactitud como guarda el azúcar en su interior, con este estudio podría eventualmente sacar el máximo provecho del cultivo y por lo tanto, reducir sus gastos de producción (Tarple y Donald, 2007) Ellos también están desarrollando híbridos y variedades de sorgo dulce para optimizar la producción de etanol. México proyecta instalar la primera planta de etanol a base de sorgo dulce en Pánuco cuya inversión global ascendería a mil 900 millones de pesos. El Grupo Thaes Energy Solutions proyecta construir durante el año 2009 una planta con capacidad para producir 140 millones de litros anuales de etanol para exportación al mercado norteamericano principalmente. Pruebas de campo realizadas conjuntamente con la Universidad Autónoma de Nuevo León y otras instituciones muestran que el sorgo dulce es el cultivo más productivo con dos ciclos por año de 120 días cada uno, explicaron los directivos . ( El golfo, 2008). En este propio año 2008, la Fundación E-Misión organización sin fines de lucro creada hace ocho años para promover e impulsar el desarrollo y el uso de bioenergéticos en México, .reveló que Jalisco contará con la primera planta de etanol en el país, la cual requerirá de una inversión de 80 millones de dólares. La planta se ubicará en el Municipio de La Barca, donde se producirá el etanol a partir del sorgo dulce, “que es primo hermano de la caña”. Además, se avanza en el proyecto de otra planta en la región de Tala y Ameca, aprovechando la infraestructura instalada de los ingenios del mismo nombre (El informador, 2008)

Uruguay desde el 2005 realiza experiencias y convenios interinstitucionales entre ANCAP (petrolera uruguaya), Udelar (Universidad de la República) e INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). En colaboración con Facultad de Agronomía han realizado ensayos en tres estaciones experimentales: la EMAC en el norte, el Centro Regional Sur y Bañado de Medina en el noreste. Tiene un plan de producción de semilla certificada en Canelones con pequeños productores. En cuanto a la evolución del área en hectáreas de sorgo dulce, en 2005 – 2006 pasaron de 450 a 1200 hectáreas, en 2006-2007 a más de 2000 hectáreas y para este año tienen semilla para 7000 hectáreas Han manifestado interés los gobiernos departamentales de Colonia, Canelones, Treinta y Tres, Río Negro, Paysandú, Durazno, Soriano y Florida. Plantean que instalando destilerías de 250.000 a 300.000 litros por día de etanol en un radio de influencia no mayor a 30 km que estarían produciendo 540 millones de litros de etanol por año, en una superficie de 108.000 hectáreas. Señalan además la construcción de nuevas destilerías equivalente a las 7 mencionadas para la producción de 180 millones de litros de etanol (Marques, 2008).

Paraguay ha realizado investigaciones en la producción de etanol de sorgo dulce. La experiencia realizada reporta una producción de 80-100 ton de masa verde en dos cortes en un periodo de 5 meses, variando la producción de etanol en el orden de los 50 litros /ton dependiendo de la variedad seleccionada. Obtienen 5000 a 7000 litros de etanol/ha. Los resultados alcanzados abren un panorama alentador para la producción alternativa de alto rendimiento. (El productor on line Revista de información y asistencia técnica agosto, 2008)

En Colombia también se han realizado experiencias pero aun no se produce sorgo en las cantidades necesarias para justificar una planta de tamaño comercial., sin embargo se proyecta de acuerdo a las proyecciones de ECOCORDOBA y CORPODIB: construir una planta con capacidad para 300000 litros /día de etanol anhidro , para una producción anual de 100 millones de litros con un costo total de producción de 1.5 US\$ / galon (Proyecto Cereté , 2007)

En Santo Domingo la empresa RJS Group, S. A de capital dominicano y estadounidense, con importantes inversionistas europeos invertirá 340 millones de dólares en el Complejo Agroindustrial “Fénix”, que se desarrollará en las cuatro provincias de la región Noroeste de Montecristi, Dajabón, Santiago Rodríguez y Mao, y Valverde en una extensión de terrenos que abarca 640 mil hectáreas El complejo incluye una planta para producir 100 millones de galones de etanol anualmente, utilizando como materia prima el sorgo dulce; una para la cogeneración de electricidad, de 100 megas, a partir del bagazo de la caña de sorgo; otra para la producción de gases como metano, hidrógeno y CO<sub>2</sub>, y una cuarta planta para la producción de alimentos para animales vacunos, porcinos, aves y peces, entre otros, denominada como “DDGS” (granos destilados solubles). Entre los proyectos asociados esta el de engorde de ganado vacuno para la exportación, aprovechando la disponibilidad de alimentos que producirá una de las plantas que forman parte del complejo agroindustrial. Asimismo, instalarán una fábrica de “play-wood” utilizando residuos de las plantas de sorgo dulce, y otra para la fabricación de pacas energéticas comprimidas para la exportación hacia Europa y Estados Unidos, donde se usan como insumo para la calefacción durante el invierno. Las obras de ingeniería del Complejo Agroindustrial “Fénix” se iniciarán a principios de enero del 2009. (El Metro Digital, 2008)

En Estados Unidos se diseñará y construirá en Florida el primer sistema de cosechado mecánico de sorgo dulce y una planta de producción de bioetanol capaz de producir 5 millones de galones anualmente (American Fuels, (2008).

#### **Visión a mediano plazo**

La producción de cultivos multipropósitos que ofrecen alimento, forraje y bioetanol

será una respuesta a los altos precios de los alimentos y un enorme potencial para responder a las necesidades de los países en desarrollo

Seguirán las investigaciones por encontrar al mejor sustituto de la caña de azúcar, la cual para producir etanol es aun hoy contaminante y emisora de gases invernaderos. Las mayores posibilidades para reducción de la contaminación ambiental, reducción de la cantidad de alimentos o granos destinados a la producción del bioetanol, reducción en los costos, aumento en la calidad del etanol y aplicación de tecnologías agronómicas e industrial continuaran impulsando el desarrollo del sorgo dulce

El sorgo dulce será uno de los dos cultivos tropicales para producir bioetanol que aumentará la capacidad del mercado Mundial en que la demanda excede ampliamente a la oferta.

El interés por el sorgo dulce aumentará en la medida que disminuya el desconocimiento del cultivo en el Mundo entero y la intensidad de esta acción determinará en el futuro el signo de la producción de bioetanol

Publicación:

Carrillo, D.; Zumalacárregi, L.; Sánchez, O.; Michelena, G.; Yznaga, H.; Martínez, J.L. y Noé, C. bajo el título de Pretreatments employed in lignocellulosic materials for bioethanol production: an overview en la Revista ICIDCA Sobre los derivados de la caña de azúcar (2014). Vol. 48 (1): 71-79.

***a. Hidrólisis de la biomasa. Estudios sobre diferentes sustratos.***

Se muestran avances en los estudios de la hidrólisis de la corteza del mango y también del banano.

**COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES CONFIGURACIONES DE PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE CORTEZAS DE ÁRBOLES DE MANGO.**

**Introducción.** Los residuos de las cortezas de árboles de mango son materiales lignocelulósicos de la industria del VIMANG®, en Cuba. El VIMANG®, en diferentes formulaciones farmacéuticas, ha demostrado ser eficaz como antioxidante, antiinflamatorio e inmunomodulador, sin embargo los residuos de esta producción representan un problema medioambiental, por lo que se proponen como materia prima para la producción de bioetanol. Para ser convertidos estos residuos a etanol se necesita una serie de etapas tales como pretratamiento, hidrólisis enzimática y fermentación. Una vez realizado el pretratamiento, hay varias formas en que la sacarificación y la fermentación pueden ser llevadas a cabo.

Se propone realizar un estudio comparativo empleando la hidrólisis y fermentación

separada (HFS), la sacarificación y fermentación simultánea (SFS) o la presacarificación seguido de SFS (PSSF) y evaluar en cada caso la concentración de etanol obtenida y la producción de etanol por cada tonelada de residuo.

**Metodología.** Se colocaron en los reactores el material pretratado al 20% de carga de sólidos y fue mezclado con una solución de tampón de citratos (pH 4.8). Se adicionaron las preparaciones enzimáticas (celulasas y  $\beta$ -glucosidasa) de acuerdo a la dosificación requerida en cada experimento. En la HFS, la hidrólisis se realizó durante 24 horas a 50°C y la fermentación se realizó a 30°C y 150 rpm hasta las 96 horas. Se inoculó el cultivo de levaduras *Saccharomyces cerevisiae* y el medio fue enriquecido con extracto de levadura (2.5 g/L) y peptona (5 g/L) (1). La mezcla de reacción en la SFS se incubó a 38°C y 150 rpm durante 96h (2). En la PSSF se añadió una porción de las enzimas y se realizó una presacarificación durante 16 horas a 50°C, luego se siguió el mismo procedimiento que en la SFS. Se realizaron dos réplicas de todos los experimentos y se cuantificó la producción de etanol por cromatografía de gases (3).

**Resultados.** Los residuos sólidos fueron sometidos a un pretratamiento alcalino con solución de NaOH al 3% másico, durante 15 minutos a una temperatura de 120°C, logrando un aumento de un 15.5% en el contenido de glucano, con respecto al material sin tratar. La concentración de glucosa en la hidrólisis enzimática del proceso HFS a las 24 horas fue 89.45g/L para un rendimiento de 51.37%. La posterior fermentación resultó en 26.21 g de etanol / L, que corresponde a un rendimiento de etanol de 52.87% en comparación con el rendimiento teórico (tabla III). A partir de la fracción de glucosa contenida en una tonelada de los residuos pretratados es posible producir 158 L de etanol.

**Tabla III.** Comparación entre las configuraciones de procesos.

Parámetros (20% m/V)	HFS	SFS	PSSF
C (Etanol) (g/L)	26.21	34.65	39.12
Rendimiento de etanol (%)	52.87	58.17	65.67
Etanol (L)/ T material	158.18	209.13	236.10
Productividad (g/(L*h))	0.55	0.72	0.82

En cuanto a los otros dos procesos SFS y PSSF es posible obtener 209 y 236 L de etanol / tonelada de residuo respectivamente, que es equivalente a 58.17 y 65.67% del rendimiento de etanol producido a partir de la glucosa potencial en la materia prima. La productividad aumenta al emplear los procesos SFS y PSSF. Estos resultados coinciden con lo reportado por Mesa y col. (2011) (4) y Avelino y col. (2014) (2). En el proceso de

SFS no se detectó acumulación de glucosa al final de los experimentos y en la PSSF, después de inocular la levadura, la concentración de glucosa disminuyó aceleradamente hasta prácticamente desaparecer, por lo que ambos procesos son eficientes.

**Conclusiones.** De las configuraciones estudiadas para la producción de etanol, se obtuvieron los resultados más altos cuando se incluye un paso de presacarificación, logrando rendimientos de 236 litros de etanol por tonelada de residuo y concentraciones de 39.12 g /L.

#### **Bibliografía.**

1. Dowe N, McMillan J. (2008) *Technical Report NREL/TP-510-42630*
2. Avelino F, Ruiz H, Costa C, Silvino E, Teixeira J, Ribeiro G. (2014) *Fuel*. 131: 66–76.
3. Gon S, Yeoup B, Gyo Y, Joo D, Bae H. (2011) *Bioresour. Technol.*102: 5788–5793.
4. Mesa L, González E, Romero I, Ruiz E, Cara C, Castro E (2011) *Chem. Eng. J.* 175: 185– 191

### **Physicochemical Pretreatments Effect on Susceptibility of Banana Peel Cellulose to Enzymatic Hydrolysis**

#### **Introduction**

Banana is an important crop in tropical and sub-tropical regions located mainly in Asia, South America and the African continent (Oberoi et al., 2011). Significant amounts of banana peels (BP), equivalent to 60% of the total weight of fresh banana, are generated as waste from industrial production of frozen banana, banana puree and flour (Nagarajaiah and Prakash, 2011).

BP utilization in biotechnological processes, such as bio-fuels and enzymes production, animal feed protein enrichment, and other important industrial applications were reported previously (Bardiya et al., 1996; Clarke et al., 2008; Dhabekar and Chandak, 2010; Gunaseelan, 2004; Ilori et al., 2007; Souza et al., 2012; Velásquez-Arredondo et al., 2010).

Banana peels (BP) are characterized as source of lingo-cellulosic compounds, as well as carbohydrates, vitamins, minerals (essential and non-essential). Lignocelluloses contain three important components: hemicellulose, lignin, and cellulose. Hemicelluloses are heterogeneous polymers of five and six carbon monosaccharides (Carmen, 2009; Pérez et al., 2002). Cellulose is a lineal biopolymer contains glucose molecules connected by  $\beta$ -1,4glycosidic bonds, and is considered as material suitable for second generation bioethanol production (Ovando-Chacó and Waliszewski, 2005; Pérez et al., 2002). Both biopolymers interact with lignin (Badui D, 2006), which is heterogeneous polymer contains generally three types of aromatic alcohols (coniferyl alcohol, sinapyl, and p-coumaryl). During second generation bioethanol production lignin acts as a barrier for enzymes applied for cellulose hydrolysis, and it is a component difficult to degrade. Physico-chemical pretreatments commonly are applied previous to enzymatic hydrolysis to release hemicellulose, decrease cellulose interaction with lignin and transform its crystalline form to amorphous state (Itelima et al., 2013; Oberoi et al., 2011; Sharma et

al., 2007).

Previous studies realized with BP as lingo-cellulosic material were performed with acids under autoclave conditions ([Oberoi et al., 2011](#); [Sharma et al., 2007](#); [Souza et al., 2012](#)). However, dry pulverized material was used ([Oberoi et al., 2011](#)). Drying and pulverization increase operating cost and ethanol production time. Other faster and cheaper operations must be tested. Such is the case of the liquefying process. This process can be easily performed in industrial blenders. Another alternative is to not perform operations intended to reduce the particle size, which is achieved by pulverization and blending. Effects of physicochemical pretreatments on unmilled banana peel were not reported previously.

The aim of this study was to evaluate the effect of acid pretreatments, performed in the presence of different acid concentrations and temperatures with dry-pulverized, liquefied or unmilled banana peels, on treated materials lingo-cellulosic contents and susceptibility of BP cellulose to enzymatic hydrolysis.

## **Materials and methods**

### **Materials**

Bananas were purchased on Saltillo market, Coahuila, Mexico. Fruit maturation was achieved in the laboratory at room temperature (20-25 °C). Banana peels was removed from fruit at maturation stage No. 7 (yellow/a few brown spots), according scale defined previously by different authors ([Happi Emaga et al., 2007](#); [Happi Emaga et al., 2008](#)). This maturation stage was selected due to its common application in different industrial and traditional culinary uses of banana, during which BP waster is generated. Banana peels were processed at three different forms: unmilled, liquefied and pulverized. To obtain pulverized form, BP were dried at 60 °C for 48 h, then were milled in mechanical grinder to particles size less than 1 mm. Powder was stored in polypropylene plastic bags at 25 °C before use ([Happi Emaga et al., 2007](#); [Oberoi et al., 2011](#)). To obtain liquefied form, BP were homogenized in 2 L domestic blender in of aqueous medium ([Souza et al., 2012](#)). Unmilled BP were applied without any physical process. The celulitic complex Celluclast 1.5 L (C-2730) was purchased from Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo, USA) to assay enzymatic hydrolysis on pretreated banana peels.

### **Physicochemical pretreatments**

Figure 4 presents the diagram of assays performed in the present study. Banana peels (pulverized, liquefied, and unmilled) were treated in 500 mL flasks with sulfuric acid at three different concentrations (0 %, 0.5 %, 1%), at 28°C or 121°C at 103 kPa as autoclave condition for 15 min ([Souza et al., 2012](#)). All samples assayed by triplicate, contained the same watery content defined considering fruit moisture: 8 g of pulverized BP and 92 g of watery phase; 60 g of BP with 40 g of aqueous medium for unmilled or liquefied forms. Treated and untreated BP samples were dried in hot-air oven at 72°C, and then stored in polypropylene bags at 25 °C before use.

### **Proximal composition analysis**

Samples were pulverized in mechanical grinder before composition analysis. Moisture and ash content were analyzed by AOAC method (AOAC 2000). Neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF) (data no presented), and acid detergent lignin (ADL) were analyzed using an ANKOM 200 fiber analyzer (ANKOM Technology, USA) following the procedure specified by the manufacturers. The difference between ADF and ADL, as well as NDF and ADF, was reported as cellulose and hemicellulose, respectively (Oberoi et al., 2012). Total sugars content and reducing sugars content were analyzed by sulfuric phenol method and with 3-5 dinitrosalicylic acid (DNS) method, respectively. All assays were realized by duplicate.

### **Enzymatic assay**

Enzymatic reaction was performed for 72 h at 50 °C and 150 rpm. Reaction was carried in 100 mM acetate buffer at pH 5 using 15 FPU g<sup>-1</sup> (Celluclast) and 0.05 g of each BP samples (dry and milled after pretreatments). Glucose release was analyzed using a commercial Kit (RANDOX). All assays were realized by triplicate.

### **Statistical Analysis**

For the ANOVA test with a significance level of  $p < 0.05$  was employed the software Statistica 7.0 (Stat Soft, Tulsa, OK, USA). To compare results of materials characterization Tukey's range test was performed for means treatment with a significance level of  $p < 0.05$ . In order to homogenize variances percentage data for testing (cellulose, hemicellulose, lignin and ash) they were transformed using the formula  $\arcsin(\sqrt{\% \text{ cellulose}})$ .

Kinetic data was analyzed by ANOVA test with a significance level of  $p < 0.05$  and plotted in Excel with corresponding standard deviations.

### **Results**

#### **Pretreatments effect on banana peels composition**

BP used in the present study contained 86% moisture before their drying and pulverization. This value was taken in account to unify the amount of aqueous phase in all applied treatments.

Table IV summarizes the results obtained from BP compositional characterization after different pretreatments. These results indicated that BP are lingo- cellulosic material rich in polysaccharides (cellulose, hemicellulose), lignin, and minerals. The content of cellulose on pulverized material treated with 0.5% sulfuric acid at 121°C is greater than other values including values corresponded to liquefied and unmilled materials. Acid use at both temperatures on liquefied BP led to cellulose content decrease. The same effect was observed in unmilled BP only at room temperature. At autoclave condition, the similar values were obtained with and without acid.

Similarity in amounts of hemicellulose was observed for various values corresponding to liquefied and unmilled materials indicating decrease of this polysaccharides fraction. However, the highest percent was detected on unmilled material treated with 0.5% sulfuric acid at 28°C. Similar hemicellulose levels were detected on pulverized BP treated without acid. Pulverized materials treated with 0.5% or 1% sulfuric acid at 121°C, and with 1% acid at 28°C showed no presence of this component (Table 1).

Percentages of components undetected by an ANKOM 200 fiber analyzer (ANKOM Technology, USA) also was estimated (Table 1). Decrease in parameters quantified from obtained results was related with increasing of undetected compounds level. The highest values were detected in the case of liquefied and unmilled samples treated with acid.

The comparison of total sugars values showed that liquefied material had highest levels in comparison with pulverized and unmilled materials. The best results were achieved with 0.5% sulfuric acid at 121°C and with 1% acid at 28°C (Table IV).

Reducing sugars levels were higher in liquefied and unmilled BP. The highest level of reducing sugars was detected in unmilled BP treated with 0.5% acid at 121°C.

In pulverized BP higher lignin level was observed in material treated with 0.5 % acid under autoclave condition. So, acid treatment and high temperature did not lead to lignin removing. However, in the case of liquefied material minor lignin levels were detected with acid addition treatments, while on unmilled BP increase of acid concentration led to minor lignin removing (Table IV).

The mineral content was not significantly different between all evaluated treated materials. However, the highest values were detected pulverized BP treated with 1.0% sulfuric acid at 121°C (Table IV).

Thus, pulverized BP were more susceptible to hemicellulose removing, but not to lignin removing. Liquefied BP preserved sugar content, while pulverized material kept higher level of mineral content under similar conditions of treatments.

#### **Pretreated Banana Peels Susceptibility to Enzymatic Cellulose Hydrolysis**

Figure 5 describes kinetics of glucose release from cellulose that was considered as the criterion of cellulose susceptibility to enzymatic hydrolysis in pretreated BP. Tendency for susceptibility increase with increase of treatment temperature was observed.

For BP treated at 28°C, the greatest glucose release was observed in the case of material obtained after liquefied BP treatment with 0.5% sulfuric acid. Glucose release was similar for other assayed samples (Figure 2, left).

For BP treated at autoclave conditions at 121°C, the greatest glucose release was detected for liquefied materials pretreated with 0.5 and 1% sulfuric acid, as well as for unmilled BP treated with 1% acid. The lowest glucose release was detected in the case of material obtained without acid treatments from pulverized BP (Figure 2, right). Kinetic behavior of curves corresponded to glucose release from pulverized BP treated with and without acid leads to slower processes in comparison with other assayed

samples (Figure 5).

### **Discussion**

The results of BP composition (Table IV) confirm that this organic waste is a source of cellulose, hemicellulose, lignin and inorganic compounds. The obtained values agree with data reported previously by different authors (Happi Emaga et al., 2007; Nagarajaiah and Prakash, 2011; Sharma et al., 2007). Sibaja (1994) have informed that ripe banana (unknown variety) peel crude fiber contains 25% cellulose, 15% hemicellulose and 60% lignin. These values are close to ones detected in the present study. Since in the present study only one lignin fraction was quantified, lignin values reported by Sibaja (1994) were higher than acid-detergent lignin (ADL) levels reported in the Table IV.

Mass balance applied to calculate fraction undetected in ANKOM 200 analyzer demonstrates that only in the case of pulverized BP treated with 0.5% sulfuric acid and without acid low percentages of undetected compounds are observed. Considering that this samples contained greater levels of cellulose, obtained results might signify that applied treatments provoked BP major transformation to low weight compounds in liquefied and unmilled materials, for example, reducing sugars and other cellulose, hemicellulose and lignin derivatives.

Higher values of cellulose quantified in pulverized material can be related to less effective hydrolysis (even with acid and high temperature) than in the case of treatments performed on liquefied and unmilled materials. The increase on total sugar levels revealed that polysaccharides were transformed to low weight saccharides, which also might proceed from hemicellulose. Applied treatments led to partial hemicellulose hydrolysis in all samples, which was more effective in the acid presence and with high temperature. However, hydrolysis occurred even in acid absence and at room temperature. These results agree with ones reported by Mosier et al. (2005), whom have considered that at high temperature water acts as a weak acid and can partially hydrolyze such compounds as hemicellulose. Souza et al. (2012) reported high total sugar content in BP applied for bioethanol production. However, they did not recommend using acids for polysaccharides hydrolysis in BP pre-treatment because acids application did not lead to increase bioethanol levels.

The presence of detectable acid detergent lignin (ADL) levels indicates that lignin is not totally degraded not even with acid at room or autoclave conditions. The same observations were reported by Happi Emaga et al. (2007), whom assayed with pulverized banana peels (unknown variety).

Mineral content in the pretreated materials was not affected by acidic and thermal treatments. Other authors reported ash percentages ranged from 6.4% to 12.8% on bananas of different varieties, in ripeness 7 and normal maturation. These are similar to values observed in the present study (Hammond et al., 1996; Happi Emaga et al., 2007; Nagarajaiah and Prakash, 2011).

The analysis of cellulose susceptibility to enzymatic hydrolysis allows concluding that liquefying may be applied as a part of BP treatment instead of pulverization of dry BP. Moreover, in this case sulfuric acid addition and autoclave conditions allow obtaining materials with higher susceptibility to cellulose enzymatic hydrolysis (Figure 6). However, the highest values detected in the present study with liquefied material pretreated with acid was (nearly to 2.4 g glucose/g cellulose) were lower than reported by other authors (17–27.8 g glucose/g/L) ([Oberoi et al., 2011](#); [Oberoi et al., 2012](#); [Itelima et al., 2013](#)). It may be related to using of other banana varieties, other maturation fruit state or greater BP concentrations. Moreover, enzymes applied for polysaccharide hydrolysis contained cellulolytic and pectinolytic activities at different proportions ([Itelima et al., 2013](#); [Oberoi et al., 2011](#); [Oberoi et al., 2012](#); [Sharma et al., 2007](#)). Even so, the conclusion that enzymes increase the glucose levels due to hydrolysis of cellulose and hemicellulose fractions is transcendental for present and other studies. High glucose level is essential for ethanolic fermentation process. Liquefied BP are rich source of glucose, levels of which may be increase by acid and temperature pre-treatments and enzymatic hydrolysis. The enzymatic hydrolysis optimization is one of the important aims that must be considered in future studies.

### Conclusions

Banana peels are a rich glucose source. Their liquefaction is one of possible form for banana peels treatment, which with acid and thermal treatments allows obtaining material more susceptible to cellulase hydrolysis than pulverized material treated under the same conditions. Unmilled banana peels treated with sulfuric acid at autoclave condition also may be considered as alternative form for material pretreatment due to high cellulose susceptibility to enzymatic hydrolysis. Therefore, material drying and milling previous to pre-treatment may be avoided as an industrial process step.

### References

- Badui D, S., 2006. Hidratos de carbono, in: Duarte, E.Q. (Ed.), Química de los alimentos. Pearson Educación, México, p. 107.
- Bardiya, N., Somayaji, D., Khanna, S., 1996. Biomethanation of banana peel and pineapple waste. *Bioresource Technology* 58, 73-76.
- Carmen, S., 2009. Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnol. Adv.* 27, 185-194.
- Clarke, W.P., Radnidge, P., Lai, T.E., Jensen, P.D., Hardin, M.T., 2008. Digestion of waste bananas to generate energy in Australia. *Waste Management* 28, 527-533.
- Dhabekar, A., Chandak, A., 2010. Utilization of banana peels and beet waste for alcohol production. *Asiatic J. Biotech. Res.* 1, 8-13.
- Gunaseelan, V.N., 2004. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy* 26, 389-399.
- Hammond, J.B., Egg, R., Diggins, D., Coble, C.G., 1996. Alcohol from bananas. *Bioresource Technology* 56, 125-130.
- HappiEmaga, T., Andrianaivo, R.H., Wathelet, B., Tchango, J.T., Paquot, M., 2007. Effects of the stage of maturation and varieties on the chemical composition of banana and plantain peels. *Food Chemistry* 103, 590-600.
- HappiEmaga, T., Robert, C., Ronkart, S.N., Wathelet, B., Paquot, M., 2008. Dietary fibre components and pectin chemical features of peels during ripening in banana and plantain varieties. *Bioresource Technology* 99, 4346-4354.
- Ilori, M.O., Adebuseye, S.A., Iawal, A.K., Awotiwon, O.A., 2007. Production of biogas from banana and plantain peels. *Adv. Environ. Biol.* 1, 33-38.
- Itelima, J., Onwuliri, E., I., O., Oforji, S., 2013. Bio-Ethanol Production from Banana, Plantain and Pineapple Peels by Simultaneous Saccharification and Fermentation Process. *International Journal of Environmental Science and Development* 4, 213-216.
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapple, M., Ladisch, M., 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 96, 673-686.

Nagarajiah, S.B., Prakash, J., 2011. Chemical composition and antioxidant potential of peels from three varieties of banana. *As. J. Food Ag-Ind.* 4, 31-46.

Oberoi, H.S., Sandhu, S.K., Vadlani, P.V., 2012. Statistical optimization of hydrolysis process for banana peels using cellulolytic and pectinolytic enzymes. *Food and Bioproducts Processing* 90, 257-265.

Oberoi, H.S., Vadlani, P.V., Saida, L., Bansal, S., Hughes, J.D., 2011. Ethanol production from banana peels using statistically optimized simultaneous saccharification and fermentation process. *Waste Management* 31, 1576-1584.

Ovando-Chacó, S.L., Waliszewski, K.N., 2005. Commercial cellulases preparations and their applications in extractives processes *UNIVERSIDAD Y CIENCIA* 21, 111-120.

Pérez, J., Muñoz-Dorado, J., De la Rubia, T., Martínez, J., 2002. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *Int. Microbiol.* 5, 53-63.

Sharma, N., Kalra, K.L., Oberoi, H., Bansal, S., 2007. Optimization of fermentation parameters for production of ethanol from kinnow waste and banana peels by simultaneous saccharification and fermentation. *Indian Journal of Microbiology* 47, 310-316.

Sibaja, G., 1994. Evaluación de la cáscara de banano maduro como material de ensilaje con pasto King grass (*Pennisetumpurpureum*). Facultad de Agronomía. Escuela de Zootecnia. Universidad de Costa Rica, San José (Costa Rica), p. 49.

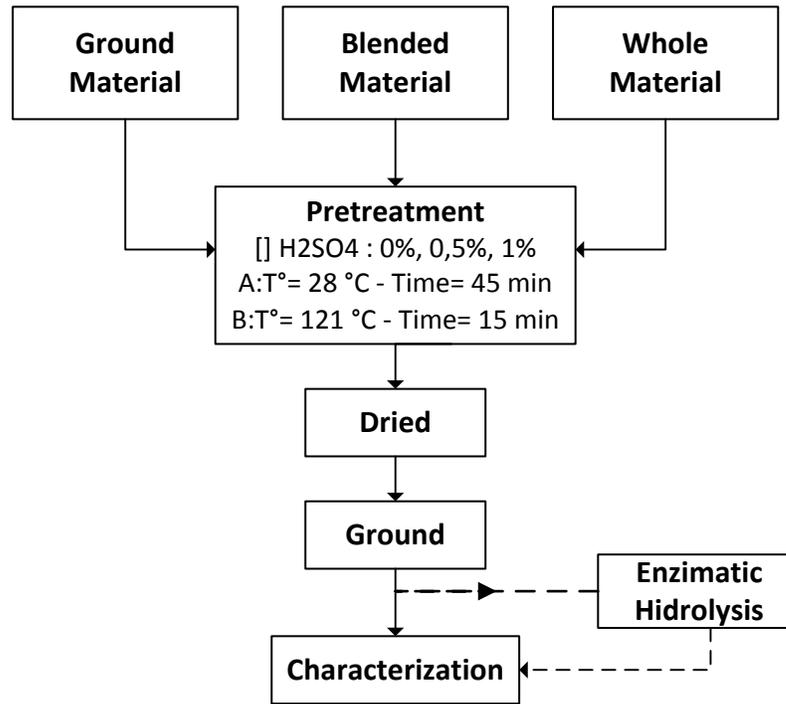
Souza, O., Schulz, M.A., Fischer, G.A.A., Wagner, T.M., Sellin, N., 2012. Energia alternativa de biomassa: Bioetanol a partir de casca e polpa de banana. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16, 915-921.

Velásquez-Arredondo, H.I., Ruiz-Colorado, A.A., De Oliveira junior, S., 2010. Ethanol production process from banana fruit and its lignocellulosic residues: Energy analysis. *Energy* 35, 3081-3087.

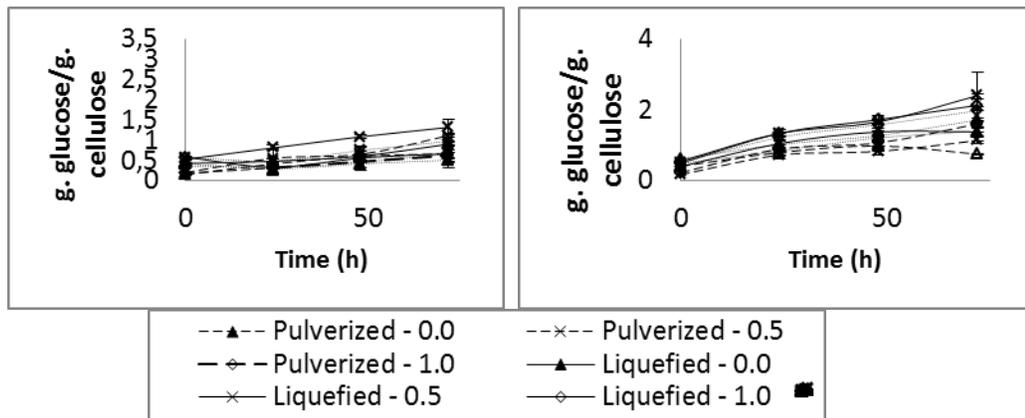
**Table IV.** Characterization of banana peels after different grinding treatments and in the presence and absence of sulfuric acid at room and autoclave conditions.

BP Sample	Acid	°C	Cellulose	Hemicellulose	Acid-Detergent Lignin (ADL)	Ash	Undetected compounds	Total sugars	Reducing sugars
	%		%	%	%	%	%	(g BP g <sup>-1</sup> )	(g BP g <sup>-1</sup> )
<b>Pulverized</b>	0%	28	25.84 <sup>b</sup>	19.55 <sup>ab</sup>	18.14 <sup>abc</sup>	15.92 <sup>bc</sup>	21.4 <sup>f</sup>	0.24 <sup>de</sup>	0.11 <sup>de</sup>
		121	22.79 <sup>bcd</sup>	16.22 <sup>a</sup>	18.93 <sup>bcd</sup>	14.59 <sup>d</sup>	25.55 <sup>f</sup>	0.36 <sup>cde</sup>	0.17 <sup>de</sup>
	0.50%	28	21.35 <sup>cde</sup>	8.09 <sup>bode</sup>	18.34 <sup>bode</sup>	16.62 <sup>ab</sup>	37.02 <sup>e</sup>	0.27 <sup>de</sup>	0.12 <sup>de</sup>
		121	30.15 <sup>a</sup>	0 <sup>f</sup>	27.59 <sup>a</sup>	10.71 <sup>g</sup>	34.34 <sup>e</sup>	0.27 <sup>de</sup>	0.15 <sup>de</sup>
	1%	28	21.19 <sup>de</sup>	0 <sup>f</sup>	17.88 <sup>bode</sup>	17.31 <sup>a</sup>	45.69 <sup>bc</sup>	0.21 <sup>de</sup>	0.09 <sup>e</sup>
		121	20.08 <sup>de</sup>	0 <sup>f</sup>	16.87 <sup>cdef</sup>	17.72 <sup>a</sup>	50.31 <sup>abc</sup>	0.14 <sup>e</sup>	0.14 <sup>de</sup>
<b>Liquefied</b>	0%	28	24.83 <sup>b</sup>	1.8 <sup>def</sup>	25.23 <sup>a</sup>	13.37 <sup>ef</sup>	34.74 <sup>e</sup>	0.21 <sup>de</sup>	0.15 <sup>de</sup>
		121	18.75 <sup>ef</sup>	2.48 <sup>ef</sup>	23.41 <sup>ab</sup>	11.34 <sup>g</sup>	45.49 <sup>cd</sup>	0.69 <sup>ab</sup>	0.26 <sup>bc</sup>
	0.50%	28	15.53 <sup>g</sup>	9.85 <sup>abc</sup>	12.17 <sup>f</sup>	13.09 <sup>ef</sup>	49.34 <sup>abc</sup>	0.72 <sup>a</sup>	0.29 <sup>b</sup>
		121	15.25 <sup>g</sup>	6.77 <sup>bcd</sup>	12.25 <sup>f</sup>	12.94 <sup>ef</sup>	52.78 <sup>abc</sup>	0.84 <sup>a</sup>	0.27 <sup>bc</sup>
	1%	28	15.64 <sup>g</sup>	7.35 <sup>bcd</sup>	12 <sup>f</sup>	13.52 <sup>cd</sup>	51.47 <sup>abc</sup>	0.77 <sup>a</sup>	0.16 <sup>de</sup>
		121	14.24 <sup>g</sup>	1.78 <sup>def</sup>	13.41 <sup>def</sup>	14.86 <sup>de</sup>	55.68 <sup>a</sup>	0.61 <sup>abc</sup>	0.26 <sup>bc</sup>
<b>Unmilled</b>	0%	28	23.37 <sup>bc</sup>	12.33 <sup>abc</sup>	12.33 <sup>def</sup>	12.75 <sup>f</sup>	35.47 <sup>a</sup>	0.43 <sup>bcd</sup>	0.22 <sup>bcd</sup>
		121	14.42 <sup>g</sup>	5.19 <sup>cde</sup>	17.28 <sup>cdef</sup>	11.3 <sup>g</sup>	51.78 <sup>abc</sup>	0.31 <sup>cde</sup>	0.30 <sup>b</sup>
	0.50%	28	16.4 <sup>g</sup>	18.6 <sup>a</sup>	13.8 <sup>def</sup>	12.72 <sup>f</sup>	37.75 <sup>de</sup>	0.40 <sup>cde</sup>	0.20 <sup>cd</sup>
		121	15.93 <sup>g</sup>	5.1 <sup>cde</sup>	14.65 <sup>def</sup>	11.66 <sup>g</sup>	53.48 <sup>ab</sup>	0.39 <sup>cde</sup>	0.37 <sup>a</sup>
	1%	28	16.26 <sup>g</sup>	6.45 <sup>abc</sup>	16.26 <sup>ef</sup>	13.84 <sup>de</sup>	37.75 <sup>bc</sup>	0.38 <sup>cde</sup>	0.17 <sup>de</sup>
		121	14.57 <sup>g</sup>	4.27 <sup>cde</sup>	14.57 <sup>f</sup>	13.96 <sup>de</sup>	55.05 <sup>a</sup>	0.4 <sup>cde</sup>	0.21 <sup>bcd</sup>

Shown means treatment and statistical with data transformed.



**Figure 5.** Diagram of experiments performed in the present study to evaluate different pretreatments of banana peels (BP).



**Figure 6.** Glucose release kinetics during enzymatic hydrolysis of cellulose from banana peels (BP) pretreated: left,- 28 °C for 45 min; right,- 121 °C for 15 min in sterilizer, in the absence (0.0%) and presence of sulfuric acid at 0.5 and 1.0% (v/v).

**Recomendaciones y acciones propuestas por el Oficial de Programa – PNUD:**

	<hr/> <hr/>
--	-------------

<b>Resultado (Producto ) Previsto en el Proyecto</b>	<p><b>Resultado 02.</b></p> <p><b><u>Act. 02. Validación tecnológica en Planta Piloto.</u></b></p> <p><b>BIOCONVERSIÓN DE SORGO FORRAJERO A ETANOL UTILIZANDO EL PROCEDIMIENTO DE EXPLOSIÓN POR VAPOR. OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO</b></p> <p>Se evaluó el procedimiento de explosión por vapor para la bioconversión del sorgo forrajero a etanol. En el proceso se obtienen una fracción sólida enriquecida en celulosa y lignina y una fracción líquida conteniendo mayormente oligómeros de xilosa y glucosa y productos de degradación de los azúcares y de la lignina. Se analiza la influencia de las variables temperatura y tiempo en el rendimiento del sorgo pretratado, en los componentes estructurales, en la conversión de celulosa y rendimiento de glucosa utilizando un diseño compuesto central y método de superficie de respuesta. La condición óptima para el rendimiento de glucosa en la fracción sólida del sorgo forrajero pretratado mediante el proceso de explosión por vapor fue temperatura de 238°C y tiempo de 8 minutos. En la fracción sólida del sorgo forrajero pretratado se recupera el 86% y 84% de la celulosa y lignina disponible en el material no tratado. El 85% de las hemicelulosas se solubilizan por efecto del tratamiento. En el proceso de hidrólisis enzimática el 89% de la celulosa se convierte en glucosa para un concentración de 55 g / L de glucosa- Se evaluó el efecto del pretratamiento en la producción de etanol mediante un proceso de hidrólisis enzimática y fermentación simultánea (SFS) a escala de laboratorio. Considerando la composición en azúcares fermentables, el rendimiento obtenido en el pretratamiento y el proceso de sacarificación y fermentación simultáneas se puede concluir que el sorgo forrajero es una materia prima adecuada para la producción de etanol.</p> <p><b>INTRODUCCIÓN</b></p> <p>En la actualidad el uso de biomasa como materia prima renovable y fácilmente disponible es considerada como una alternativa potencial para la producción de energía y bioproductos (biocombustibles (etanol y biodiesel), productos químicos industriales y materiales (textiles, bioplásticos) . El desarrollo de las biorefinerías propicia la transformación de la biomasa en diversos productos de interés comercial. La llamada “plataforma bioquímica” involucra la fermentación de los azúcares extraídos de la biomasa lignocelulósica (madera, paja, tallos, bagazo, residuos de papel, etc. mediante la hidrólisis enzimática de la celulosa. Para lograr la viabilidad industrial y económica de la tecnología</p>
--	--

diversas estrategias se han establecido para superar las barreras tecnológicas en la producción de etanol celulósico. Este esfuerzo ha permitido el desarrollo de estas tecnologías a diversas escalas pero aún la bioconversión de biomasa lignocelulósica no se produce a escala comercial.

Uno de los retos principales para el proceso de comercialización es el desarrollo de tecnologías pretratamientos rentables (Wyman y col., 2005; NREL, 2007). El pretratamiento es un paso esencial para desorganizar la estructura lignocelulósica y propiciar el incremento de accesibilidad a la celulosa y facilitar la hidrólisis enzimática (Mosier y col 2005). A diferencia de las fuentes tradicionales de azúcares fermentables como la sacarosa y el almidón la celulosa es un polímero que está rodeado por una matriz de lignina y hemicelulosa que la protegen del ataque enzimático .

La literatura reporta diversos métodos de pretratamiento físicos, físico-químicos, químicos y biológicos para mejorar la digestibilidad de los materiales lignocelulósicos (Sun y Cheng, 2002). En muchos de ellos aún quedan problemas que resolver en cuanto a la producción de inhibidores perjudiciales para la hidrólisis enzimática y fermentación (Olsson y Hahn-Hägerdal 1996). La presencia de inhibidores no solo complica la producción de etanol sino también incrementa el costo de producción de etanol debido a la necesidad de introducir un paso de destoxificación. Entre los métodos de mayor potencialidad se encuentran los pretratamiento de explosión por vapor, con cal, con agua caliente líquida y con amonio.

El procedimiento mayormente utilizado es la explosión por vapor en sus diferentes variantes (autohidrólisis, con catalizadores ácidos o amoniaco) y ha sido aplicado a diferentes materiales como chopo (Excoffier y col., 1991; Ballesteros y col., 1998), eucalipto (Ramos y col., 1992), pino (Ballesteros y col., 2000), paja de arroz (Moniruzzaman, 1995), residuos herbáceos (Ballesteros y col., 2002), residuos oleícolas (Fernández-Bolaños y col., 2001). La eficacia del pretratamiento de explosión por vapor si bien ha sido demostrada no se reporta en la literatura una detallada investigación del efecto de los parámetros del proceso sobre la fracción de los componentes mayoritarios de los materiales lignocelulósicos ni del balance de masa.

El estudio describe en base a la metodología de superficie de respuesta el efecto de la temperatura y tiempo en el rendimiento del sorgo forrajero pretratado y en la distribución de la celulosa, hemicelulosa y lignina en la fracción generada durante el pretratamiento de explosión por vapor. Se describe los compuestos de degradación de las distintas fracciones que forman la biomasa lignocelulósica originados durante el tratamiento , así como se optimiza la mejor combinación para la obtención de alto rendimiento de azúcares fermentables mediante la hidrólisis enzimática para la producción de etanol celulósico.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Materiales**

El material lignocelulósico utilizado fue sorgo forrajero con contenido de humedad del 9,4%. La biomasa fue triturada hasta un tamaño de partícula de 2 mm, utilizando un molino de cuchillas.

### **Pretratamiento por explosión a vapor**

El pretratamiento de explosión a vapor se realizó mediante tecnología Masonite en una planta piloto que posee el CIEMAT (Carrasco et al., 1989). La instalación piloto está equipada con un reactor de 2 litros de capacidad diseñado para alcanzar una presión de operación máxima de 42 kg/cm<sup>2</sup> y un ciclón de 50 litros en el que se recoge el material pretratado. El reactor se cargó con 200 g de material seco de sorgo forrajero y se inyectó vapor saturado hasta alcanzar la temperatura deseada. Una vez transcurrido el tiempo de proceso, el material se descargó de manera súbita en un ciclón, eliminándose los volátiles. En la Fig 7 se muestra el diagrama de flujo del pretratamiento por explosión por vapor.



Fig7. Diagrama de flujo del pretratamiento por explosión con vapor a escala de laboratorio

### **Hidrólisis enzimática**

Para determinar el rendimiento en glucosa se hidrolizó enzimáticamente el residuo sólido obtenido tras el pretratamiento. La carga de enzima en el sustrato fue de 20 UPF/g de Celluclast 1.5L (65 UPF/ml) y 20 UI/g de Novozyme 188 (790 UI β-Glucosidasa/ml). Ambas enzimas comercializadas por la firma Novo Nordisk (Bagsvaerd, Dinamarca). La hidrólisis enzimática se realizó en tampón acetato 0,05M pH 4,8, a una temperatura de 50°C durante 8 h en un agitador orbital a 150 rpm.

### **Sacarificación y fermentación simultáneas (SFS)**

Los ensayos de SFS se realizaron en Erlenmeyer de 100 ml, Como medio de fermentación

se empleó el medio con la siguiente composición (g/l): 2,5 de extracto de levadura, 2 de peptona, 2 de NH<sub>4</sub>Cl, 1 de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0,3 de MgSO<sub>4</sub> y una concentración de sustrato de 10% con una carga de enzima de 20 UPF/g de Celluclast 1.5L (65 UPF/ ml) y 20 UI/g de Novozyme 188 (790 UI β-Glucosidasa/ml). Ambas enzimas comercializadas por la firma Novo Nordisk (Bagsvaerd, Dinamarca). La hidrólisis enzimática se realizó en tampón acetato 0,05M pH 4,8, a una temperatura de 50°C durante 8 h en un agitador orbital a 150 rpm. Se inoculo el 10% (v/v) de levadura *S cerevisiae* incubándose a 35 °C a 150 rpm durante 24 horas.\

### Diseño experimental

Se utilizo un diseño compuesto central 2<sup>2</sup> rotable con puntos centrales (Montgomery, 1997) para la optimización del rendimiento de azúcar. En la Tabla V se muestra el diseño experimental. Los datos obtenidos de dos réplicas fueron analizados utilizando el programa estadístico Statgraphics 5.0.

Tabla V. **Diseño compuesto central rotable con niveles codificados y reales**

Variables codificadas		Variables reales	
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
+1	-1	230	2
-1	-1	190	2
+1	+1	230	10
-1	+1	190	10
0	0	210	6
0	0	210	6
0	- 1.414	210	0.34
0	+1.414	210	12
- 1.414	0	182	6
+1.414	0	238	6

### Métodos Analíticos

La determinación tanto en la materia prima como en el material pretratado de carbohidratos estructurales, lignina ácido insoluble y cenizas se realizó mediante los procedimientos LAP-002, LAP-003 y LAP-005 respectivamente del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) (Colorado, Estados Unidos).

### Caracterización de la fracción líquida obtenida tras el pretratamiento.

- **Determinación de los productos de degradación.** El análisis de los productos de degradación de la fracción líquida obtenida tras el Pretratamiento de los compuestos furfural , 5-hidroximetilfurfural (HMF), 4- hidroxibenzaldehído, ácido vainílico, siringaldehído, ácido cumárico y ácido ferúlico se realizó mediante

cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) en un cromatógrafo de líquidos Hewlett Packard (HP) modelo 1100 con un detector UV de fotodiodos (Diodo Array) HP 1040A. Se utilizó una columna cromatográfica Aminex HPX-87H (Sulfonated divinyl benzene styrene copolymer), resina en forma iónica de hidrógeno de 300 mm x 7,8 mm de diámetro interno, (Bio-Rad Labs, CA, USA). La temperatura de trabajo fue de 55 °C. La fase móvil fue una mezcla (v/v) de 82% ácido sulfúrico 5 mM y 18% acetonitrilo a un flujo de 0,3 ml/min.

La determinación analítica de los ácidos acético y fórmico se realizó mediante un cromatógrafo de líquidos HPLC, Waters, modelo 590, provisto de un detector de índice de refracción, Waters 410. La separación cromatográfica se realizó mediante una columna de acero inoxidable, Aminex HPX-87H (Bio-Rad Labs, CA, USA) de 300 mm x 7.6 mm de diámetro interno. La fase móvil utilizada fue ácido sulfúrico 5 mM, a un flujo de 0,6 ml/min y 65 °C de temperatura de columna.

- **Determinación de azúcares.** Los azúcares (glucosa, galactosa, manosa, arabinosa y xilosa) fueron analizados mediante un cromatógrafo de líquido HPLC, Waters, modelo 590, equipado con un detector de índice de refracción, Waters 410, una columna cromatográfica Aminex HPX87P, resina en forma iónica de plomo de 300 mm x 7,8 mm de diámetro interno, de la firma comercial Bio-Rad Labs, CA, USA. La temperatura de trabajo fue de 85 °C y como fase móvil se utilizó agua de calidad reactiva Millipore a un flujo de 0,6 ml/min.
- **Determinación de etanol.** El etanol se analizó en un cromatógrafo de gases Hewlett Packard 5890 serie II, equipado con un inyector automático Agilent serie 6890, un detector de ionización de llama (FID) y una columna Carbowax 20M (2 m x 1/8 in) a una temperatura de 85 °C. La temperatura del detector e inyector fue de 150 °C.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización y análisis de la materia prima

En la Tabla VI se presenta los análisis de la composición del sorgo forrajero. Como se puede observar es un material rico en celulosa (31.57%) y hemicelulosas (25.00%) y menor contenido de lignina (19,09 %). Del 60% de los carbohidratos totales el 35% es glucosa. Los azúcares hemicelulósicos están formados mayoritariamente por xilosa (22.3%). La composición del sorgo forrajero en sus componentes estructurales es muy similar a la composición del bagazo de la caña de azúcar cuyos valores oscilan entre 41-44% de celulosa, 25-27% hemicelulosa y 20-22% de lignina.

Tabla VI. Composición del sorgo forrajero. Datos expresados sobre peso seco.

Composición	(%)	
Masa seca	90,63	
Carbohidratos	60,08	
Hemicelulosa	25,00	
Xilosa		22,3
Arabinosa		2,3
Galactosa		0,4
Celulosa	31,57	
Lignina	19,09	
Ceniza	3,24	
Extractivos en agua	17,74	
Extractivos en alcohol	3,36	

### Balance de masa del pretratamiento de explosión por vapor

En la Fig 8. se muestra el efecto de las variables estudiadas en el rendimiento de la fracción sólida (sorgo pretratado) en dependencia de la variación de las condiciones de autohidrolisis establecidas según diseño experimental. Marcada diferencia se observa en las variables 3 (230°C, 10 min) y 8 (238°C, 6 min) donde se obtienen los rendimientos más bajos de 47.74% y 48.67% respectivamente.

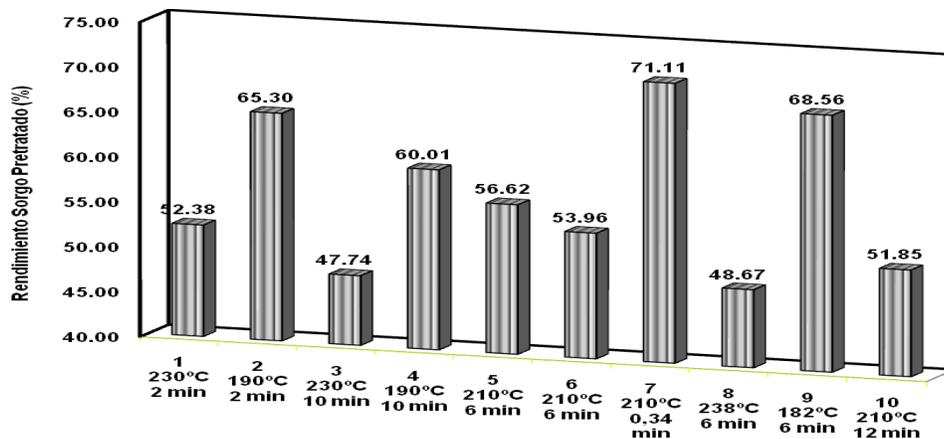


Fig 8. Efecto de las variables del proceso en el rendimiento del sorgo pretratado. Los rendimientos son expresados como (g) por 100g de peso seco de material no tratado.

Un análisis de la composición de la fracción sólida (Tabla VII, Fig 9) señala que en estas corridas la recuperación de celulosa como por ciento del componente disponible es del 84% (# 3) y 86% (# 8) en tanto el resto oscila entre 94%-96%. Similar resultado ocurre con la lignina para las mismas condiciones con recuperación en el sólido de 93% y 84% en el

mismo orden y del 96%-99% para las restantes condiciones. En el caso de las hemicelulosas los valores de rendimiento más bajos del orden del 3.7% en ambas corridas equivalente a una recuperación del 15% de la hemicelulosa potencial, ello pudiera indicar la presencia de un polímero de hemicelulosa residual. En el resto de las condiciones valore superiores hasta un 86 y 90 % son obtenidos en las condiciones 2 y 9. Los bajos rendimientos del sorgo pretratado implican una mayor solubilización de las hemicelulosas.

Tabla VII. Balance de masa del pretratamiento del sorgo forrajero. Composición de la fracción sólida. Todos los datos son rendimiento de Componentes (g) por 100 g de peso seco de material de sorgo forrajero no tratado

Condición	Variables		Composición del solidó			
	Temperatura °C	Tiempo (min)	Celulosa	Hemicel	Lignina	Sólidos Totales
Sorgo			31,57	25,00	19,09	78,9
1	230	2	29,54	6,49	18,53	70,85
2	190	2	29,56	21,43	18,27	75,83
3	230	10	26,40	3,68	17,73	71,53
4	190	10	29,29	13,53	18,87	81,04
5	210	6	29,92	7,82	18,33	80,51
6	210	6	29,47	9,86	17,79	77,12
7	210	0,34	30,20	22,77	17,75	80,60
8	238	6	27,26	3,77	16,12	73,59
9	182	6	29,45	22,41	18,72	78,67
10	210	12	30,28	7,58	18,42	74,08

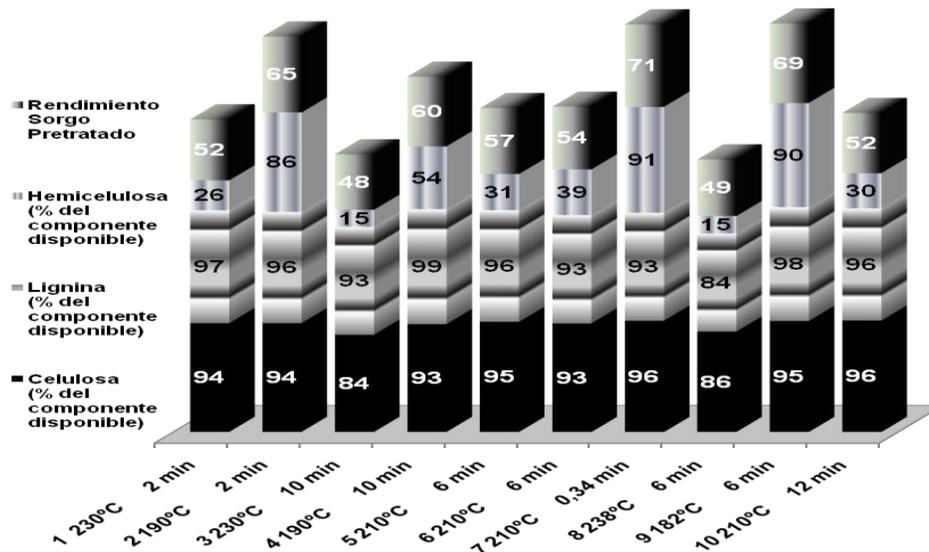


Fig 9. Composición del sorgo pretratado.

En cuanto a los compuestos de degradación en la fracción líquida (Tabla VII) se aprecia que en las corridas 3 y 8 se genera una mayor concentración de ácido acético como resultado de una mayor degradación del xilano, alto contenido de furfural por efecto de la degradación de la xilosa y mayor concentración de hidroximetilfurfural (HMF) y de su producto de degradación el ácido fórmico indicando que en estas condiciones de ensayo pudiera producirse una mayor degradación del HMF que por hidrólisis y descarboxilación – (CO<sub>2</sub>) rinde ac, formico, ac, levulinico y 2-butanona o por efecto de su deshidratación el 1,2,4 bencenotriol no cuantificados. Adicionalmente en la fracción líquida se observa un mayor contenido de los productos de degradación de la lignina (suma de componentes) constituyendo el 1 y 1.6 % de la lignina potencial.

Con respecto a la composición de la fracción líquida de los azúcares (Tabla VII) en general podemos señalar que todas las corridas se genera una mayor concentración de oligómeros de xilosa y glucosa.

Tabla VII. Balance de masa del pretratamiento del sorgo forrajero. Fracción Líquida: Ácidos Carboxílicos y Compuestos de Degradación. Todos los datos son rendimiento de Componentes (g) por 100 g de peso seco de material de sorgo forrajero no tratado

Variables	Composición									
	Ac. Carboxílicos		Compuestos de Degradación							
Condición	Temperatura	Tiempo	ac	ac	HMF	Furfural	Benzaldehido	Vainillin	Ac.	Ac

			acético	fórmico				mas syrin Aldehido	Cumarico	Ferulico
Sorgo	°C	(min)								
1	230	2	1,128	0,377	0,041	0,311	0,013	0,065	0,015	0,007
2	190	2	0,598	0,006	0,006	0,015	0,002	0,002	0,040	0,000
3	230	10	2,570	0,756	0,246	0,676	0,025	0,143	0,029	0,002
4	190	10	1,184	0,262	0,009	0,029	0,009	0,036	0,027	0,003
5	210	6	1,538	0,371	0,039	0,022	0,015	0,069	0,011	0,000
6	210	6	1,719	1,035	0,099	0,069	0,040	0,020	0,043	0,003
7	210	0,34	0,519	0,086	0,008	0,013	0,012	0,042	0,025	0,003
8	238	6	2,675	0,702	0,222	0,644	0,036	0,220	0,044	0,011
9	182	6	0,468	0,072	0,007	0,021	0,007	0,026	0,020	0,002
10	210	12	1,554	0,373	0,048	0,371	0,019	0,081	0,048	0,003

Por otra parte podemos observar en la Fig 10 que la suma de de la glucosa y su producto de degradación el Hidroximetilfurfural (HMF) y acido fórmico de la fracción liquida con la glucosa equivalente de la celulosa dan una recuperación total del 94 y 97 % en las corridas 3 y 8 . En el resto de las condiciones la recuperación es total

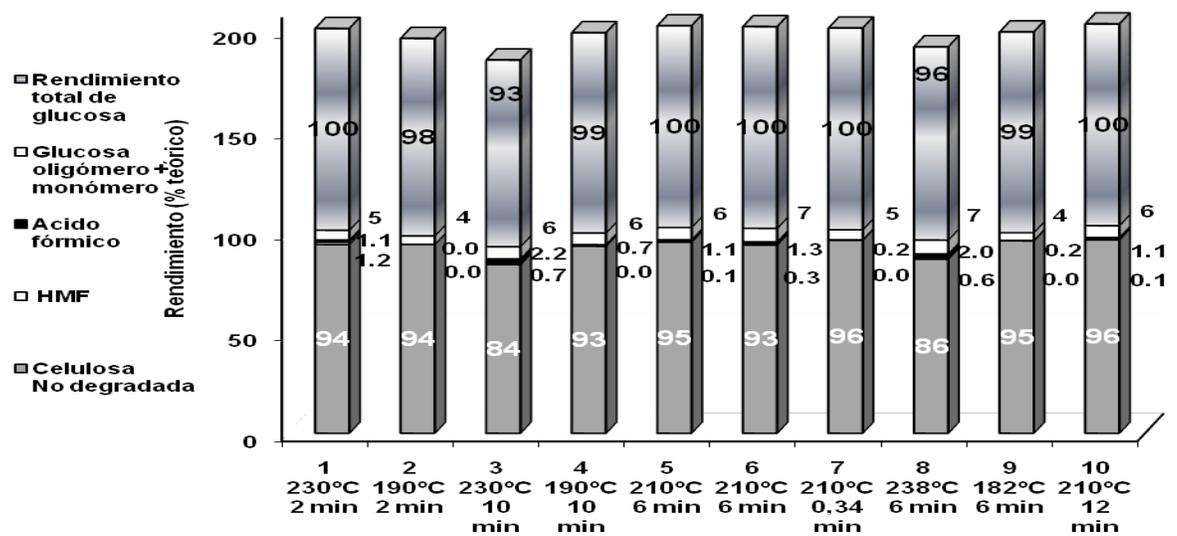


Fig 10. Rendimiento de conversión de glucosa

En la fracción liquida el recobrado de los azucares hemicelulosicos mas el furfural como producto de degradación no supera el 30% en todas las condiciones experimentales. El por ciento de recuperación de la fracción combinada sólida y liquida es fluctuante , se

recupera el 92, 95, 98 y 100% en las condiciones 4, 2, 7 y 9 respectivamente, el resto oscila entre 40 y 70% indicando una degradación significativa de sus componentes (Fig 11). La determinación de otros componentes que puedan ser originados durante el tratamiento o presentes en la estructura compleja de las hemicelulosas como las *L- arabinofuranosa*, *D- xilofuranosa*, *4-O-metilglucurónico*, *L(-)- fucosa* y la *L(+)- ramnosa* no fueron cuantificados que permitiría un balance de masa mas completo de las hemicelulosas

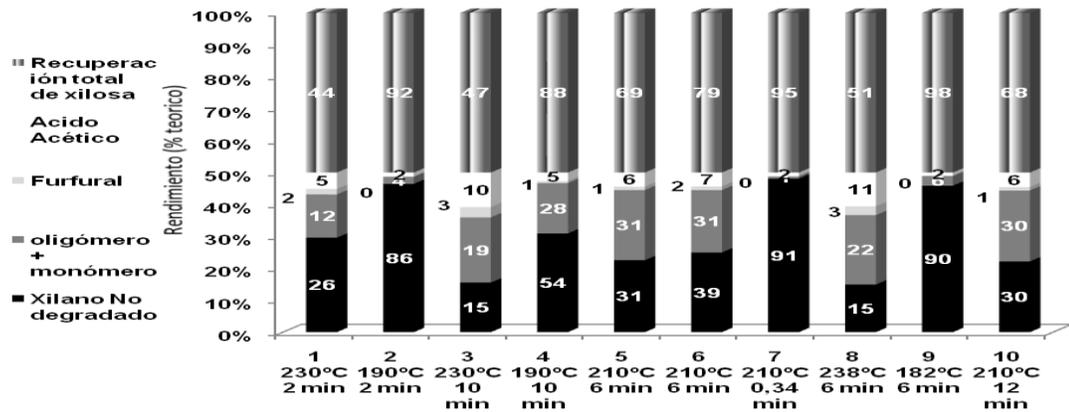


Fig 11. Rendimiento de conversión de Xilosa.

Finalmente, la recuperación total de la lignina solo llega a un 94 (#3) y 86% (#8) significando una mayor depolimerización de la misma durante el tratamiento que no son cuantificados. En el resto de las condiciones de ensayo la recuperación oscila entre el 96% y 99% (Fig 12)

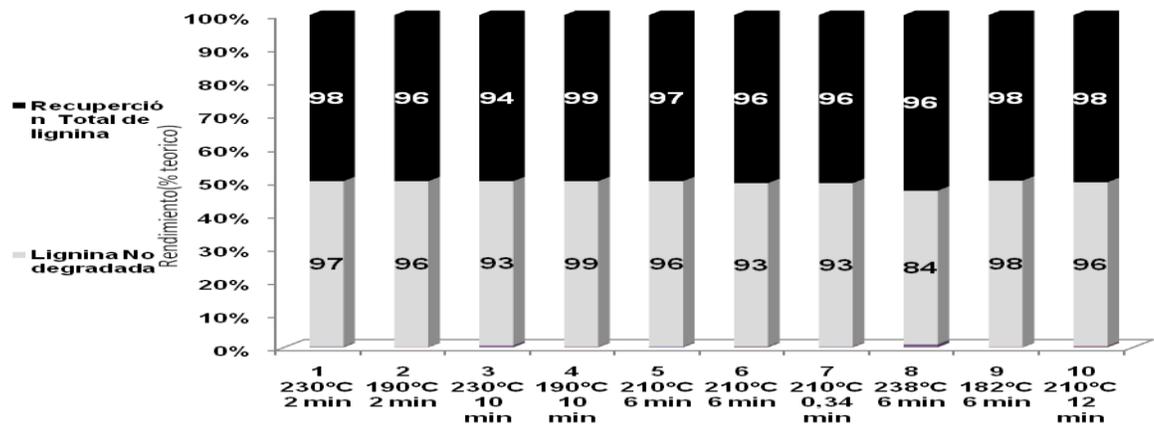


Fig 12. Rendimiento de conversión de Lignina.

### Optimización para el recobrado de azúcar

En los resultados reportados en la bibliografía habitualmente los porcentajes de los compuestos están referidos al material original seco y no al material pretratado seco. Naturalmente si se refieren al material original los porcentajes de lignina y celulosa

tenderán a ser constantes o a disminuir levemente en la medida que la severidad del pretratamiento se incrementa. En este caso lo que interesa conocer es cuál es la mejor combinación de las variables temperatura y tiempo que propicie el incremento de accesibilidad a la celulosa y facilite la hidrólisis enzimática para la obtención de alto rendimiento de azúcares fermentables para la producción de etanol celulósico. Con el fin de lograr una respuesta del proceso que tenga las características deseadas se realizó un diseño factorial 2<sup>2</sup> rotatorio con punto centrales. En la Tabla VIII se presenta las variables respuesta analizadas. Los rendimientos se expresan como componentes (g) por 100 g de peso seco de sorgo pretratado así como el de conversión de celulosa a glucosa

Tabla VIII. Optimización para el Recobrado de azúcar

Variables Condición	Temperatura °C	Tiempo (min)	Conversión Celulosa %	Conversión			Recobrado	Glucosa g/L
				Celulosa	Hemicelulosa	Lignina		
1	230	2	72,8	55,49	6,46	35,09	52,38	44,097
2	230	2	71,5	57,32	6,49	31,51	52,38	44,873
3	190	2	37,4	38,35	25,93	24,38	65,3	15,932
4	190	2	37,4	38,35	25,93	24,38	65,3	15,932
5	230	10	84,4	54,31	4,98	37,79	47,74	50,927
6	230	10	82	56,29	4,98	36,49	47,74	49,485
7	190	10	46,2	48,81	16,91	31,44	60,01	24,916
8	190	10	45,9	48,81	16,91	31,44	60,01	25,071
9	210	6	66,1	51,76	6	29,22	56,62	38,009
10	210	6	69,8	52,24	12,24	29,55	53,96	38,009
11	210	6	75,5	53,93	11,58	30,75	56,62	41,814
12	210	6	72	57,01	13,48	29,78	53,96	43,81
13	210	0,34	47	41,66	25,34	23,07	71,11	20,454
14	210	0,34	44,2	43,29	27,52	23,07	71,11	21,759
15	210	12	68,9	58,26	9,18	35,17	51,85	43,641
16	210	12	67,4	58,53	10,39	28,32	51,85	44,613
17	182	6	41,3	40,06	25,07	25,55	68,56	18,666
18	182	6	41,9	42,95	27,63	24,07	68,56	18,383
19	238	6	84,8	54,96	4,67	33,77	48,67	52,806
20	238	6	86,5	57,07	5,27	32,48	48,67	51,757

En la Tabla IX se presenta los análisis de varianza para cada una de las variables de respuesta. Todas las pruebas de hipótesis se han realizado a un nivel de confianza del 95%.

Tabla IX Análisis de Varianza para los modelos : Rendimiento Sorgo pretratado (R) , Celulosa (Cel), Hemicelulosa (Hcel), Lignina (L), Conversión de Celulosa (Ccel) y Glucosa (gluc)

Fuente	Suma de Cuadrado						gl	Valor p				
	R	Cel	Hcel	L	Ccel	gluc		R	Cel	Hcel	L	Ccel
A: Temp	710,7	507,7	949,28	173,9	4502,15	2575,8	1	0,000	0,0000	0,0000	0,0001	0,000
B: tiempo	345,363	253,91	289,93	134,1	665,40	560,23	1	0,000	0,0000	0,0001	0,0003	0,000
AA	5,00644	55,23	23,11	1,579	128,57	58,53	1	0,505	0,0043	0,1331	0,6071	0,000
AB	0,211	66,87	28,31	5,18	2,88	5,579	1	0,890	0,0022	0,0996	0,3572	0,580
BB	43,15	24,00	72,38	1,213	464,14	140,72	1	0,065	0,0403	0,0140	0,6518	0,000
Bloques	0,0	15,57	8,97	8,115	1,568	5,040	1	1,000	0,0895	0,3362	0,2537	0,680
Error total	138,5	60,12	117,0	73,96	116,90	111,38	13					
R <sup>2</sup> (ajustado para g.l.)	0.848	0.915	0.89	0.749	0.972	0.955						

- Valores p menores de 0.05 indican efectos significativos

Las ecuaciones determinadas para cada superficie de respuesta se listan en la Tabla X donde se excluyen los coeficientes significativos y se explica el % de variabilidad de las variables respuestas a un 95% de nivel de confiabilidad .

**Tabla X Ecuaciones de la superficie de repuesta codificadas**

Respuesta	Ecuación	R <sup>2</sup>
Rendimiento Sorgo pretratado	$55,29 - 6,66485 * \text{temperatura} - 4,64597 * \text{Tiempo}$	0,8881
Celulosa	$53,735 + 5,63316 * \text{temperatura} + 3,98366 * \text{Tiempo} - 2,45782 * \text{temperatura}^2 - 2,89125 * \text{temperatura} * \text{Tiempo} - 1,62032 * \text{Tiempo}^2$	0.9376
Hemicelulosa	$10,825 - 7,70262 * \text{temperatura} - 4,25683 * \text{Tiempo} + 2,81375 * \text{Tiempo}^2$	0.9202
Lignina	$29,825 + 3,2974 * \text{temperatura} + 2,89604 * \text{Tiempo}$	0,8152
Conversión Celulosa	$70,85 + 16,7745 * \text{temperatura} + 6,44882 * \text{Tiempo} - 3,75001 * \text{temperatura}^2 - 7,12502 * \text{Tiempo}^2$	0,9797
Glucosa	$40,4105 + 12,6882 * \text{temperatura} + 5,91731 * \text{Tiempo} - 2,53019 * \text{temperatura}^2 - 3,92332 * \text{Tiempo}^2$	0,9676

### Superficie de respuesta.

El objetivo del petrtamiento por vapor es solubilizar las hemicelulosas para hacer más accesible la celulosa a la hidrólisis enzimática y evitar la formación de inhibidores. La despolimerización y rotura de enlaces se le atribuye a la hidrólisis de los restos acetilos de las hemicelulosas produciendo ácido acético, que a la temperatura del proceso, cataliza la hidrólisis de la hemicelulosa (autohidrólisis). Durante el tratamiento se destruyen parcialmente los enlaces lignina-carbohidrato y como resultado, se obtiene un producto fibroso cuya celulosa es más accesible a la hidrólisis enzimática y una lignina prácticamente sin alterar. Un bajo rendimiento de la fracción sólida o material pretratado

logrado es indicativo de una mayor eliminación de las hemicelulosas. En la Fig 13 se muestra la superficie de respuesta para el rendimiento del sorgo pretratado que responde a un modelo lineal. Bajos rendimientos se obtienen a mayor temperatura y tiempo siendo el tiempo la variable de mayor peso.

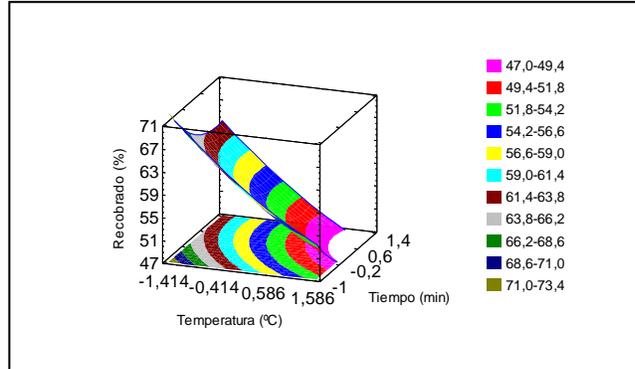


Fig 13 Superficie de respuesta para el rendimiento de sorgo pretratado

Con respecto a las variables celulosa, lignina y hemicelulosas dado su interrelación se analizan en conjunto. En la medida que la cantidad de hemicelulosas disminuye se produce un incremento de la celulosa y lignina. En la Fig 14 se ilustra las superficies de respuestas para la celulosa, lignina y hemicelulosa. Se observa para la celulosa la influencia significativa de los efectos lineales y cuadráticos de la temperatura, y tiempo de tratamiento así como por el producto de las interacciones de temperatura y tiempo. La optimización del modelo rinde un máximo bajo las condiciones siguientes Temp de 228°C y tiempo de 8 min para un rendimiento del 57,10 %. En el caso de la lignina presenta un comportamiento más plano dado a la no significación de los cuadráticos y producto de interacción. El significado físico pudiera ser a una mayor sensibilidad de la celulosa al tratamiento, ya que la lignina es, más estable. En el caso de las hemicelulosas se observa una disminución asíntótica donde el tiempo es la variable de mayor peso.

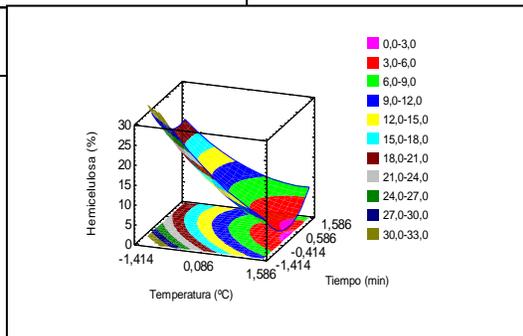
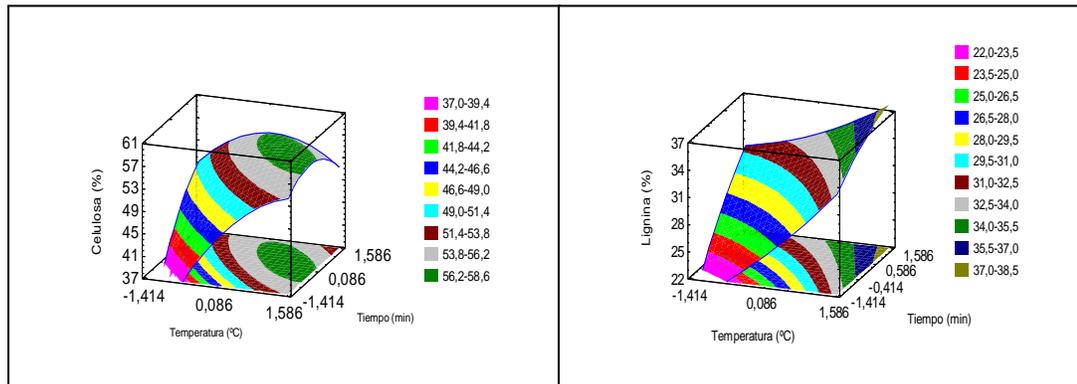


Fig 14. Superficie de respuesta para la celulosa, lignina y hemicelulosa

El efecto del pretratamiento de explosión por vapor para la accesibilidad de la celulosa a la hidrólisis enzimática fue evaluado a partir del grado de conversión y concentración de azúcar en el líquido. Para ambos modelos los términos de primer orden y los cuadráticos son significativos. Los signos negativos de los cuadráticos infieren la formación de un máximo (Fig 12). A partir de estos modelos se pudo obtener los valores óptimos de los factores que maximizan la respuesta los cuales coincidieron para ambas respuestas, Temperatura 238°C y Tiempo de 8 min obteniéndose un 89% de conversión y 55 g / L de glucosa.

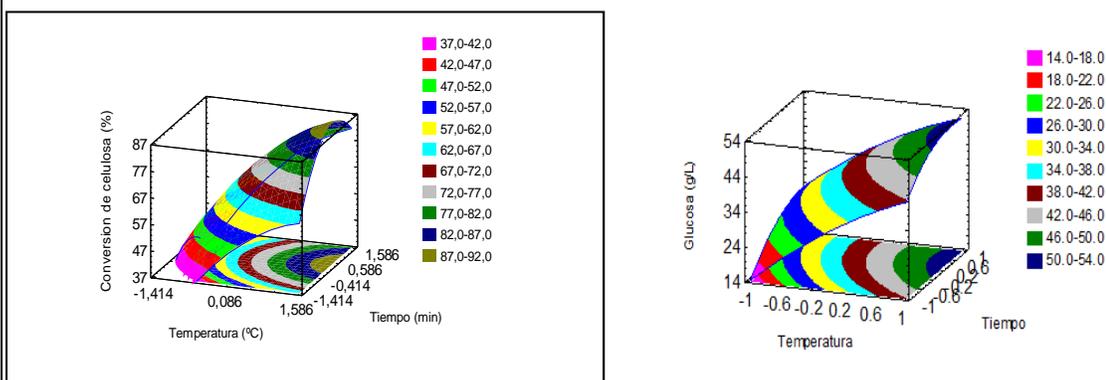


Fig 15. Superficie de respuesta para la conversión de celulosa, y rendimiento de glucosa

Con el objetivo de determinar la combinación de factores experimentales que simultáneamente optimiza varias respuestas a partir de aumentar al máximo una función de conveniencia se aplico la optimización de respuestas múltiples. Los objetivos para cada una de las repuestas fue determinado como:

Rendimiento del sorgo pretratado	Minimizar
Celulosa	Maximizar
Lignina	Maximizar
Hemicelulosa	Minimizar

Conversión de celulosa  
Rendimiento de glucosa

Maximizar  
Maximizar

La combinación de niveles de factores que aumenta al máximo la función de conveniencia hasta un valor de 0,96 fue temperatura de 238°C y tiempo de 8 minutos (Fig 16). Los valores óptimos expresados como por ciento del material petratado para cada una de las variables respuesta se presentan a continuación.

Respuesta	Optimo
Rendimiento del sorgo pretratado (%)	45,59
Celulosa (%)	56,25
Lignina (%)	36,17
Hemicelulosa (%)	3,07
Conversión de celulosa (%)	89
Rendimiento de glucosa (%)	54,71

### Sacarificación y fermentación simultánea (SFS).

En la Tabla XI se muestra el resultado del proceso de conversión de la celulosa del sorgo pretratado a etanol mediante proceso en dos etapas y en una etapa (SFS). El rendimiento del proceso de SFS se calcula dividiendo la concentración de etanol (g/l) por la glucosa potencial.

Tabla XI. Conversión de celulosa a etanol del sorgo pretratado.

Pretratamiento (230°C 10 min)	Hidrólisis Enzimática	SFS		
Sorgo pretratado (%)	10	10	15	20
glucosa potencial (g/L)	60.34	60.34	90.52	120.69
Glucosa Liberada (g/L)	50.9			
Etanol (g/L)	23.36	25.83	39.02	48.38
Rendimiento Etanol/ glucosa disponible	0.387	0.428	0.431	0.401

Este parámetro engloba, el rendimiento de la etapa de hidrólisis y el de la etapa de fermentación. A partir de este rendimiento de fermentación, es posible deducir el rendimiento de hidrólisis enzimática en el proceso de SFS. En un proceso en dos etapas un rendimiento de hidrólisis del 84.4 % equivale a 50.9 g/ l de glucosa obteniéndose 23.36 g/ l de etanol. En el proceso de SFS con el sorgo pretratado en las mismas condiciones de carga de sustrato y enzima se obtiene un rendimiento del proceso de 0.428 equivalente a una

	<p>concentración de etanol de 25.83 g/ l. Esto significa que al obtener más etanol que el esperado tiene que haber aumentado la hidrólisis enzimática. Este aumento en el rendimiento de la hidrólisis es la mayor ventaja del proceso de SFS. En la tabla se observa además que al aumenta la concentración del sorgo pretratado el rendimiento del proceso disminuye ligeramente en tanto la concentración de etanol se incrementa hasta 48.38 g/l. Si bien el resultado obtenido bajo las condiciones de ensayo es promisorio se hace necesario optimizar las condiciones del ensayo de SFS con el fin de proporcionar una concentración de sustrato adecuada, que a su vez sea compatible con un elevado rendimiento del proceso.</p> <p><b>CONCLUSIONES</b></p> <p>Mediante la metodología de superficie de respuesta fue posible determinar la combinación de factores experimentales que simultáneamente optimiza varias respuestas. La condición óptima para el rendimiento de glucosa en la fracción sólida del sorgo forrajero pretatado mediante el proceso de explosión por vapor fue temperatura de 238°C y tiempo de 8 minutos. En la fracción sólida del sorgo forrajero pretratado se recupera el 86% y 84% de la celulosa y lignina disponible en el material no tratado. El 85% de las hemicelulosas se solubilizan por efecto del tratamiento. En el proceso de hidrólisis enzimática el 89% de la celulosa se convierte en glucosa para un concentración de 55 g / L de glucosa. El rendimiento de glucosa es un parámetro crítico para optimizar pretratamientos con el objetivo de maximizar la producción de azúcares fermentables.</p> <p>Considerando la composición en azúcares fermentables, el rendimiento obtenido en el pretratamiento y el proceso de sacarificación y fermentación simultáneas se puede concluir que el sorgo forrajero es una materia prima adecuada para la producción de etanol.</p> <p><b>Recomendaciones y acciones propuestas por el Oficial de Programa – PNUD:</b></p> <hr/>
--	--

<p><b>Resultado o (Producto) Previsto en el Proyecto</b></p>	<p><b>Resultado 03.</b></p> <p><u>Act. 03. Gestión del conocimiento en función del entrenamiento y la preparación de 25 especialistas en los avances tecnológicos para el desarrollo de energías renovables a partir de bioetanol.</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estado Actual de la Técnica sobre producción de etanol a partir de residuos lignocelulósicos.</li> </ul>
--	--

Para realizar este estudio analizaremos información publicada en documentos de patentes, artículos científicos, dictámenes de expertos, informes de autoridades nacionales, informes de organizaciones no gubernamentales, información de empresas productoras y comercializadoras, y cualquier otra fuente confiable de información que contribuya a establecer, lo más real posible, el estado actual de la técnica relacionada con el tema en análisis.

Los biocombustibles son aquellos combustibles producidos a partir de biomasa y que son considerados, por tanto, una energía renovable. Se pueden presentar tanto en forma sólida (residuos vegetales, fracción biodegradable de los residuos urbanos o industriales) como líquida (bioalcoholes, biodiésel) y gaseosa (biogás, hidrógeno).

El alcohol etílico o etanol es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales. Estos azúcares están combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa. Actualmente, el bioetanol es el biocombustible con mayor producción mundial. Para su fabricación se pueden utilizar una gran cantidad de materias primas. El mayor productor mundial de etanol son los Estados Unidos con una producción anual aproximada de 18 Billones de litros, esta producción proviene principalmente del almidón de maíz, y muy cercano a él está Brasil con una producción anual de 17 Billones de litros principalmente a partir de caña de azúcar. También se utiliza remolacha, cereal o residuos forestales, etc. En la figura No. 1 se pueden observar una comparación en cuanto a rendimiento de diferentes cultivos energéticos. [WorldWatch Institute, 2006]

### **Problemática**

La subida de precio de los alimentos y los últimos informes negativos sobre estos BIOcombustibles han generado el rechazo y la desconfianza de la sociedad. La Agencia para los Combustibles Renovables de Reino Unido, llamado Informe Gallagher, recomienda frenar los objetivos de estos carburantes verdes para 2020 hasta que se pueda asegurar su sostenibilidad. Estos han pasado en pocos meses de ser parte de la solución para el cambio climático a convertirse en el foco de todas las críticas. Sin embargo, no todos los biocombustibles tienen la misma responsabilidad en la crisis alimentaria global. [Agencia para combustibles renovables del Reino Unido, Gallagher report, jul 2008]

Un reciente estudio secreto del Banco Mundial, publicado por "The Guardian", aseguraba que el impacto de estos carburantes puede suponer el 75% del aumento de precio del maíz y el trigo. Pero dicho informe excluía de esa cifra al sustituto vegetal de la gasolina producido a partir de caña de azúcar. De hecho, este producto es la única materia prima agrícola que no ha aumentado de precio desde 2006, mientras el aumento medio del resto

de alimentos ha sido del 83% en el mismo periodo. [WorldWatch Institute, 2008]

El ciclo de vida del bioetanol de caña de azúcar emite cerca de un 85% menos de CO<sub>2</sub> que las gasolinas procedentes del petróleo, según datos extraídos de informes del “Worldwatch Institute” y de la Agencia Internacional de la Energía. El bioetanol producido a partir de cereales en Europa o Estados Unidos genera un 30% menos de carbono que la gasolina y el producido a partir de remolacha en la Unión Europea tiene un 45% de reducción.

Los materiales lignocelulósicos son los que ofrecen un mayor potencial para la producción de bioetanol. Se generan como residuos en los procesos productivos de los sectores agrícola, forestal e industrial. Muchos de estos residuos no sólo tienen valor económico en el contexto donde se generan sino que pueden ser causa de problemas ambientales durante su eliminación.

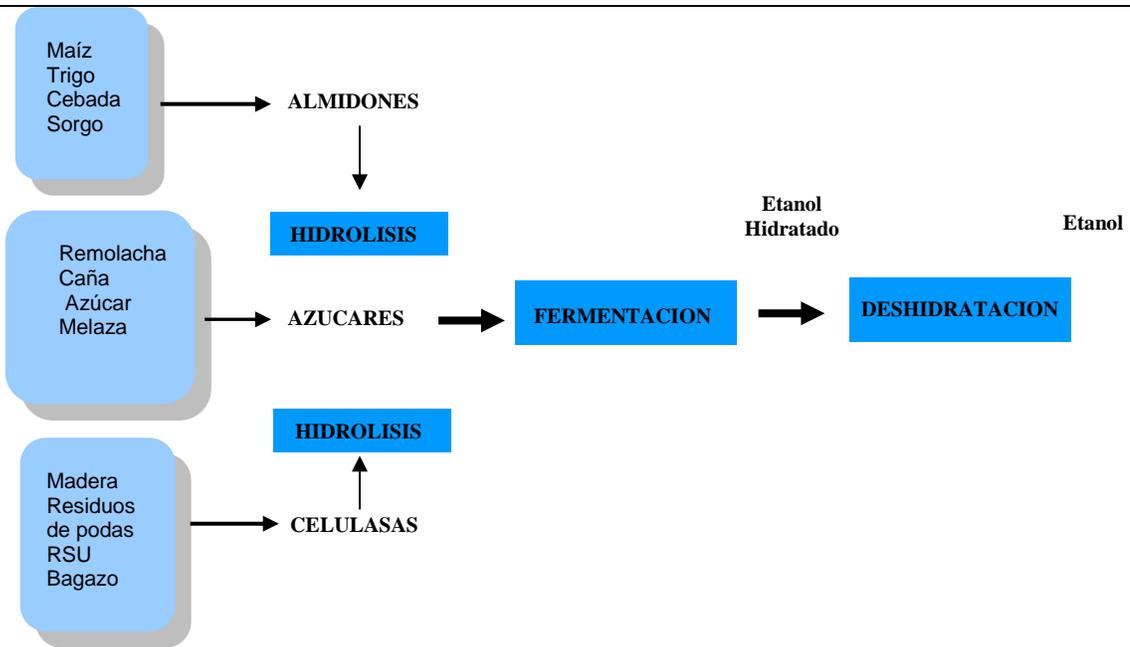
Sin embargo, el bioetanol producido a través de residuos lignocelulósicos tiene inconvenientes reportados por varios autores, los más frecuentes son:

- ◆ El pretratamiento utilizado tradicionalmente para eliminar la lignina es muy costoso.
- ◆ La producción de enzimas capaces de hidrolizar la celulosa/hemicelulosa ocurre en reactores microbiológicos muy costosos.
- ◆ El costo de inversión para una planta de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña es 50% mayor que para una planta similar a partir de melazas.
- ◆ A pesar de que la melaza como materia prima cuesta 4 veces más que el bagazo de caña, el costo unitario por litro es 30% más caro para la producción a partir del bagazo que a partir de la melaza.

En estos momentos Brasil está implementando una nueva tecnología, llamada Hidrólisis Rápida la cual se basa en el máximo aprovechamiento del Bagazo de caña de azúcar la cual permitirá aumentar en un 30% la producción de etanol sin sembrar más caña.

#### **Proceso**

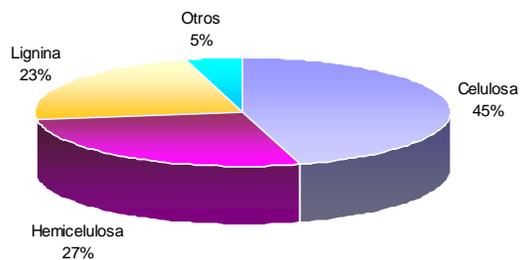
En la siguiente figura se puede ver, de forma esquemática, el proceso completo de obtención del alcohol, a partir de las principales materias primas que se utilizan para su producción.



**Figura No.16. Proceso de Producción de Bioetanol.**

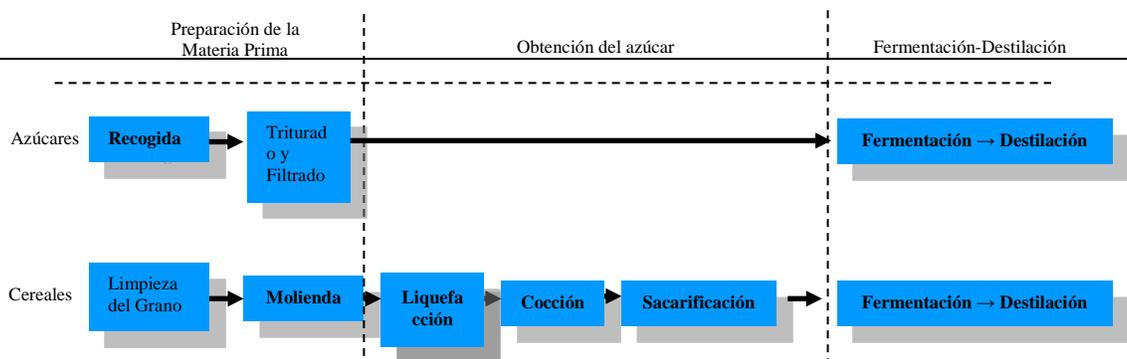
Los residuos de biomasa contienen mezclas complejas de carbohidratos, llamados celulosa, hemicelulosa y lignina. Para obtener los azúcares de la biomasa, esta es tratada con ácidos o enzimas que facilitan su obtención. La celulosa y hemicelulosa son hidrolizadas por enzimas o diluidas por ácidos para obtener sacarosa, que es entonces fermentada. Tres son los principales métodos convencionales para extraer estos azúcares: la hidrólisis con ácidos concentrados, la hidrólisis con ácidos diluidos y la hidrólisis enzimática.

A continuación se muestra el contenido de azúcares en los residuos lignocelulósicos, notándose que la celulosa y la hemicelulosa constituyen alrededor del 80% del contenido total.



**Figura No.17. Composición de los residuos lignocelulósicos.**

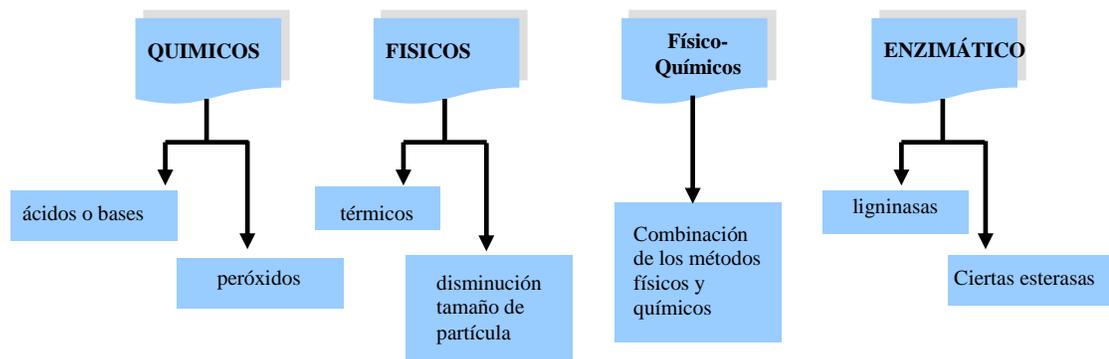
En la figura No.18 se pueden ver las diferentes formas de procesar las materias primas, en función de su origen, para la obtención de sus azúcares.



**Figura No. 18. Diferenciación de procesos de Producción de Bioetanol.**

**Pre-tratamiento**

El pre-tratamiento en este proceso juega un rol muy importante ya que a través del mismo se elimina la lignina, que es la primera capa de protección vegetal para poder acceder a la celulosa interior del material lignocelulósico. Están reportados diferentes tipos de pre-tratamientos, los cuales son representados en la siguiente figura:



**Figura No.19. Diferentes tipos de pre-tratamientos.**

**Hidrólisis**

Las celulosas no pueden ser fermentadas directamente, es necesario convertirla en azúcares más sencillos para su conversión en alcohol. La hidrólisis es un proceso químico que divide la molécula de celulosa por la acción de la molécula de agua. Las complejas

estructuras de la celulosa (celulosa, hemicelulosa y lignina) son divididas en diferentes procesos para conseguir una solución azucarada, y eliminar productos de descomposición de los azúcares que pueden inhibirlo, al menos, dificultar el proceso de fermentación. Principalmente se realizan procesos de hidrólisis de ácidos concentrados y bajas temperaturas, de ácidos diluidos y altas temperaturas y enzimáticos.

#### ***Hidrólisis con ácidos concentrados.***

En este proceso se añade entre 70-77% de ácido sulfúrico a la biomasa, que ha sido secada previamente hasta obtener una humedad menor del 10%. La proporción de ácido es de 1:25 por cada parte de biomasa y se mantiene a una temperatura controlada de 50°C. Entonces se añade agua, para diluir el ácido a un 20-30% de la mezcla, aumentando su temperatura hasta los 100°C. El gel producido en este proceso es prensado para obtener la mezcla de ácido y azúcar, que finalmente son separados. Este es un proceso del que se obtiene rendimientos muy elevados pero a un costo igualmente muy elevado, por lo que industrialmente no se realiza.

#### ***Hidrólisis con ácidos diluidos.***

Es uno de los procesos de hidrólisis más antiguos, simples y eficientes para la producción del alcohol. El primer paso es mezclar una proporción de 0,7% de ácido sulfúrico con la hemicelulosa presente en la biomasa, para que se hidrolice a 190°C. La segunda parte consiste en optimizar el rendimiento de la reacción con la parte de la celulosa más resistente, para ello se usa un 0,4% de ácido sulfúrico a 215°C. Finalmente los líquidos hidrolizados son neutralizados y recuperados, normalmente mediante percolación.

#### ***Hidrólisis enzimática.***

Consiste en “romper” (hidrolizar) la celulosa por la adición de determinadas enzimas. La celulosa es degradada por las celulasas a azúcares, que pueden ser fermentados por levaduras o bacterias para producir etanol. En síntesis, el proceso consiste en descomponer la celulosa y la hemicelulosa del residuo en azúcares sencillos y transformarlos en etanol por fermentación. En primer lugar se lleva a cabo un pretratamiento del residuo cuyo objetivo es alcanzar los mejores resultados en las etapas siguientes (hidrólisis y fermentación). Desde el punto de vista económico, esta etapa es crítica, puesto que gran parte del coste total del proceso estaría en esta primera etapa. Como resultado del pretratamiento se obtiene una disolución de azúcares provenientes de la ruptura de la hemicelulosa y un residuo sólido (constituido principalmente por la celulosa del residuo original).

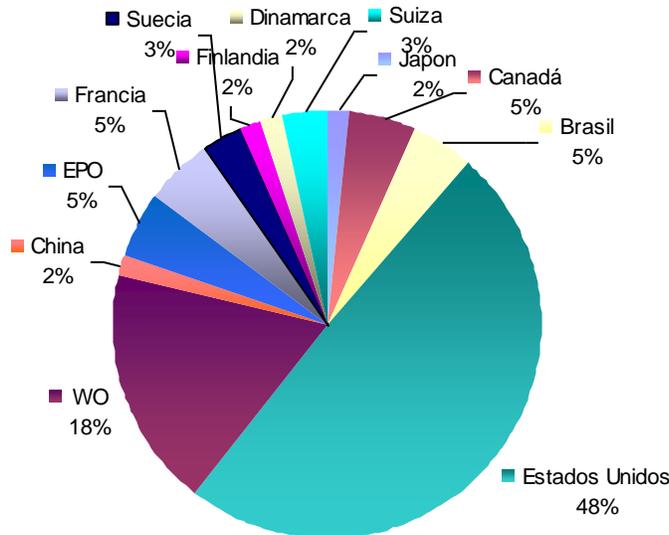
La hidrólisis enzimática presenta ventajas frente a la hidrólisis química, como menores

costos de equipamiento (debido a que se realiza a presión atmosférica y a temperatura próxima a la ambiental), mayores rendimientos y no necesita utilizar agentes químicos. [Universidad Rey Juan Carlos ,2006]

**Análisis de Información.**

**Patentes.**

Se recuperaron 59 familias de patentes relacionadas con la producción de etanol a partir de los residuos lignocelulósicos. En la el figura No. 20 se muestra la distribución de las patentes por países de origen.



**Figura No.20. Distribución por países de origen de las patentes publicadas**

Nótese como la generación de patentes está centralizada en los países desarrollados siendo Estados Unidos quien ha generado el 48% de las mismas, además se observa una tendencia a utilizar la vía PCT para registrar las invenciones. El contenido de los documentos abarca muchos aspectos relacionados con la producción de etanol a partir de los residuos lignocelulósicos, entre ellos se destacan tipos de hidrólisis, tipos de enzimas, tipos de pre- tratamientos, especies de microorganismo, y tipos de residuos lignocelulósicos. A continuación se relacionan los tipos de microorganismos reportados en los documentos de patentes y los tipos de materiales lignocelulósicos.

**Microorganismos**

- *Sacharomyces cerevisiae*.
- *Pichia stipitis* WPW9 ATCC PTA-3717

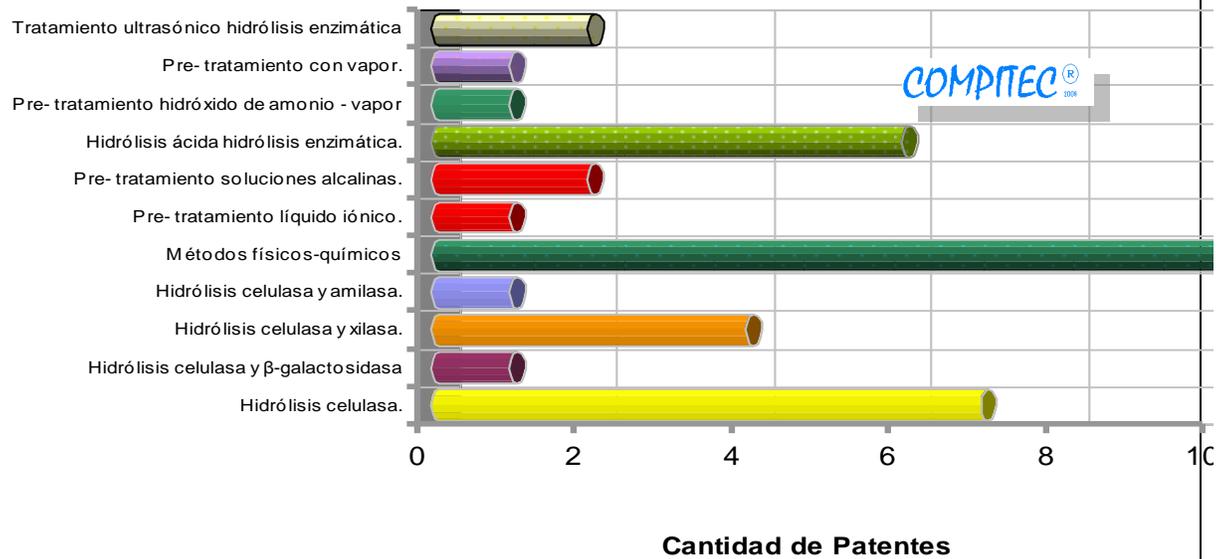
- Klugveromyces marxianus
- Klugveromyces genus
- Bacterias etalonogénicas.
- Bacterias anaerobias estrictas termófilas Thermoanaerobacter mathanii
- Clostridium carboxidivorans
- Thermoanaerobacter saccharolyticum.

**Material Lignocelulósico.**

- Residuos de madera, residuos de cosechas, bagazo de caña, hierbas, árboles gomíferos, madera de haya, roble, álamo, eucalipto, pino, abeto, papel reciclado, pulpa de papel, forraje animal, pajas y hongos.

**Tabla No.XI. Temas abordados por las patentes.**

Cantidad de Patentes	Tema
7	Hidrólisis enzimática utilizando celulasa.
1	Hidrólisis enzimática utilizando celulasa y $\beta$ -galactosidasa en buffer citrato.
4	Hidrólisis enzimática utilizando celulasa y xilasa.
1	Hidrólisis enzimática utilizando celulasa y amilasa.
10	Digestión utilizando métodos físicos-químicos con empleo de solventes orgánicos.
1	Pre- tratamiento con líquido iónico.
2	Pre- tratamiento con soluciones alcalinas.
6	Hidrólisis ácida utilizando ácido sulfúrico combinado con hidrólisis enzimática.
1	Pre- tratamiento con hidróxido de amonio concentrado más vapor
1	Pre- tratamiento con vapor.
2	Tratamiento ultrasónico combinado con hidrólisis enzimática.



**Figura No. 21. Distribución por Temas en los documentos de patentes publicadas.**

Utilizando la información brindada por los documentos de patentes entre el origen y el destino de las tecnologías realizamos un gráfico, figura No. 8, donde se relaciona el flujo de publicación y generación. Las oficinas de origen se representan con un círculo rojo y las de destino se representan con un cuadrado azul. Se observa como Estados Unidos, Brasil y Suecia son los grandes emisores de solicitudes fuera de su territorio. El grosor asociado a algunas flechas indica el número de solicitudes en esa dirección, con lo que pudiéramos identificar la intensidad de internacionalización de la innovación patentada en este sector por estos países y con ello su interés comercial. Coinciden Brasil y Estados Unidos como los países mayores productores de etanol.

En el proceso de recuperación de información, quedó evidenciado que la mayor cantidad de información disponible se encuentra en los sitios de información científico-técnica y comercial de los países con mayor volumen de exportación de bioetanol, tomaremos a Brasil como ejemplo ya que se mantienen como el mayor exportador a nivel mundial de etanol a partir de caña de azúcar y a los Estados Unidos como el mayor productor de etanol a partir de maíz.

**Brasil.**

En Brasil el 45% de los carburantes que se usan para el transporte provienen de la caña de azúcar. El 1% de la tierra cultivable produce casi el 50% del combustible que se consume en el país", asegura Marcos S. Jank, presidente de la Asociación de la Industria Brasileña de la Caña de Azúcar (UNICA). La cosecha no cesa durante los 12 meses del año ya que existen

variedades de caña adaptadas a las condiciones climáticas de las épocas secas y de lluvias.

En estos momentos se está implementando en los centrales y refinerías de azúcar y alcohol de Brasil una nueva tecnología desarrollada en el Centro de Tecnología (CTC) de la Cooperativa de Productores de Caña, Azúcar y Alcohol del Estado de São Paulo (Copersucar) de Piracicaba y del grupo empresarial DEDINI, uno de los mayores fabricantes de máquinas e implementos para el sector de azúcar y alcohol. Esta tecnología es capaz de hacer crecer la producción de alcohol alrededor de un 30% sin necesidad de plantar ni una caña más. Esto es resultado del aprovechamiento total de la biomasa de la caña, más precisamente del bagazo. Estos investigadores consiguieron comprobar que es posible fabricar alcohol etílico (etanol) carburante partiendo del bagazo de la caña, mediante un proceso denominado Dedini Hidrólisis Rápida (DHR). El proceso DHR podrá suministrar alcohol a costos competitivos, utilizando una materia prima ya existente y liberando más caldo de caña para la producción de azúcar.

La tecnología está formada por un reactor, que opera a una presión de entre 25 y 27 kg/cm<sup>2</sup> y a una temperatura próxima a los 190 grados, es continuamente alimentada con bagazo y con un hidrosolvente orgánico (etanol, preferentemente, pese a que otros, como la acetona, el ácido acético y el metanol pueden también emplearse) mezclado con ácido sulfúrico. Esa mezcla hará la transformación de la celulosa presente en el bagazo en glucosa. En seguida, el jarabe de glucosa es purificado, para retirar las sustancias indeseables, principalmente el ácido sulfúrico, y recibe la adición de nutrientes, resultando en un mosto fermentable que se mezclará al caldo y a la melaza utilizada normalmente para la fabricación del alcohol. El resto del proceso -fermentación y destilación- es realizado en las instalaciones ya existentes.

La gran ventaja del proceso DHR es su rapidez, según criterio del ingeniero químico Antônio Hilst, consultor de Dedini que inventó la técnica, la cual queda protegida en una patente. La transformación se produce en apenas diez minutos, en cuanto que los procesos clásicos de hidrólisis que recurren a ácidos concentrados o diluidos demoran por lo menos cinco horas. El bagazo permanece dentro del reactor el tiempo necesario para que se produzca la disolución de la lignina y la hidrólisis de la celulosa llegando a un rendimiento de alrededor de un 60% sobre el azúcar contenido en el bagazo lo cual garantizar una fermentación y una destilación completamente viables desde el punto de vista económico.

La glucosa es tan solo una de las sustancias resultantes del beneficiado. Al margen de ésta, se extraen del bagazo otros subproductos, como el metanol, el ácido acético, la lignina y el furfural, cuyo uso comercial podrá elevar aún más la rentabilidad del proceso.

**Estados Unidos**

Entre los artículos encontrados comentaremos el del científico Jay J. Cheng el cual es profesor de la Universidad NC State, en Carolina del Norte, y entre sus trabajos está contemplado el estudio energético del 'switch grass', un tipo de pasto que habitualmente está destinado a la alimentación del ganado y que hoy es considerado de menor impacto ambiental que la producción de maíz. Cheng manifiesta que para explotar el 'switch grass' no es necesario tener una tierra fértil; porque crece en cualquier superficie. Un informe científico publicado por la revista 'Proceedings of the National Academy of Sciences' muestra que el 'switch grass' produce más de energía que la que se requiere para procesarlo en la obtención de etanol.

Una de las ventajas de este pasto es que absorbe del dióxido de carbono de la atmósfera durante su crecimiento. Aunque el desarrollo de esta fuente está menos avanzada que el de los cereales, es una energía viable. Por eso, hay grupos de investigación en el mundo que alientan los estudios del 'switch grass' y de los materiales lignocelulósicos: residuos agrícolas, agroindustriales y forestales. Por otro lado, Cheng colabora con la Universidad Pontificia Católica de Ecuador en un proyecto dirigido por el científico Javier Carvajal, jefe del área de levaduras del Laboratorio de Bioquímica dedicado a impulsar los estudios de materiales lignocelulósicos. Su equipo está produciendo, a escala de laboratorio, etanol a partir de papel reciclado. Decidieron utilizar papel, porque en la Universidad ya existe un proyecto llamado de Reciclaje pro Ambiente para recoger el papel y el cartón generado en las oficinas. Señala que el rendimiento energético de la producción de etanol a partir de maíz, en EE.UU. es, en el mejor de los casos, del 25%. Eso significa que se obtiene menos energía de la invertida. En cambio, con el etanol lignocelulósico, el rendimiento es del 45%, es decir, se obtiene más energía de la que se invierte. Javier Carvajal dice que en el futuro no solo se buscará obtener etanol del papel, sino de desechos vegetales que hay en abundancia: desechos de plátano, palmito y de caña de azúcar. Incluso de los desechos urbanos ya clasificados. El etanol de maíz contabiliza pequeñas emisiones de gases efecto invernadero, lo que no ocurre con el obtenido a partir del etanol de la celulosa.

El científico Cheng señala que el Congreso estadounidense aprobó una ley para que la producción de etanol lignocelulósico llegue a 1000 millones de galones hasta el 2020. Dice que hay un interés creciente por estudiarlo más. **[Proceedings of National Academy of Science ,2008]**

Por otro lado, la compañía española Abengoa Bioenergía ha logrado producir etanol a partir de biomasa en su planta piloto situada en el estado de Nebraska (Estados Unidos), donde ha invertido más de 35 millones de dólares. La planta se dedicará a la investigación y desarrollo de los procesos de producción de biocombustible a partir de biomasa lignocelulósica, la materia prima orgánica más abundante en la tierra y forma parte del acuerdo firmado con el DOE (Ministerio de Energía estadounidense) en 2003. Ubicada en las instalaciones de producción de etanol de Abengoa Bioenergía en York (Nebraska), la

planta piloto de la empresa española investigará y probará una tecnología patentada de conversión de biomasa a etanol para su uso a nivel comercial, no se ofrecen detalles sobre la tecnología referida, aunque por nuestra investigación Abego no presenta patentes sobre el tema. Las innovaciones tecnológicas obtenidas se pondrán en práctica en la biorrefinería de biomasa que Abengoa Bioenergía está construyendo en Kansas y que será pionera en su género.

La planta piloto inaugurada por Abengoa Bioenergía en Estados Unidos es única en su género; servirá de plataforma para la prueba de nuevos equipos, sistemas y catalizadores necesarios para descomponer varios compuestos orgánicos y procesarlos, como materias herbáceas y leñosas, optimizando en varios procesos de obtención de etanol. Será también un núcleo de investigación y de capacitación para otros equipos dentro de Abengoa Bioenergía mientras la empresa evalúa y prueba productos adicionales, equipos y otros procesos en cuyo diseño se está trabajando actualmente para mejorar los procesos orgánicos de biomasa.

Además, durante el transcurso del acto, Javier Salgado ha anunciado que ha firmado un contrato de colaboración con el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) por importe de 38 millones de dólares para el diseño y desarrollo de la primera planta mundial a escala comercial de producción de etanol a partir de biomasa en Hugoton, Kansas.

Esta planta de biomasa procesará 700 toneladas métricas de biomasa al día para producir anualmente 44 millones de litros de etanol, además de otras formas de energía renovable en forma de electricidad y vapor. La planta de biomasa tendrá anexa una planta de etanol convencional a partir de cereal de 88 millones de galones (más de 300 millones de litros), que permitirá a ambas disfrutar de las sinergias de una capacidad combinada de 100 millones de galones (más de 400 millones de litros). La inversión conjunta superará los 300 millones de dólares. Abengoa Bioenergía presente en Estados Unidos, Brasil y Europa, invertirá más de 500 millones de dólares en los próximos cinco años en su programa tecnológico de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica. **[Bolsa general española ,2007]**

Fueron entrenados en las facilidades del ICIDCA estudiantes de pre y post-graduación de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Coahuila: 6 estudiantes de pre-grado hicieron su Tesis de Diploma en la temática de evaluación de sustratos alternativos para la producción de alcohol de 2<sup>da</sup> generación. 1 estudiante de post-graduación realizó la Tesis de Maestría en Ingeniería Química también sobre la misma temática.

Por parte del ICIDCA y la Universidad de Lorena fueron involucrados en las acciones previstas sobre la caracterización de biomasa de sorgo, nopal y residuos lignocelulósicos de la producción de VIMANG® unos 10 especialistas incluyendo técnicos especializados y tecnólogos de destilerías de alcohol cubanas a ser instruidos ante las nuevas tecnologías a implementar.

	<b>Recomendaciones y acciones propuestas por el Oficial de Programa – PNUD:</b> <hr/> <hr/>

**4. Información financiera preliminar**

Fuente de Fondos	FFPG
<b>Presupuesto Total</b>	22 000.00 USD
<b>Presupuesto (2015)</b>	15 382.36 USD
<b>Ejecución (2015)</b>	9 659.64 USD (62.8 %)
<b>Ejecución total</b>	16 277.28 USD
<b>Falta por ejecutar</b>	5 722.72 USD

**5. Oportunidades para difundir información**

**Actividades de divulgación de resultados:**

Publicación relacionada con una búsqueda bibliográfica relacionada con los criterios para la selección adecuada de sustratos lignocelulósicos y las etapas de pretratamiento e hidrólisis desde un enfoque económico y tecnológicamente viable a fin de obtener los sustratos necesarios para el proceso de fermentación. Se analizaron las potencialidades de varios métodos de tratamiento físico-químicos, hidrotérmicos y biológicos para la producción de bioetanol.

Indicador:

Carrillo, D.; Zumalacárregi, L.; Sánchez, O.; Michelena, G.; Yznaga, H.; Martínez, J.L. y Noé, C. Pretreatment employed in lignocellulosic materials for bioethanol production: an overview Revista ICIDCA Sobre los derivados de la caña de azúcar (2014). Vol. 48 (1): 71-79.

Danay Carrillo Nieves; José Luis Martínez Hernández; Héctor A. Ruiz; Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas; Georgina Michelena Alvarez; Cristóbal N. Aguilar; Anna Ilyina, Enzymatic hydrolysis of chemically pretreated mango stem bark residues at high solid loading Crops and Products (2015)

Algunos resultados obtenidos durante el año 2014 se han dado a conocer dentro del Boletín de Azúcar y Derivados y Boletín de Novedades, circulados internamente en formato digital por el Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar.

El estudio bibliográfico realizado sobre las perspectivas de producción de etanol a partir de sorgo como sustrato alternativo, fue divulgado en algunas Unidades Presupuestadas de Base (UEB) de Derivados en el país como beneficiarios, bajo la forma de talleres y asesorías técnicas. Se enfatizó en aquellas destilerías de alcohol donde existen las capacidades instaladas para el procesamiento de jugos de caña mezclados.

#### 6. Lecciones aprendidas

- Deben ser previstos los factores de riesgo que puedan obstaculizar el desempeño del Proyecto y disponer de estrategias alternativas de fácil alcance para los participantes comprometidos. Ej. Disponibilidad para destinar los recursos y facilidades por parte de las entidades participantes en caso de ocurrir atrasos en otorgamiento de fondos previstos y de esta forma no detener la ejecución de acciones.
- Debe establecerse una estrecha coordinación de las tareas comprometidas con el PNUD con la Entidad Nacional de Ejecución (ICIDCA) y organismos superiores al que se adscribe (Grupo Empresarial AZCUBA). Esto garantizara una correcta disponibilidad de recursos logísticos como transportación, dietas, etc., así como la redistribución de recursos ante situaciones de riesgo.
- Los resultados obtenidos deben ser divulgados de forma sistemática no solo con la comunidad científica a través de artículos técnicos en revistas especializadas, sino también a beneficiarios de los resultados (productores, empresas locales, etc.), para su correcta implementación.

#### 7. Líneas de trabajo para el mejoramiento del desempeño

- Explorar y poner en acción estrategias alternativas para una ejecución exitosa dentro del cronograma establecido como medios de comunicación más versátiles y económicos, protocolos de investigación con equipamientos y material gastable de fácil adquisición.
- Información parcial del avance en la ejecución del Proyecto ante directivos de la Entidad Nacional Ejecutora y Organismo Superior (Grupo Empresarial AZCUBA).

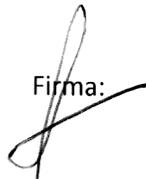
#### Preparado por

Nombre: Ing. Gustavo Saura Laria

Cargo: Jefe de Proyecto

Organización: Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)

Firma:



Fecha: 13/02/2016