



# Sacarificación de los residuos agroindustriales por hidrólisis para la generación de productos de valor agregado, el caso del ácido láctico

## Acerca de los autores...

<sup>1</sup> Maestrante de la División de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

<sup>2</sup> Docente de la División de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Karina Bautista Rangel<sup>1</sup>, Mayola García Rivero<sup>2</sup>, Martín Cruz Díaz<sup>1</sup> y María Aurora Martínez Trujillo<sup>2</sup>

## Resumen

Los residuos agroindustriales son biomasa generada a partir de prácticas forestales y agrícolas, y debido a las características de su compleja estructura química, pueden ser utilizados para desarrollar numerosos bioprocesos dirigidos a la obtención de compuestos de valor agregado. Sin embargo, el aprovechamiento de estos residuos tiene como principal limitante la baja digestibilidad de los polímeros que conforman su estructura. Debido a lo anterior, para poder hacer de los polímeros una adecuada fuente de azúcares reductores, es necesario someterlos a un proceso de hidrólisis. Ésta se puede realizar mediante el empleo de cocteles enzimáticos generados a partir de la fermentación en estado sólido. Éstos contienen una diversidad de enzimas hidrolíticas y oxidativas que hidrolizan los polímeros de los residuos lignocelulósicos sus azúcares constituyentes, con lo anterior es posible evitar el uso de sustancias químicas. Uno de los residuos utilizados para la sacarificación puede ser la cáscara de plátano, que se genera en grandes volúmenes por ser México uno de los principales productores de esta fruta. Dicha cáscara es una rica fuente de carbohidratos, por lo que su hidrólisis puede generar azúcares que signifiquen la base para la obtención de productos de valor agregado, como el ácido láctico. El presente trabajo muestra una revisión general de las características que deben tener los residuos lignocelulósicos para ser utilizados en los procesos de sacarificación por acción de cocteles enzimáticos, así como el uso que se puede dar a los azúcares que se obtienen luego de la sacarificación, enfocándose en la importancia de utilizar los hidrolizados de la cáscara de plátano para la producción de ácido láctico.

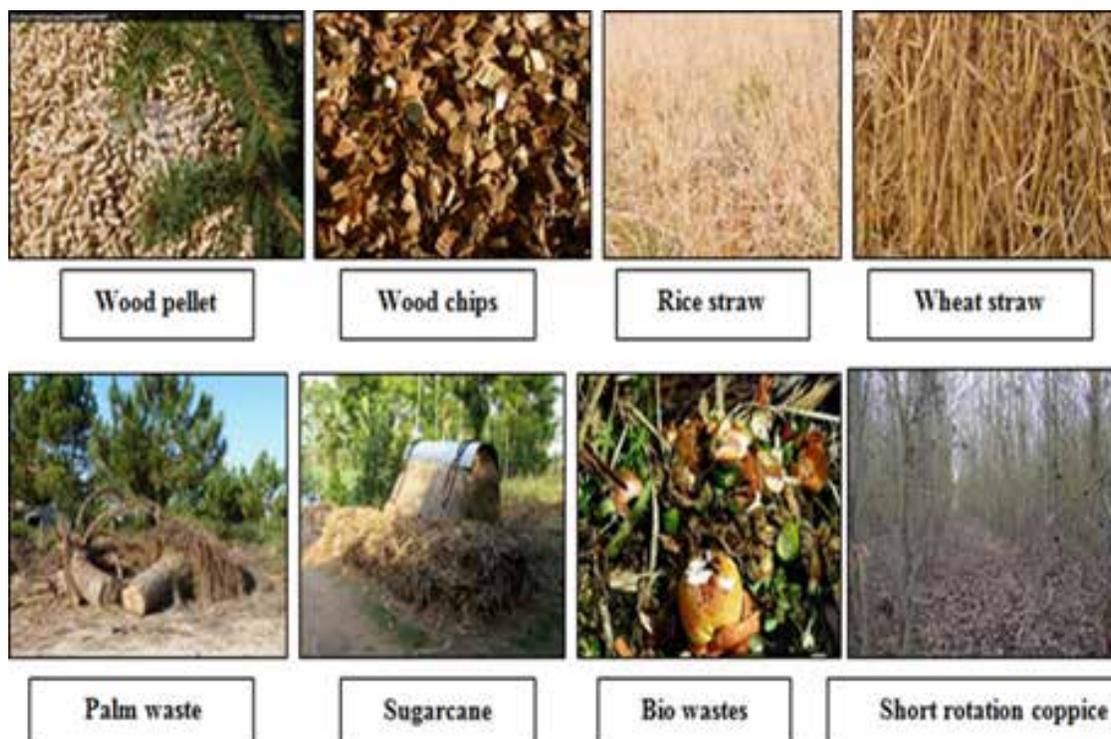
## Abstract

*Agroindustrial waste is biomass generated from forestry and agricultural practices, and due to the characteristics of its complex chemical structure can be used to develop numerous bioprocesses aimed at obtaining value-added compounds. However, the use of these residues has as its main limit the low digestibility of the polymers that make up its structure. Due to the above, in order to make the polymers an adequate source of reducing sugars, it is necessary to subject them to a hydrolysis process. This can be done through the use of enzymatic cocktails generated from solid-state fermentation. These contain a variety of hydrolytic and oxidative enzymes that hydrolyze the polymers of the lignocellulosic residues to their constituent sugars, with the above it is possible to avoid the use of chemical substances. One of the residues used for saccharification can be the banana peel, which is generated in large volumes because Mexico is one of the main of this fruit producers. Banana peel is a rich source of carbohydrates so that its hydrolysis can generate sugars that are the basis for obtaining value-added products, such as lactic acid. The present work shows a general revision of the characteristics that the lignocellulosic residues must have to be used in the saccharification processes by the action of enzymatic cocktails; as well as the use that can be given to the sugars that are obtained after the saccharification, focusing on the importance of using the hydrolysates of the banana peel for the production of lactic acid.*



## 1. RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

Los residuos agroindustriales son biomasa generada a través de las prácticas forestales y agrícolas, los cuales se pueden agrupar en residuos agrícolas (paja de trigo, bagazo de caña de azúcar, hojarasca de maíz), productos forestales (madera), residuos de papel, residuos de la industria alimentaria, y residuos sólidos (Liguori and Faraco, 2016). Los residuos mostrados en la Figura 1 son considerados algunas de las materias primas para el desarrollo de bioprocesos dirigidos a la obtención de compuestos de valor agregado.



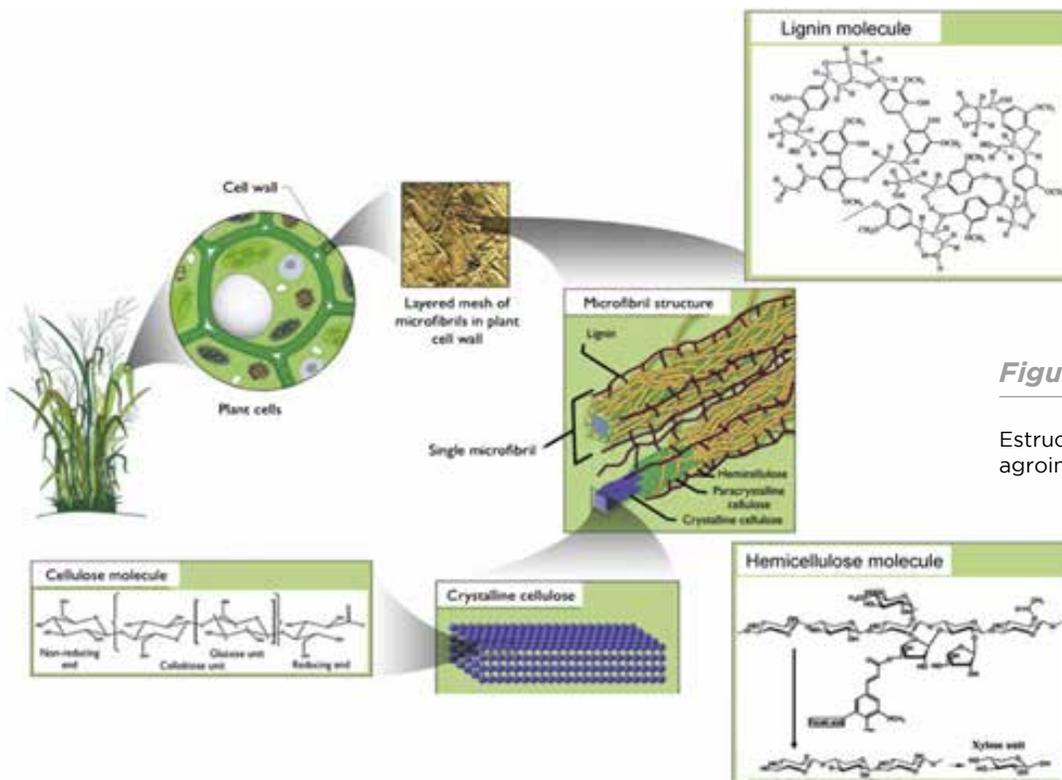
**Figura 1**

Ejemplos de residuos agroindustriales.

Debido a su composición química, rica en polímeros como celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina (Cuervo *et al.*, 2009), también se conocen como residuos lignocelulósicos. Estos materiales se producen en grandes proporciones a nivel mundial, y su uso en los bioprocesos puede evitar el empleo de materias primas que tienen un valor alimenticio, como es el caso de la azúcar de caña, que ha sido utilizado como fuente de carbono en los procesos fermentativos (Gavrilescu, 2014).

## 2. USO DE LOS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

Los avances en la biotecnología ha permitido hacer uso de los residuos agroindustriales para la generación de productos de valor agregado. Debido a la complejidad que presenta la estructura de los residuos lignocelulósicos, la cual se muestra en la Figura 2, es necesario realizar un pretratamiento de los mismos. Con ese pretratamiento será posible tener una mayor digestibilidad de los materiales, para posteriormente realizar una hidrólisis enzimática que garantice la obtención de monosacáridos. Estos monosacáridos se pueden utilizar como sustrato para generar productos de valor agregado, por medio de una fermentación (Galbe and Zacchi, 2012).



**Figura 2**

Estructura química de los residuos agroindustriales.

Existe una diversidad de productos que se pueden generar a partir del empleo de los residuos agroindustriales, como son:

- Productos químicos: se pueden producir compuestos como el etileno, propileno, benceno, tolueno y xileno, luego de realizar un pretratamiento previo a los residuos. Estos compuestos tienen gran importancia en la industria, ya que promueven la producción de otros compuestos orgánicos como las resinas y los polímeros (Howard *et al.*, 2003).
- Biocombustibles: por su alta demanda en el sector de transportes, se ha planteado la sustitución de los combustibles fósiles por biocombustibles. Sin embargo, la producción de los mismos a partir de azúcares o almidón hacen que el proceso no sea rentable, por lo que hacer uso de los residuos lignocelulósicos reduciría los costos de producción, lo que garantiza que el proceso sea económicamente competitivo, comparado con los combustibles fósiles (Liguori *et al.*, 2013). La Figura 3 ilustra el proceso de la obtención del etanol a partir de residuos lignocelulósicos, como el biocombustible más representativo.
- Enzimas: por su aplicación en otros sectores de la industria, la producción de las mismas resulta de interés, y de igual manera buscar la reducción de costos en su producción, utilizando los residuos lignocelulósicos (Howard *et al.*, 2003).
- Los residuos lignocelulósicos también son utilizados en los procesos dirigidos a generar azúcares reductores, proteínas, aminoácidos, carbohidratos, lípidos, ácidos orgánicos, carbón activado, cosméticos, biopesticidas, tensoactivos y fertilizantes, entre otros (Nakagawa *et al.*, 2006; Bozell y Petersen, 2010).

**Figura 3**

Uso de los residuos para la generación de un producto de valor agregado (bioetanol).



### 3. TIPOS DE PRETRATAMIENTOS EFECTUADOS A LOS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

La selección del pretratamiento es un paso crucial para que se lleve a cabo la hidrólisis de los residuos agroindustriales, y depende de la composición química específica del residuo (Godliving, 2009). En la Tabla 1 se muestran

**TABLA 1.**  
**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ALGUNOS RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS UTILIZADOS COMO MATERIA PRIMA EN LOS BIOPROCESOS.**

RESIDUO LIGNOCELULÓSICO	% DE LIGNINA	% CELULOSA	% HEMICELULOSA	REFERENCIA	
Tallos de madera dura	21.5 3 1.16	47.5 3 7.5	32 3 8	Kumar <i>et al.</i> , 2009	
Troncos de madera	30 3 5	30 3 5	47.5 3 2.5	Kumar <i>et al.</i> , 2009	
Cáscara de nueces	35 3 5	27.5 3 2.5	27.5 3 2.5	Kumar <i>et al.</i> , 2009	
Mazorca de maíz	20.3	31.7	34.7	Cruz <i>et al.</i> , 2000.	
Hoja de maíz	12.6	37.6	34.5	Cruz <i>et al.</i> , 2000	
Cáscara de plátano	11.48 3 1.67	15.48 3 0.24	12.57 3 1.41	Chantawongsa y Kongkiattikajorn, 2013.	
Cascarilla de arroz	21.4 3 4.5	19.73 3 2.3	30.7 3 6.8	Valverde <i>et al.</i> , 2007.	
Bagazo de caña	25.82	24.42	48.81	Area <i>et al.</i> , 2002.	
Desechos cítricos	bagazo	2.62	20.63	10.86	Sanchez <i>et al.</i> , 2009
	Cáscara	1.0 3 0.3	16.2 3 0.5	3.8 3 0.3	Mamma <i>et al.</i> , 2008.

ejemplos de la composición de algunos residuos lignocelulósicos que se han utilizado en bioprocesos para la generación de productos de valor agregado.

Para realizar una correcta selección del pretratamiento del material, se debe de conocer en primera instancia la composición en lignocelulosa del residuo, ya que a partir de ello se puede saber si éste requiere pretratamientos severos. Lo anterior es porque la principal barrera para la hidrólisis es la lignina, y al haber una alta cantidad de la misma en el material, el pretratamiento debe ser más severo. Por lo tanto, una correcta selección del pretratamiento permitirá mejorar la eficacia del uso del residuo lignocelulósico y la reducción de los costos generados por el pretratamiento empleado (Tahezadeh y Karimi, 2008).

Los tipos de pretratamientos generalmente se pueden clasificar en mecánicos, térmicos, físicos, químicos, físico-químicos y biológicos. Éstos se describen en la Tabla 2, donde también se mencionan las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

En general, los resultados de los tratamientos físicos y químicos son relativamente buenos, pero el requisito de equipo es estricto y la cantidad de residuos generados provoca que se eleven los costos de operación y se incremente la producción de contaminantes. Por lo que el hacer uso de tratamientos biológicos garantiza un menor consumo de energía y a la vez causa menos contaminación que otros tratamientos, pero tienden a ser costosos y necesitan de un mayor tiempo de proceso para llevarse a cabo (Chen *et al.*, 2017).



TABLA 2.

TIPOS DE TRATAMIENTOS PARA LOS RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS Y SUS VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

TRATAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	REFERENCIA
<b>Mecánicos</b> Consiste en la reducción de tamaño de los residuos lignocelulósicos.	Favorecen la digestibilidad de la celulosa y la hemicelulosa de dicho residuo.	Requieren de un alto consumo energético, por lo que no es económicamente viable.	Godliving, 2009
<b>Térmicos</b> También llamado explosión de vapor, y pueden desarrollarse en una autoclave.	Hidrólisis de 80 al 100% de la hemicelulosa. Pueden utilizarse con altas concentraciones de sólidos. Permiten una recuperación fácil de los materiales. Permite un incremento de la digestibilidad enzimática de la biomasa después de este tratamiento.	Causan la destrucción de una parte de los xilanos contenidos en las hemicelulosas. Generan una ruptura incompleta de la matriz lignina-carbohidratos.	Hendriks y Zeeman, 2009.
<b>Físicos</b> Este tipo de tratamientos son realizados con microondas, ultrasonidos y radiación de electrones.	Causan menor índice de contaminantes y su proceso es relativamente simple	Requieren alta energía y potencia, lo que provoca altos costos de producción. Su efecto sobre los residuos lignocelulósicos solo es superficial.	Chen et. al., 2017.
<b>Químicos</b> Hidrólisis alcalina.	Reducen la absorción de celulosa debido a la eliminación eficiente de la lignina y tiene bajos costos. Este tratamiento combinado con ácido genera celulosa casi pura con menor formación de subproductos.	Formación de sales que se incorporan en la estructura, complicándola. Requiere incorporación de pasos de neutralización y recuperación, y mayores tiempos de residencia.	Seidl et. al., 2016.
<b>Hidrólisis Ácida.</b>	Hidroliza la hemicelulosa y tiene bajos costos. Permite la eliminación efectiva de la lignina.	Genera productos químicos peligrosos, tóxicos y corrosivos. Requiere neutralización, destoxificación y pasos de recuperación.	Seidl et. al., 2016.
<b>Tratamientos con ozono.</b>	No origina productos inhibidores.	Los altos costos por la cantidad de ozono requerido.	Hendriks and Zeeman, 2009.
<b>Hidrólisis con líquidos iónicos.</b>	Proporciona propiedades específicas para degradar las estructuras de oxígeno. El proceso no requiere la adición de reactivos químicos, es más fácil de operar y requiere menos energía.	El disolvente es volátil, costoso y su recuperación se realiza mediante una cromatografía de intercambio iónico, que es también un método costoso.	Seidl et. al., 2016.
<b>Tratamiento con solventes orgánicos</b>	Solubilización de la lignina e hidrólisis de la hemicelulosa casi en su totalidad.	Los solventes necesitan separarse, recuperarse y reutilizarse para reducir costos y evitar problemas en la posterior etapa de fermentación.	Seidl et. al., 2016.
<b>Fisicoquímicos</b> Proceso de explosión de fibra con amoníaco.	No se producen inhibidores de los procesos posteriores. No requiere tamaños de partícula pequeños para aumentar su eficiencia.	No se solubiliza la hemicelulosa y además se requiere la recuperación de amoníaco.	Seidl et. al., 2016.
<b>Oxidativo</b>	La oxidación húmeda reduce la severidad del medio y la formación de inhibidores.	Los solventes necesitan separarse, recuperarse y reutilizarse, ya que tienen un alto costo.	Seidl et. al., 2016.
<b>Biológico</b>	Bajo requerimiento energético, producción del proceso a condiciones ambientales.	Largo tiempo de incubación, baja tasa de producción. La pérdida de la actividad celular, requiere condiciones de alto control.	Seidl et. al., 2016.

## 4. PRETRATAMIENTOS COMBINADOS

Hacer uso de un solo tratamiento para hidrolizar los residuos lignocelulósicos puede causar problemas como la contaminación, un alto consumo energía, prolongados tiempos de reacción, y la alta resistencia a la corrosión de los equipos donde se efectue la reacción; que pueden significar un problema para lograr el aprovechamiento adecuado de dichos materiales (Chen *et al.*, 2017.)

La combinación de tratamientos mecánicos, químicos, físicos o biológicos, es una alternativa para integrar las ventajas de varios métodos individuales de los tratamientos. Sin embargo, el optar por la combinación de los tratamientos va a depender del residuo lignocelulósico que se esté utilizando, lo que puede mejorar significativamente el aprovechamiento del residuo, para la formación del producto de interés (Seidl *et al.*, 2016).

### 1.4.1. Hidrólisis enzimática

Este es un proceso catalizado por una gama de enzimas hidrolíticas y/o oxidativas, cuyo propósito es la degradación de los polímeros orgánicos presentes en los residuos lignocelulósicos. Tal como se muestra en la Figura 4, este tipo de hidrólisis se puede ver favorecida o afectada por el pretratamiento que se le realice al residuo lignocelulósico, para generar monosacáridos (Jorgensen *et al.*, 2007).

Los polímeros orgánicos presentes en los residuos lignocelulósicos son hidrolizados por enzimas específicas. En el caso de la lignina, se puede realizar la oxidación de la misma con las ligninasas (manganeso peroxidasas, lignin peroxidasas y lacasas); en el caso de la celulosa, las enzimas encargadas de su hidrólisis son las endoglucanasas y las exoglucanasas; para la degradación de la hemicelulosa se necesitan enzimas como las xilanasas, y para la degradación de pectina se necesita la acción de las pectinasas. Sin embargo, hay otras enzimas que se encargan de hidrolizar sacáridos menos complejos, que son subproductos de la hidrólisis de los polisacáridos antes mencionados (Gupta *et al.*, 2016). Por lo que para efectuar la hidrólisis enzimática de los residuos

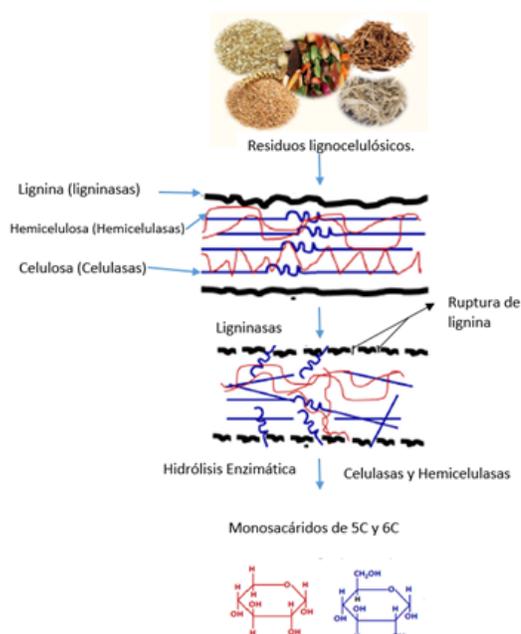


Figura 4

Hidrólisis enzimática de Residuos Lignocelulósicos

lignocelulósicos debe emplearse un sistema enzimático que contenga una diversidad de enzimas que sean capaces en conjunto degradar los residuos lignocelulósicos, y con ello obtener monosacáridos que se puedan emplear como sustrato en procesos fermentativos para la obtención de productos de valor agregado (Jorgensen *et al.*, 2007).

Para llevar a cabo los procesos de la hidrólisis de residuos lignocelulósicos con enzimas, se pueden emplear enzimas comerciales o extractos crudos enzimáticos (Cuervo *et al.*, 2005).

#### 1.4.1.1. Enzimas comerciales

Las enzimas comerciales, al tener un alto grado de purificación, tienen una mayor tasa de reacción en la digestión de los residuos lignocelulósicos. Sin embargo, el uso de estas enzimas eleva el costo de producción de compuestos de alto valor agregado a partir de los monosacáridos obtenidos luego de la hidrólisis de los residuos agroindustriales (Cuervo *et al.*, 2005).

#### 1.4.1.2. Extractos enzimáticos crudos

Los extractos enzimáticos crudos son una alternativa para realizar la hidrólisis enzimática de los residuos agroindustriales, ya que con éstos se disminuyen los costos que se generan cuando se hace uso de enzimas comerciales. Sin embargo, provocan que el proceso de hidrólisis sea más tardado (Cuervo *et al.* 2005). Dichos extractos enzimáticos pueden ser obtenidos a través de fermentación en estado sólido (FS), o mediante la fermentación sumergida (FmS) por diferentes microorganismos. En la Tabla 3, se mencionan algunos microorganismos con los que se han obtenido altos rendimientos en la producción de extractos enzimáticos crudos (Ovando y Waliszewski, 2005).

**TABLA 3.**  
**MICROORGANISMOS A PARTIR DE LOS CUALES SE OBTIENEN ENZIMAS HIDRÓLITICAS.**

MICROORGANISMO	CARACTERÍSTICAS	NOMBRE DE LOS MICROORGANISMOS
Bacterias	Aeróbicas mesofílicas y termofílicas.	<i>Cellulomonas sp.</i> , <i>Cellvibrio sp.</i> , <i>Microbispora bispora</i> y <i>Thermomonospora sp.</i>
	Anaeróbicas mesofílicas y termofílicas.	<i>Acetivibrio cellulolyticus</i> , <i>Bacteroides succinogenes</i> , <i>Ruminococcus albus</i> , <i>Ruminococcus flavefaciens</i> y <i>Clostridium thermocellum</i> .
Hongos	Aeróbicos.	<i>Trichoderma viride</i> , <i>Trichoderma reesei</i> , <i>Penicillium pinophilum</i> , <i>Sporotrichum pulverulentum</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Talaromyces emersonii</i> , <i>Trichoderma koningii</i> y <i>Aspergillus sp.</i>
	Aeróbicos Termofílicos.	<i>Sporotrichum thermophile</i> , <i>Thermoascus aurantiacus</i> y <i>Humicola insolens</i> .
	Anaerobios mesofílicos.	<i>Neocallimastix frontalis</i> , <i>Piromonas communis</i> y <i>Sphaeromonas communis</i> .

Ovando y Waliszewski, 2005.

Las enzimas presentes en los extractos crudos enzimáticos obtenidos por FS son más estables que los que se obtienen a partir de FmS; además de que en FS las posibilidades que tienen los microorganismos de sufrir represión catabólica durante la producción de las enzimas es menor, comparado con lo que sucede en FmS. Finalmente, en la FS es posible obtener mayores producciones de las enzimas, generando extractos multienzimáticos más potentes (Pandey *et al.*, 2000; Chundakkadu, 2005; Martínez-Trujillo, 2016).

#### **1.4.1.3.1. Trametes versicolor**

*Trametes versicolor* pertenece al orden de los *aphylophorales*, es un hongo productor de ligninasas. Se considera un microorganismo mesófilico, debido a que crece en regiones templadas (temperaturas de 10 a 19°C) y subtropicales (temperaturas de 19 a 24°C). Es uno de los basidiomicetos más comunes perteneciente al grupo de los hongos de podredumbre blanca. Este hongo tiene un alto potencial como biocatalizador en los procesos biológicos, debido a su capacidad para producir enzimas extracelulares, entre las que destacan oxidasas y peroxidasas, tales como: Lignina peroxidasa (Lip), Lacasa (Lac) y Manganeso peroxidasa (MnP) (Durán-Hinojosa *et al.*, 2017); siendo la lacasa la actividad más ampliamente estudiada, debido a su capacidad de degradar eficientemente a la lignina.

#### **1.4.1.4. Producción de extractos enzimáticos en hidrolasas**

El empleo de hongos filamentosos es de mucha importancia en la producción de enzimas hidrolíticas, debido a las altas actividades enzimáticas que se pueden obtener con ellos. El crecimiento por medio de hifas les confiere una ventaja competitiva sobre otros microorganismos, debido a que pueden colonizar soportes sólidos, lo que les permite aprovechar los nutrientes disponibles de dicho soporte. Otra de las ventajas que este tipo de crecimiento tiene es que al secretar las enzimas hidrolíticas, permite un incremento en la invasión del microorganismo, y por tanto aumenta la accesibilidad de los nutrientes disponibles (Fernández-Islas, 2012).

##### **1.4.1.4.1. Aspergillus**

*Aspergillus* es un género que produce una diversidad de enzimas hidrolíticas, como son las celulasas, pectinasas y xilanasas. Son microorganismos capaces de crecer sobre materiales de estructura compleja y con baja actividad de agua (Torres Barajas y Aguilar Osorio, 2013).

##### ***Aspergillus flavipes* FP-500**

La especie *Aspergillus flavipes*, se ha destacado por su capacidad para producir flavipina y lovastatina. Dentro de las enzimas degradadoras de polisacáridos que producen las cepas de esta especie, se han reportado las  $\alpha$ -galactosidasas y pectinasas, destacando las galacturonasas del tipo endo y exo y las pectin liasas (Martínez *et al.*, 2009). *A. flavipes* FP-500 es un excelente productor de exo y endopectinasas en medios de cultivos complejos (Martínez *et al.*, 2008).

##### ***Aspergillus niger***

*Aspergillus niger* es un hongo de color negro filamentosos hialinos, saprófito, perteneciente al filo Ascomycota. Se encuentra formado por hifas hialinas septadas y puede tener reproducción sexual (con formación de ascosporas en el interior de las ascas) y asexual (con formación de conidios).

Una de las características más importantes de *A. niger* es que crece sobre la materia vegetal muerta, alimentándose de las paredes celulares que la constituyen. Estas paredes celulares están compuestas principalmente de celulosa, hemicelulosa, pectina, xilano, lignina y proteínas. Es uno de los microorganismos más utilizados en la producción de enzimas industriales, por los altos niveles de secreción de proteínas (Durán-Hinojosa *et al.*, 2017).

## 1.5. Sacarificación

La sacarificación es una alternativa para hacer uso de los residuos lignocelulósicos, el cual consiste en el desdoblamiento de un polisacárido o de un glucósido mediante la acción de fermentos o reactivos hidrolizantes (Cuervo *et al.*, 2009), la cual se puede efectuar por los pretratamientos y/ o la hidrólisis enzimática antes mencionados.

Los residuos lignocelulósicos utilizados en procesos de sacarificación son aquellos que presentan una alta disponibilidad de polisacáridos, para con ello obtener altos rendimientos de azúcares reductores.

### 1.5.1. Cáscara de plátano

La cáscara de plátano es un residuo lignocelulósico que puede ser utilizado en un proceso de sacarificación para la generación de azúcares reductores, por su composición química y su alta disponibilidad (Bernstad *et al.*, 2012).

#### 1.5.1.1. Composición química

La cáscara de plátano tiene un alto porcentaje de polímeros orgánicos en su composición química, misma que se resume en la Tabla 4. Dicha conformación estructural, la vuelve una fuente de fuente de carbono adecuada para la bioconversión a azúcares reductores (Chantawongsa *et al.*, 2013).

**TABLA 4.**  
**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CÁSCARA DE PLÁTANO.**

COMPONENTE	% PRESENTE EN LA CÁSCARA
Lignina	11.48 3 1.64
Celulosa	15.48 3 0.24
Hemicelulosa	12.57 3 1.41
Proteína cruda	6.41 3 0.43

Chantawongsa *et al.*, 2013.

#### 1.5.1.2. Disponibilidad

Al ser el plátano un fruto que se cultiva en casi todos los países del mundo, especialmente en los países tropicales y subtropicales, la disponibilidad de la cáscara es más factible, ya que ésta representa un 60 % del peso total del fruto (Bernstad *et al.*, 2012). Por otro lado, siendo México el noveno productor de



plátano a nivel mundial (Tabla 5), se garantiza aún más la disponibilidad de este material para su aprovechamiento en el desarrollo de diversos bioprocesos.

En México se cultivan aproximadamente 77.301 hectáreas, produciendo 2.4 millones de toneladas al año (SAGARPA, 2016), las cuales se distribuyen principalmente en diferentes estados de la República, siendo Chiapas el que tiene la mayor producción, seguido de Tabasco, Veracruz, Michoacán y Colima.

**TABLA 5.**  
**PAÍSES PRODUCTORES DE PLÁTANO. FAO 2010**

LUGAR	PLÁTANO	
	País	Producción
1	India	31,897,900
2	China	9,848,895
3	Filipinas	9,101,340
4	Ecuador	7,931,060
5	Brasil	6,978,310
6	Indonesia	5,814,580
7	Tanzania	2,924,700
8	Guatemala	2,621,500
9	México	2,103,360
10	Colombia	2,034,340

### 1.5.1.3. Usos de la cáscara de plátano

Gracias a la composición química de la cáscara de plátano es posible generar subproductos que tienen diversas aplicaciones, como son los aditivos alimentarios, combustible renovable, productos químicos orgánicos, fertilizantes y absorbentes de contaminantes. Por dicha razón, el uso de la cáscara de plátano ha tenido gran relevancia en los bioprocesos, los cuales se muestran en la Tabla 6.

**TABLA 6.**  
**USOS DE LA CÁSCARA DE PLÁTANO PARA LA GENERACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE VALOR AGREGADO.**

USO	BIOPROCESO	BENEFICIO	REFERENCIA
Fertilizante	Se realiza una composta en condiciones aeróbicas y anaeróbicas con la cáscara de plátano seca y molida en combinación con estiércol de vaca, arena para aves de corral o lombrices de tierra.	Estos fertilizantes orgánicos contienen altos niveles de potasio (> 100 g/kg) y nitrógeno (>2%), y por lo tanto pueden ser efectivos para la aplicación en varios tipos de plantas	Kalemelawa <i>et al.</i> , 2012.
Sustrato en fermentaciones.	Se ha realizado la sacarificación de la cáscara por hidrólisis ácida, básica o enzimática, para posteriormente realizar una fermentación con los productos de la sacarificación.	Producción de combustibles, ácidos orgánicos, enzimas y azúcares.	Oberoi <i>et al.</i> , 2011.
Agente gelificante, espesante y estabilizadores.	Extracción de polisacáridos por medio de hidrólisis.	Genobtención de pectina, hemicelulosa y celulosa de uso para la industria alimentaria.	Abdul <i>et al.</i> , 2011.
Bio-colorante	Extracción de antocianinas.	Colorante natural, con un amplio uso en la industria alimentaria	Rymbai <i>et al.</i> , 2011.
Harinas	Secado y molienda de la cáscara hasta tener un polvo fino.	Sustituto utilizado en la industria alimentaria para la producción de galletas por su alto contenido de fibra dietética y su alto aporte de potasio.	Joshi, 2017.
Antibacterianos	Extracción de $\beta$ -sitosterol, ácido hidroxiesteárico y ácido málico.	Generación de conservadores naturales que pueden ser utilizados en la industria alimentaria.	Padam <i>et al.</i> , 2012.
Absorción de metales pesados.	Exposición de la cáscara de plátano con las aguas contaminadas con metales pesados.	Remoción de mercurio (II), presente en las aguas contaminadas.	Anirudhan <i>et al.</i> , 2007.

## 1.6. Uso de los azúcares obtenidos a partir de la sacarificación de residuos agroindustriales

Los azúcares obtenidos en el proceso de sacarificación de los residuos agroindustriales pueden ser utilizados en procesos fermentativos, principalmente para la producción de bioetanol y biometanol (considerados biocombustible), la producción de jarabes, y la producción de ácidos orgánicos (ácido láctico, ácido acético, ácido fórmico, etc.), como se muestra en la Figura 6 (Liguori *et al.*, 2013).



**Figura 5**

Uso de los azúcares obtenidos en la Sacarificación.

### 1.6.1. Ácido Láctico

El ácido láctico, también llamado ácido 2-hidroxipropanoico, es un ácido orgánico con amplias aplicaciones en la industria de los alimentos, cosméticos, farmacéuticos, textiles y las industrias químicas (Peng *et al.*, 2013). Recientemente, su mayor aplicación ha sido en la industria de polímeros, como precursor para la producción del ácido poli-láctico (PLA); el cual es un copolímero lineal, alifático, termoplástico y fácilmente biodegradable (Kozlovskiy *et al.*, 2017). El PLA es utilizado para la producción de plástico que puede reemplazar los polímeros petroquímicos, además de que ayuda a disminuir el calentamiento global, la dependencia de la energía fósil y la toxicidad (Papong *et al.*, 2014).

El ácido láctico se utiliza además para la producción de solventes verdes biodegradables, tales como el lactato de butilo y otros ésteres de ácido láctico, así como para la producción de propilenglicol no tóxico, que es ampliamente usado en productos farmacéuticos y alimentos, por mencionar algunos (Farran *et al.*, 2015).

Cabe mencionar que el ácido láctico puede ser producido por síntesis química o por fermentación (Hofvendahl y Hahn-Hägerdal, 2000), aunque en la actualidad, la mayoría del ácido láctico producido a nivel mundial se fabrica por fermentación; sin embargo, los altos costo de las materias primas, como el almidón y los azúcares refinados, ocasionan un incremento a los costos de producción, por lo que esto representa una de las desventajas, en comparación de la producción por síntesis (Corma *et al.*, 2007). Por lo consiguiente, hacer uso de sustratos de bajo costo es muy importante para la viabilidad de la producción por vía fermentativa (John *et al.*, 2006).

Una alternativa para la reducción de costos en el sustrato utilizado para la fermentación es el uso de la cáscara de plátano, la cual es una fuente

## Referencias

- Abdul, N.A., Ho, L.H., Azahari, B., Bhat, R., Cheng, L.H. y Ibrahim, M.N. 2011. Chemical and functional properties of the native banana (*Musa acuminata* x *balbisiana* Colla cv. Awak) pseudostem and pseudostem tender core flours. *Food Chem* 128:748-753. Penang, Malaysia
- Anirudhan, T.S., Senan, P. y Unnithan, M.R. 2007. Sorptive potential of a cationic exchange resin of carboxyl banana stem for mercury(II) from aqueous solutions. *Sep Purif Technol* 52:512-519. Trivandrum, India
- Area, M.C., Aguilar, S. and Felissia, F. 2002. Pulpado Hidroalcohólico de alto Rendimiento de bagazo de caña de azúcar. Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel.
- Bernstad SEB, Pacheco AV, Visconte LLY, Bispo EP, Escócio VA y Sousa AMF. 2012. Potentials for utilization of postfiber extraction waste from tropical fruit production in Brazil the example of Banana pseudo-stem. *Int J EnvirBioenerg*, 4:101-19. Lund, Suiza.
- Bozell, J.J. y Petersen, G.R. 2010. Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy's "Top 10" revisited. *Green Chem*, 12: 539-554. Tennessee, Estados Unidos.
- Chantawongsa, N. y Kongkiattikajorn, J. 2013. Pretreatment Methods for Banana Peel as a Substrate for the Bioproduction of Ethanol in SHF and SSF. *International Journal of the Computer, the Internet and Management* 21 (2):15-19. Tailandia.
- Chen, H., Liu, J., Chang, X., Chen, D., Xue, Y., Liu, P., Lin, H. y Han, S. 2017. A review on the pretreatment of lignocellulose for high-value chemicals. *Fuel Processing Technology*, 160: 196-206. Shanghai, China.
- Chundakkadu, K. 2005. Solid-state fermentation systems - An overview. *Critical Reviews in Biotechnology*, 25: 1-30. California, Estados Unidos.
- Corma, A., Iborra, S. and Velty, A. 2007. Chemical routes for the transformation of biomass into chemicals. *Chem Rev* 107: 2411-2502. Valencia, España.
- Cruz, J. M., Domínguez, J. M., Domínguez, H., y Parajó, J. C. 2000. Preparation of fermentation media from agricultural wastes and their bioconversion into xylitol. *Food biotechnology*, 14(1-2), 79-97. Vigo, España.
- Cuervo A.R., Hurtado C., Bravo E., Benítez N., Torres W. y Larmat F. 2005. Extraction and purification of the enzymes carbon monoxide dehydrogenase from the carboxidotrophic bacteria *Oligotrophocarboxidovorans*, OM 5 strain. *Revistacientífica Guillermo de Ockham* 3 (2) : 1794-1920.
- Cuervo L., Folch J.L. and Quiroz R.E. 2009. Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de Etanol. *BioTecnología*, 13 ( 3). Cuernavaca, México.
- Cui, F., Li, Y. y Wan, C. 2011. Lactic acid production from corn stover using mixed cultures of 1568 *Lactobacillus rhamnosus* and *Lactobacillus brevis*. *Bioresour Technol*. 102 : 1831-1836. Ohio, Estados Unidos.
- Durán-Hinojosa, U., Soto-Vázquez, L., García Rivero, M., Zafra Jiménez, G., Viguera Carmona, S.E. y Martínez-Trujillo, M.A. 2017. Solid-State Culture for Lignocellulases Production. Book edited by Angela Faustino Jozala, ISBN 978-953-51-2928-8, Print ISBN 978-953-51-2927-1. Estado de México, México.
- Farran, A., Chao, Cai, Sandoval, M., Xu, Yongmei, Liu, J., Hernaiz, M., Linhardt, R. 2015. Green solvents in carbohydrate chemistry: from raw materials to fine chemicals. *Chem. Rev.* 115 (14), 6811-6953. Madrid, España.
- Fernández-Islas F. 2012. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias y Tecnología de los Alimentos. Querétaro. Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química. 57.
- FAO (2010) FAOSTAT: Banana Production by Countries 2010 [Assessed 27 May 2012].  
<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- Galbe, M. y Zacchi, G. 2012. Pretreatment: The key to efficient utilization of lignocellulosic materials. *Biomass and Bioenergy*. 46: 70-78. Lund, Suiza.
- Gavrilescu, M. 2014. Biorefinery systems: an overview. *Bioenergy Res. Adv. Appl.* 14: 219-241. Lasi, Rumania.

potencial de energía renovable (Rehman *et al.*, 2014). Este biomaterial no utilizado se ha considerado como un sustrato potencial para la fermentación del ácido láctico. Como ya se hizo mención, la cáscara de plátano debe ser primeramente sacarificada para poder utilizarla como fuente de carbono, debido a que la mayoría de las bacterias del ácido láctico no pueden utilizarla directamente (Ghowdaman y Ponnusami., 2015).

Otro aspecto a considerar para el mejoramiento y la reducción de costos en la producción de ácido láctico es el microorganismos aplicadas en la fermentación, dicho ácido puede ser producido por bacterias, hongos, levaduras, cianobacterias y algas; estos pueden ser heterofermentativos y homofermentativos, por lo que es importante considerar el microorganismo que se emplea en la producción del ácido láctico (Cui *et al.*, 2011).

También se puede abatir los costos y tiempos realizando una sacarificación y fermentación simultánea (SSF), ya que esto reduce el número de etapas del proceso y puede proporcionar la base de un proceso que permita un uso eficiente de los azúcares fermentables (Kitpreechavanich *et al.*, 2016). La SSF se define como la degradación de la materia orgánica por enzimas hidrolíticas agregadas y el consumo de los azúcares fermentables liberados en la sacarificación sin realizar la separación del residuo una vez que transcurre un tiempo determinado para la sacarificación y posteriormente se realiza la agregación del microorganismo que efectuará la fermentación para la producción del ácido láctico (Kwan *et al.*, 2016).

## Conclusiones

Los residuos lignocelulósicos como la cáscara de plátano, pueden ser utilizados para la generación de subproductos de valor agregado, como lo es el ácido láctico, realizando una sacarificación por hidrólisis enzimática con extractos crudos obtenidos por fermentación sólida de *Aspergillus* y hongos de podredumbre blanca. Además, esta sacarificación puede efectuarse de manera simultánea a la fermentación, ya que de esta manera se van generando azúcares fermentables, que a su vez son consumidos por los microorganismos productores de ácido láctico. Lo anterior provocará una disminución del tiempo de proceso y la reducción de etapas del mismo.

- Ghowdaman, D. y Ponnusami, V. 2015. Production and optimization of xylooligosaccharides from corn cob by *Bacillus aerophilus* KGJ2 xylanase and its antioxidant potential. *Int J Biol Macromol* 79:595-600. Tami Nadu, India.
- Godliving, Y.S. M. 2009. Recent advances in pretreatment of lignocellulosic wastes and production of value added products. *African Journal of biotechnology*, 8 (8): 1398-1415. Tanzania.
- Gupta, V. K., Kubicek, C. P., Berrin, J. G., Wilson, D. W., Couturier, M., Berlin, A. y Ezeji, T. 2016. Fungal enzymes for bio-products from sustainable and waste biomass. *Trends in biochemical sciences*. 41(7): 635-645. Galway, Irlanda.
- Hendriks, A.T.W.M., y Zeeman, G. 2009. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 100: 10-18. Wageningen, Holanda.
- Hofvendahl, K., Hahn-Hägerdal, B. 2000. Factors affecting the fermentative lactic acid production from renewable resources. *Enzyme Microb. Technol.* 26: 87-107. Lund, Suiza.
- Howard, R.L., Abotsi, E., Jansen van Rensburg, E.L. y Howard, S. 2003. Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. *African Journal of Biotechnology*. 2 (12): 602-619. Sovenya, Sudáfrica.
- John, R. P., Nampoothiri, K. M. y Pandey, A. 2006. Simultaneous saccharification and fermentation of cassava bagasse for L (+) lactic acid production using *Lactobacilli*. *Appl Biochem Biotechnol*; 134:263-72. Kerala, India.
- Jorgensen, H., Kritensen, J. B. y Felby, C. 2007. Enzymatic conversion of lignocellulose into fermentable sugar: challenges and opportunities. *Biofuels bioproducts & Biorefining*. 1: 119-134. Copenhagen, Dinamarca.
- Joshi, R.V. 2007. Low calorie biscuits from banana peel pulp. *J Solid Waste Technol Manage* 33(3):142-147. India.
- Kalemelawa, F., Nishihara, E., Endo, T., Ahmad, Z., Yeasmin, R., Tenywa, M.M. y Yamamoto S. 2012. An evaluation of aerobic and anaerobic composting of banana peels treated with different inoculums for soil nutrient replenishment. *Bioresource Technology*, 126 : 375-382. Tottori, Japón.
- Kitpreechavanich, V., Hayami, A., Talek, A., Seung, C. F., Tashiro, Y. y Sakai, K. 2016. Simultaneous production of L-lactic acid with high optical activity and a soil amendment with food waste that demonstrates plant growth promoting activity. *J. Biosci. Bioeng*, 122 (1): 105-110. Fukoka, Japón.
- Kozlovskiy, R., Shvets, V. y Kuznetsov, A. 2017. Technological aspects of the production of biodegradable polymers and other chemicals from renewable sources using lactic acid. *Journal of Cleaner Production*. 155:157-163. Moscú, Rusia.
- Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., y Stroeve, P. 2009. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial & engineering chemistry research*, 48(8), 3713-3729. California, Estados Unidos.
- Kwan, T. H., Hu, Y. y Lin, C. S. K. 2016. Valorisation of food waste via fungal hydrolysis and lactic acid fermentation with *Lactobacillus casei* Shiota. *Bioresour Technol.*, 217: 129-136. Kowloon, Hong Kong.
- Liguori, R., Amore, A., Faraco, V. 2013. Waste valorization by biotechnological conversion into added value products. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 97 (14): 6129-6147. Nápoles, Italia.
- Liguori, R. y Faraco, V. 2016. Biological processes for advancing lignocellulosic waste biorefinery by advocating circular economy. *Bioresource Technology*. 215: 13-20. Nápoles, Italia.
- Mamma, D., Kourtoglou, E., y Christakopoulos, P. 2008. Fungal multienzyme production on industrial by-products of the citrus-processing industry. *Bioresource Technology*. 99: 2373-2383. Attica, Grecia.
- Martínez, T.A., Aranda, J. S., Gómez, S.C., Trejo, A. B., y Aguilar, O.G. 2009. Constitutive and inducible pectinolytic enzymes from *Aspergillus flavipes* FP-500 and their modulation by pH and carbon source. *Brazilian Journal of Microbiology*. 40 (1): 40-47. México, D.F.
- Martínez, A., Aranda, J. S. y Aguilar, O. G. 2008. Kinetic study on inducibility of polygalacturonases from *Aspergillus flavipes* FP-500. *Electron. J. Biotechnol.* 11 (4): 8-9. México, D.F.
- Martínez Trujillo, M.A. 2016. El uso de los residuos agroindustriales y la fermentación sólida para la producción de enzimas de interés industrial. *TECNOCULTURA*. 14(41): 6-17. Ecatepec, Estado de México.
- Morales Vera A. 2006. Tesis para optar al título profesional de ingeniero en maderas: Medios de cultivo líquidos para el desarrollo de inóculos de hongos de pudrición blanca aplicables en biopulpaje kraft. Facultad de ciencias forestales, Santiago de Chile.
- Nakagawa, A., Idogaki, H., Kato, K., Shinmyo, A. y Suzuki, T. 2006. Improvement on production of (R)-4-chloro-3-hydroxybutyrate and (S)-3-hydroxy-gammabutyrolactone with recombinant *Escherichia coli* cells. *J. Biosci. Bioeng*. 101: 97-103. Hyogo, Japón.
- Oberoi, H.S., Vadlani, P.V., Saida, L., Bansal, S. and Hughes. J.D. 2011. Ethanol production from banana peels using statistically optimized simultaneous saccharification and fermentation process. *Waste Management*, 31 : 1576-1584. Ludhiana, India
- Ovando, C. S.L., y Waliszewski, K.N. 2005. Preparativos de Celulasas Comerciales y Aplicaciones en Procesos Extractivos. Universidad y Ciencia. 21(42): 111-120. Veracruz, México.
- Padam, B.S., Tin, H.S., Chye, F.Y., Abdullah, M.I., 2012. Inhibitory activity of semi-purified banana inflorescence (*Musa paradisiaca* cv. Mysore) extract on foodborne pathogens in juice model. In Proceedings International Conference on Food Science and Nutrition (ICFSN 2012). Suter Pacific Hotel, Kota Kinabalu, Sabah. 1-4: 584-596.
- Pandey A., Soccol C.R, Mitchell D. (2000). New developments in solid-state fermentation. I. Bioprocesses and products. *Proc. Biochem*. 35:1153-1169. Curitiba-PR, Brazil.
- Papong, S., Malakul, P., Trungkavashirakun, P., Wenunon, P., Chom-in, T., Nithitanakul, M., Sarobol, E. 2014. Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective. *J. Clean. Prod.* 65: 539-550. Bangkok, Tailandia.
- Peng, L., Wang, L., Che, C., Yang, G., Yu, B. y Ma, Y. 2013. *Bacillus* sp. strain P38: An efficient producer of L-lactate from cellulosic hydrolysate, with high tolerance for 2-furfural. *Bioresource Technology*, 149: 169-176. Beijing, China.
- Rehman S, Hina A, Aqeel A, Shakeel AK, Muhammad S. 2014. Production of plant cell wall degrading enzymes by monoculture and co-culture of *Aspergillus niger* and *Aspergillus terreus* under SSF of banana peel. *Brazil J Microbiol* 45:1485-1492. Karachi, Pakistán.
- Rymbai, H., Sharma, R.R., Srivastav, M. 2011. Biocolorants and its implications in health and food industry. *Int J Pharmtech Res* 3 (4):2228-2244. New Delhi, India.
- Sanchez, M., Hernandez, F., Pulgar, M.A., y Cid, J.M. 2009. Digestibilidad del fruto del limón (*Citrus limon* L.) en caprino. *Arch. Zootec.* 45: 79-82. Murcia, España.
- Seidl, P.R. y Goulart A. K. 2016. Pretreatment processes for lignocellulosic biomass conversion to biofuels and bioproducts. Current opinión in Green and Sustainable Chemistry. 2: 48-53. Rio de Janeiro, Brasil.
- SAGARPA, 2016 [en línea] Disponible: <http://www.gob.mx/sagarpa/prensa/produccion-de-platano-hecho-en-mexico-aumenta-siete-por-ciento>
- Silva R. 2002. Antibiosis entre hongos lignivoros y hongos antagónicos para efecto del biopulpaje de madera de *Pinus radiata*. Memoria Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. 120.
- Taherzadeh, M.J. y Karimi, K. 2008. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. *Int. J. Mol. Sci.* 9: 1621-1651. Boras, Suiza.
- Torres-Barajas, L. R., & Aguilar-Osorio, G. (2013). Xylanolytic system proteins desorption from *Aspergillus flavipes* FP-500 cultures with agrowastes. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3). México, D.F.
- Valverde, G.A., Sarria, L.B., y Monteagudo, Y.J.P. 2007. Análisis Comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica*. 37: 255-260. Cuba.