

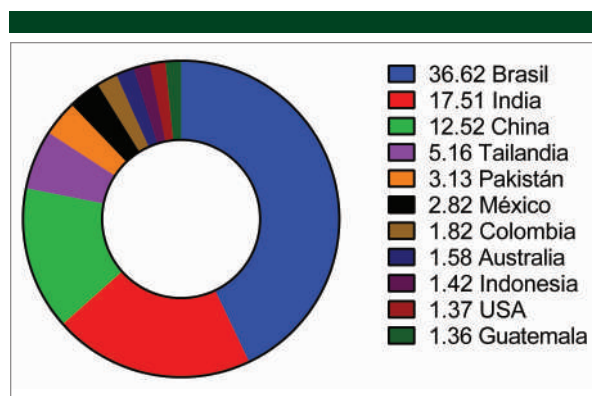
Carlos Rolz, Centro de Ingeniería Bioquímica, Instituto de Investigaciones, Universidad del Valle de Guatemala
carlosrolz@uvg.edu.gt



PALABRAS CLAVE: Caña de azúcar, Etanol, Bagazo de caña, Revisión.

INTRODUCCIÓN: La caña de azúcar se cultiva en 105 países y el azúcar extraída y purificada de la misma representa uno de los productos de mayor comercio mundial. Se observa en la Gráfica 1 que Brasil, India y China concentraron el 67 % de la producción en el año 2014¹.

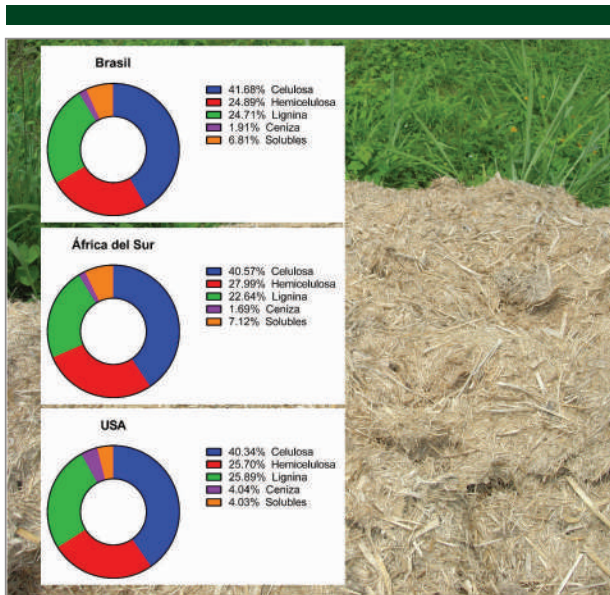
Los principales subproductos de la extracción del azúcar de la caña son: el bagazo, las vinazas y la cachaza o lodo de filtros. El bagazo es el residuo poroso que queda luego de moler los tallos y extraer los carbohidratos solubles; morfológicamente heterogéneo consiste físicamente en fibras y otros elementos estructurales como el parénquima y las células epiteliales (Soccol et al. 2010; Bezerra y Ragauskas, 2016). Por cada 100 toneladas de caña molida se producen en promedio 32 toneladas \pm 0.02 de bagazo al 50 % de humedad, de acuerdo con los datos de catorce años de cosecha en Brasil (Hofsetz y Silva, 2012). Las



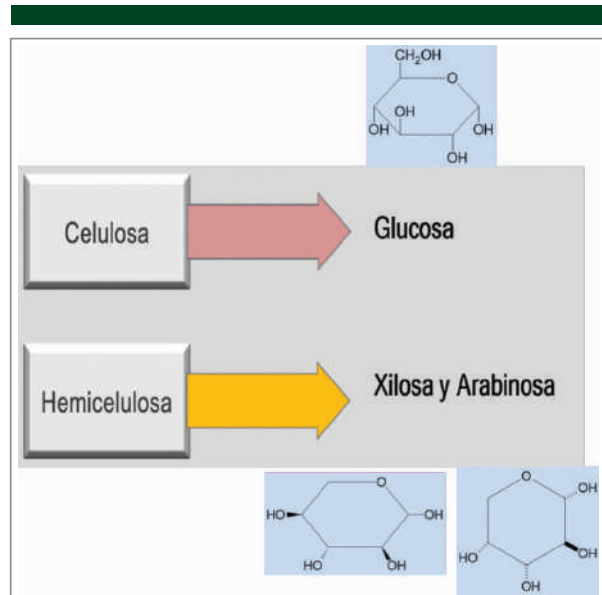
Gráfica 1. Porcentaje de la producción de caña de azúcar en el año 2014 de los once mayores productores con respecto a la producción total

concentraciones de los polímeros estructurales del bagazo, celulosa, hemicelulosa y lignina, son relativamente constantes, como se muestra en la Gráfica 2, la cual ilustra los promedios en tres países (Canilha et al., 2012; Benjamin et al. 2014, a,b,c; Templeton et al. 2016).

¹ FAO: faostat.fao.org



Gráfica 2. Componentes del bagazo de caña expresados como % en base seca. Notar la alta proporción de celulosa y hemicelulosa.



Gráfica 3. Generación enzimática de carbohidratos solubles del bagazo de caña previamente tratado. Notar la diferencia estructural de los carbohidratos producidos.

El empleo tradicional del bagazo en los ingenios ha sido como combustible. Diseños innovadores de calderas y sistemas de ahorro energético en el proceso redujeron la demanda de energía térmica en el ingenio y por consiguiente hubo disponibilidad de bagazo. La alternativa seleccionada fue emplear dicho remanente para generar electricidad. De esta manera se estableció un proceso flexible productor de: a) azúcar-electricidad, o, b) azúcar-etanol-electricidad, dependiendo de la demanda nacional e internacional y de los costos y regulaciones locales. Han sido publicados artículos que abordan los aspectos técnicos y económicos de este sistema, específicamente la dicotomía en la utilización del bagazo entre electricidad o etanol. Algunos de los trabajos publicados se listan en la Bibliografía de Consulta².

Tecnología 2G para la producción de etanol³

Existen importantes diferencias entre la producción de etanol a partir de los carbohidratos solubles en el tallo, o Tecnología 1G, y la producción de etanol de los biopolímeros del bagazo, o Tecnología 2G. Las diferencias principales son: a) la necesidad de un pretratamiento del bagazo para romper la matriz lignocelulósica, b) la utilización de enzimas comerciales para romper las uniones de los polímeros celulosa y hemicelulosa y generar los azúcares correspondientes, c) contar con un microorganismo capaz de transformar la hexosa proveniente de la celulosa y las pentosas resultantes de la hidrólisis de la hemicelulosa y d) contar con un microorganismo resistente a la inhibición de la fermentación alcohólica por compuestos orgánicos generados durante el pretratamiento del bagazo, ver Gráfica 3. Los cuatro temas anteriores se tratarán más adelante.

² La Bibliografía de Consulta está disponible únicamente en la versión electrónica www.uvg.edu.gt/publicaciones/revista

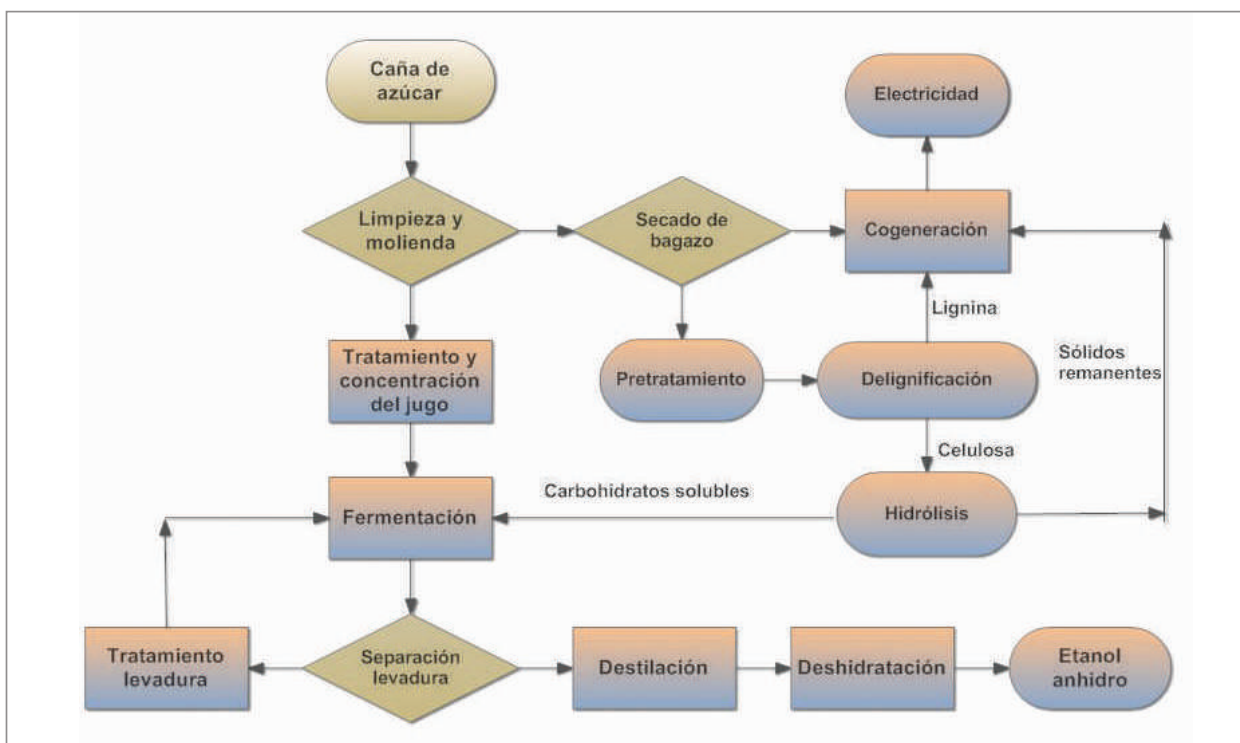
³ 2G: segunda generación.

Producción a escala industrial empleando Tecnología 2G

Dos compañías en Brasil se encuentran produciendo etanol del bagazo de caña: a) Gran Bio en su unidad Bioflex-1 situada en Sao Miguel dos Campos, Alagoas con una capacidad de 82 Mlitros por año, utiliza la tecnología PROESA de la compañía italiana Beta Renewables para el pretratamiento del bagazo, enzimas de la compañía danesa Novozymes y una cepa de levadura de la compañía holandesa DSM; b) Raizen Energia Participacoes S/A, subsidiaria de Royal Dutch Shell y la empresa brasileña Cosan S.A. en la unidad anexa al ingenio Costa Pinto, Piracicaba, Sao Paulo, con una capacidad de 40 Mlitros al año, utiliza la tecnología de la compañía canadiense Iogen Corporation que implica pretratamiento del bagazo, enzimas y cepa de levadura.

Biorefinería a partir de la caña de azúcar empleando las Tecnologías 1G y 2G

En la Gráfica 4 se ilustra el diagrama de flujo de una biorefinería que emplea como materia prima el tallo del bagazo de la caña con el objeto de producir etanol y electricidad, aunque, si la caña se cosecha en forma mecánica, también puede procesarse la mayoría del rastrojo o residuo de campo, dejando cierta cantidad para mantener características del suelo adecuadas (Carvalho et al. 2017). El etanol se produce tanto de la sacarosa del tallo como de la glucosa y pentosas producidas por la hidrólisis del bagazo. El proceso es autosuficiente en energía térmica y el exceso de la misma se utiliza para generar electricidad (Días et al. 2013). Esquemas análogos con algunas variantes



Gráfica 4. Diagrama de bloques de la biorefinería para producir etanol y electricidad utilizando el tallo de la caña de azúcar en forma completa

de proceso se pueden encontrar en varias de las referencias listadas en la Bibliografía de Consulta.

El etanol producido no solo se emplea como combustible, sino que, en el concepto de la biorefinería, sirve de materia prima para otros productos. Por ejemplo, la compañía brasileña Braskem deshidrata el etanol a etileno, luego lo polimeriza para producir polietileno, al cual denominan *polietileno verde*.

Por otro lado, se han propuesto también sistemas termo-mecánico-químico para procesar el bagazo de la caña de azúcar con el mismo fin anterior (Seabra et al. 2010; Sims et al. 2010; Walter y Ensinas, 2010; Chandel et al. 2012; Leibbrandt et al. 2012; Farzad et al. 2017). En este sistema el bagazo es sometido a una pirólisis y gasificación para producir gas de síntesis, $\text{CO} + \text{H}_2$, del cual pueden obtenerse una gama de productos, además del etanol, entre los que se encuentran el diésel y la gasolina para aviones, utilizando la síntesis de Fischer-Tropsch.

La investigación continua y variantes en las tecnologías se discuten y comparan con el objetivo de definir situaciones que favorezcan una o la otra de las dos alternativas de proceso, el biológico o el termo-mecánico-químico en las biorefinerías del futuro.

Pretratamiento del bagazo

Se han ensayado con bagazo de caña varias metodologías para romper la matriz lignocelulósica buscando, no solo, la mayor

accesibilidad de las enzimas a la celulosa y hemicelulosa, sino que también, minimizar la producción de compuestos que muestren toxicidad hacia los microorganismos productores de etanol. Las metodologías pueden clasificarse en varios grupos generales de esta manera: a) hidro-térmico b) uso de soluciones diluidas de ácidos inorgánicos y/o compuestos alcalinos, c) empleo de solventes, técnica que ha recibido el nombre genérico de organosolv, d) agentes oxidantes y reductores, e) métodos físicos, biológicos y líquidos iónicos, y f) combinaciones entre dos o más metodologías anteriores.

El pretratamiento es clave para asegurar que durante la hidrólisis enzimática se generen la mayor cantidad de azúcares fermentables a etanol. De esta cuenta, han sido publicados una serie de revisiones científicas y tecnológicas de los experimentos llevados a cabo con diversas materias primas empleando alguna de las técnicas antes mencionadas, o varias de ellas en combinación (Hendriks y Zeeman, G. 2009; Alvira et al. 2010; Cardona et al. 2010; Kumar y Murthy, 2011; Agbor et al. 2012; Chioramonti et al. 2012; Galbe y Zacchi, 2012; Mood et al. 2013; Singh et al. 2014; Xu y Huang, 2014; Akhtar et al. 2016; Devendra et al. 2016; Zhuang et al. 2016; Arenas-Cárdenas et al. 2017; Rastogi y Shrivastava, 2017).

• Hidro-térmico:

Se utiliza en forma de vapor o como agua sobrecalentada; en ambos casos se requiere de energía térmica la cual se obtendrá del propio ingenio. El agua a esas condiciones actúa como un

ácido diluido y promueve la hidrólisis de la hemicelulosa y la modificación de la lignina, afectando en forma mínima a la celulosa. En el primer caso, el bagazo se pone en contacto con vapor entre 160 a 240 °C por pocos minutos. Luego se efectúa una descompresión instantánea o explosión en la descarga. En el segundo caso, el bagazo se pone en contacto con agua sobrecalentada entre 160 a 230 °C por un tiempo entre 12 y 60 min. El proceso no requiere ningún agente químico, lo cual es una ventaja, sin embargo al procesar con temperaturas altas se incrementa la generación de compuestos inhibidores de la fermentación de los azúcares a etanol. Valores diferentes de la temperatura y el tiempo del proceso, así como la carga inicial de sólidos al reactor pueden ser consultadas en la Bibliografía de Consulta.

Laser et al. (2002) compararon ambas técnicas con bagazo de caña y obtuvieron mejores indicadores para el pretratamiento con agua sobrecalentada. En un estudio reciente, presentaron datos tecno-económicos para el proceso, diseñando para el pretratamiento, un reactor horizontal de tornillo operado en forma continua a 190 °C con una suspensión de 14 % de sólidos, a manera de obtener mayor remoción de hemicelulosa, menor degradación de las pentosas y mayor remoción de lignina (Archambault-Leger et al. 2015).

La adición de CO₂ al pretratamiento hidro-térmico ha sido estudiada tanto en el sistema de vapor-explosión de descarga (Ferreira-Leitao et al., 2010) como en el sistema con agua sobrecalentada (Gurgel et al. 2014). El CO₂ en esas condiciones actúa como ácido carbónico sobre el bagazo favoreciendo la hidrólisis de la hemicelulosa. El CO₂ podría obtenerse de las tanques de fermentación alcohólica.

También se han presentado resultados de la adición de compuestos alcalinos (cal y solución de amonio), ácidos inorgánicos y compuestos oxidantes al proceso hidro-térmico, referencias que pueden ser consultadas en la Bibliografía de Consulta.

La empresa Gran Bio en Brasil, anteriormente descrita, emplea el pretratamiento hidro-térmico del bagazo.

• *Soluciones diluidas de ácidos inorgánicos y/o compuestos alcalinos*

Al cambiar el pH durante el pretratamiento del bagazo se obtienen diferentes resultados dependiendo si el cambio es hacia el espectro ácido o hacia el alcalino. La regla general ha sido emplear en ambos casos soluciones relativamente diluidas con el objeto de minimizar los efectos sobre las fibras de celulosa. De acuerdo con Pedersen y Mayer (2010) en el rango alcalino, se hidroliza la hemicelulosa y se degrada la lignina liberando monómeros fenólicos; en medio ácido, el efecto principal es la hidrólisis de la hemicelulosa. En ambos casos, la matriz original se altera físicamente, abriéndose espacios entre sus cadenas poliméricas, lo cual permite, posteriormente, el acceso a las enzimas que hidrolizan a la celulosa y a la hemicelulosa.

El pretratamiento con ácido sulfúrico diluido ha sido seleccionado por varias empresas industriales que actualmente producen etanol con tecnología 2G, incluyendo la empresa Raizen en

Brasil, descrita anteriormente, procesando bagazo. En la Bibliografía de Consulta se listan referencias que describen resultados de investigaciones con bagazo empleando ácidos inorgánicos.

Es pertinente señalar dos pretratamientos alcalinos, a) el uso de hidróxido de calcio y b) el empleo de amonio, ya sea, en forma de gas o en solución.

El hidróxido de calcio o cal presenta los atractivos siguientes: es barato, se usa en el ingenio para clarificar el jugo de caña, puede regenerarse, si se desea, empleando CO₂ proveniente de los tanques de fermentación, es fácil de usar y no es tóxico. Es un agente efectivo en solubilizar parcialmente la lignina y la hemicelulosa, removiendo grupos acetilo de esta y por consiguiente alterando la estructura inicial de las fibras del bagazo. Se han empleado cargas del orden de 0.1 a 0.4 g Ca(OH)₂/g de bagazo seco y dos modalidades de operación: a) tiempos cortos de 1-3 h y alta temperatura, 85-135 °C, y b) tiempos largos de 24 h hasta 5 semanas y temperaturas bajas, 50-65 °C. Se han reportado datos de delignificación de 30 a 65 % y la producción de mayores cantidades de azúcares reductores durante el posterior tratamiento enzimático (Chang et al., 1998; Rabelo et al., 2008; 2009; Beukes y Pletschke, 2010; Fuentes et al. 2011; Nachiappan et al. 2011; Grimaldi et al. 2015).

El pretratamiento con NH₃ en forma gaseosa se conoce como AFEX. En el mismo, el bagazo y el amoniaco se cargan al reactor en una relación 1:1 en base seca, se eleva la temperatura a 100-140 °C y se mantiene por 30 min. Luego se descarga el NH₃ y se pasa aire a través del sólido para eliminar el amoniaco residual (Krishnan et al. 2010). El NH₃ puede recuperarse y reciclarse, sin embargo debe seguirse un protocolo estricto en el manejo del mismo debido a su toxicidad. Se han observado ligeras reducciones de lignina y hemicelulosa (Prior y Day, 2008). Sin embargo, la estructura ha sido alterada de manera que se han logrado excelentes conversiones enzimáticas de la celulosa y hemicelulosa a sus carbohidratos correspondientes, los cuales posteriormente se han transformado a etanol.

En la Bibliografía de Consulta se listan referencias que describen resultados de investigaciones con bagazo empleando soluciones de amonio. También se han listado publicaciones en donde se han combinado la técnica hidro-térmica con la catálisis ácida o alcalina.

• *Organosolv*

El proceso así llamado consiste en poner en contacto etanol con el bagazo a altas temperaturas por tiempos cortos. El efecto principal es la remoción apreciable de lignina y parcial de hemicelulosa, las cuales varían de acuerdo con las condiciones de operación.

El pretratamiento presenta atractivos ya que el etanol empleado se produce en el propio proceso y se presta fácilmente a un reciclaje. Sin embargo, debido a su punto de ebullición bajo se necesita un equipo diseñado para presión alta. Wei et al. (2017) reportaron que era posible remover 52 % de lignina y 65 % de

hemicelulosa del bagazo al emplear una mezcla de 55:45 (v/v) de etanol-agua al colocar una suspensión de bagazo de 10 % de sólidos en un reactor a 195 °C por 120 min. En el sólido resultante la celulosa se hidrolizaba enzimáticamente arriba del 90 %.

Otros investigadores, por un lado, han combinado el organosolv con pretratamientos ácidos o alcalinos, y por el otro, han empleado solventes diferentes como el glicerol. Este último es de interés ya que puede emplearse el glicerol resultante de la producción de biodiesel. En la Bibliografía de Consulta se listan referencias al respecto.

• **Otros**

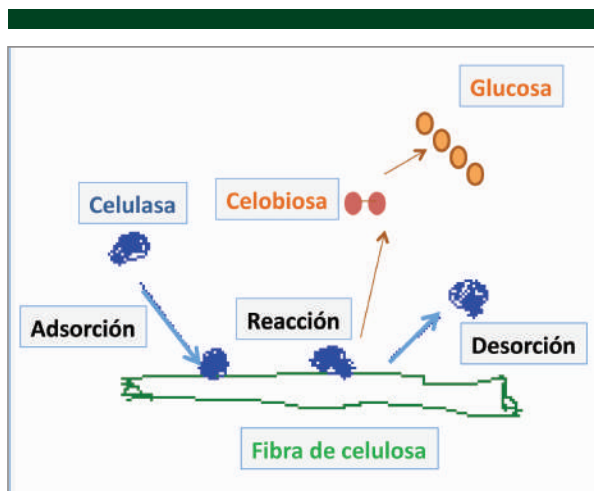
En la Bibliografía de Consulta se listan referencias en donde el bagazo fue sometido a la acción de compuestos químicos oxidantes, compuestos químicos reductores, métodos físicos como molienda extrema, ultrasonido, microondas, líquidos iónicos, y microorganismos delignificadores.

Enzimas hidrolíticas

En los pretratamientos del bagazo anteriormente descritos el polímero de la celulosa, en la mayoría de los casos, queda, o químicamente intacto, o con leves modificaciones. El reto siguiente es la hidrólisis de dicha molécula a glucosa, la cual, en forma preferente, la levadura transformará a etanol. Para realizar esta transformación, los procesos industriales en operación emplean enzimas celulolíticas⁴. Se ha documentado en forma extensa que tales enzimas actúan sobre los enlaces glucosídicos del polímero de dos maneras: dentro de la cadena - acción endo - y en las terminales de la cadena, sean reductoras o no - acción exo - (Jeoh et al. 2017). El mecanismo es de adsorción, reacción y desorción, como se observa en la Gráfica 5.

Transformación de los carbohidratos solubles a etanol

Además de la glucosa en el medio están presentes dos pentosas, la xilosa, mayoritaria, y la arabinosa, en menor proporción, ambas derivadas del rompimiento de la hemicelulosa, el cual ocurre, tanto, durante el pretratamiento, como en la hidrólisis enzimática, debido a la presencia de hemicelulasas en la formulación de las enzimas industriales.



Gráfica 5. Ilustración de la interacción entre la enzima celulasa y el polímero de la celulosa. La enzima en solución (azul) se adsorbe al polímero (verde) por medio de su módulo de asociación. Se acomoda en la superficie de tal manera que su sitio activo hidroliza enlaces glucosídicos liberando al medio celobiosas (dímero de glucosa en rojo) y glucosa (en anaranjado). Luego se despegan del polímero. La celobiosas se hidroliza por acción de la enzima celobiohidrolasa liberando más glucosa al medio.

Por otro lado, durante el pretratamiento se generan, en menor cuantía, compuestos, en algunos procesos más que en otros, que inhiben la producción de etanol por las levaduras. Los compuestos inhibidores principales son: a) los ácidos carboxílicos, principalmente el acético que se origina de la remoción del grupo acetilo durante la hidrólisis de la hemicelulosa, b) compuestos fenólicos y otros aromáticos provenientes de las modificaciones de la lignina, y c) los furanos, furfural e hidroximetil furfural, generados por la descomposición química de pentosas y hexosas (Hendriks y Zeeman, 2009; Alvira et al. 2010; Cardona et al. 2010; Canilha et al. 2012; Agbor et al. 2012; Chiaramonti et al., 2012; Galbe y Zacchi, 2012; Singh et al. 2014; Xu y Huang, 2014; Arenas.Cárdenas et al. 2017). El Cuadro 1 presentado a continuación ilustra en forma cualitativa la diferencia entre diferentes tratamientos sobre la lignocelulosa. Se observa que los pretratamientos con ácido diluido, la explosión con vapor y el organosolv generan la mayor cantidad de compuestos inhibitorios.

Cuadro 1. Efectos de pretratamientos en la estructura de la lignocelulosa **A: alta; M: mediana; B: baja** (Xu y Huang, 2014)

Pretratamiento	Aumento de área superficial	Atenuación de área cristalina en la celulosa	Solubilización de la hemicelulosa	Remoción de la lignina	Alteración de la estructura de la lignina	Generación de inhibidores
Ácido diluido	A	B	A	B	A	A
Explosión vapor	A	B	M	B	M	A
Organosolv	A	B	A	A	A	A
Agua sobrecalentada	A	B	M	B	M	B
Alcalinos	A	B	M	M	A	B
AFEX	A	A	B	B	A	B

⁴ Las enzimas son producidas y comercializadas por empresas de biotecnología: Novozyme (<https://www.novozymes.com/advance-your-business/bioenergy>) DSM (https://www.dsm.com/content/dam/dsm/cworld/en_US/documents/2015-04-30-science-presentation-dsm-enzymes-and-process-conditions-for-cellulosic-ethanol.pdf)

Los compuestos anteriores definidos como inhibidores en la producción de etanol por levaduras, también inhiben la acción de las enzimas hidrolíticas; los compuestos fenólicos derivados de la degradación de la lignina (Ximenes et al. 2010; Kim et al. 2011; Tejjirian y Xu, 2011) los derivados del furano y los ácidos orgánicos (Jing et al. 2009).

Algunos ejemplos de la producción de etanol se describen a continuación con el objetivo de poner en relieve algunos de los problemas encontrados en las diferentes estrategias empleadas. Los principales cuellos de botella son: a) aumentar los sólidos en suspensión durante la hidrólisis y fermentación, b) reducir el tiempo de fermentación, y c) emplear un microorganismo que utilice la xilosa y la celulosa. El primero de ellos es principalmente un problema de diseño mecánico del reactor y del sistema de transporte que sea capaz de procesar hasta 20-30 % de sólidos. El segundo se refiere a reducir el tiempo en el reactor al valor usual en industria 1G, o sea alrededor de 36-48 h. El tercero, relacionado estrechamente al segundo, implica la incorporación simultánea de la xilosa y glucosa por el microorganismo. Tal como se describió en la Gráfica 4, los azúcares hidrolizados en la tecnología 2G, se adicionarían a los obtenidos en la tecnología 1G. Los azúcares obtenidos en el ramal 1G están alrededor de 180 g/L, que al fermentar producirían, tomando en cuenta las eficiencias reales, alrededor de 80 g/L de etanol. Por lo tanto, si en el ramal 2G no se logra la anterior concentración de azúcares, habría que evaporar el agua necesaria para lograrlo. De otra manera se estaría diluyendo el contenido de azúcares potencialmente fermentables a etanol.

- **Pretratamiento empleando la catálisis ácida.** Se hidrolizó el bagazo con 2.5 % de HCl, al 10 % de sólidos, a 140 °C por 30 min. La composición del hidrolizado se muestra en el Cuadro 2. El total de azúcares estuvo alrededor de 30 g/L de los cuales el 71 % era xilosa. Los inhibidores de la fermentación

estaban presentes en el orden siguiente: ácido acético > fenoles > furanos. No se emplearon enzimas para hidrolizar la celulosa, sino que se utilizó directamente una cepa de la levadura *Candida shehatae*, llevándose a cabo la fermentación a 30 °C con 150 rpm de agitación por 45 h. Los datos de la producción de etanol se muestran en el Cuadro 3. Se observa que la producción de etanol y el crecimiento de la levadura fueron mayores cuando en el hidrolizado se redujeron los inhibidores, 63 % los furanos, 76 % los fenoles y 85 % el ácido acético, en una etapa previa de intercambio iónico (Chandel et al. 2007).

- **Pretratamiento hidro-térmico explosión con vapor y adición de O₂.** La explosión con vapor se llevó a cabo empleando una suspensión del bagazo seco de 16 % de sólidos, por diez minutos, a dos temperaturas, 185 y 200 °C, a una presión con oxígeno. La suspensión resultante se hidrolizó con una mezcla de enzimas *Novozyme*, *Cellic[®] CTec2*, 85% y *Cellic[®] HTec2*, 15 %. Los hidrolizados se fermentaron a etanol empleando la levadura *Scheffersomyces stipitis*, previo ajuste del pH a 6.0 (Biswas et al. 2013). Los resultados se muestran en el Cuadro 4. Se observa que una mayor temperatura en el pretratamiento incrementó la glucosa hidrolizada por las enzimas y la cantidad de inhibidores. Aunque se logró una mayor cantidad de etanol producido en esas condiciones, la fermentación tomó 2.3 veces más tiempo. En este caso, la levadura empleada utilizó, primero la glucosa, y luego la xilosa, en una forma secuencial.
- **Pretratamiento hidro-térmico explosión con vapor y catálisis alcalina.** La explosión con vapor se llevó a cabo a 200 °C por 7 min. Luego en una suspensión al 10 % se trató con NaOH 1 % por 1 h a 100 °C. En el Cuadro 5 se listan los cambios en la composición del bagazo luego de los pretratamientos.

Cuadro 2. Composición en g/L del líquido hidrolizado por catálisis ácida

Xilosa	Arabinosa	Glucosa	Total de azúcares	Furanos	Fenoles	Ácido acético
21.5	2.95	5.84	30.29	1.89	2.75	5.45

Cuadro 3. Resultados de la fermentación con *C. shehatae*

Tratamiento	Azúcar fermentado %	Etanol producido g/L	Biomasa producida g/L	Rendimiento etanol g/g
Neutralizado	78.8	3.46	9.8	0.22
Intercambio iónico	89.9	8.67	16.0	0.48

Cuadro 4. Resultados de la fermentación con *S. stipitis*. Temperatura en °C. Concentraciones en g/L. Tiempo en h. HMF: hidrometilfurfural. Rendimiento: g etanol por g de azúcar consumida

Temperatura	Glucosa	Xilosa	Ácido acético	HMF	Furfural	Tiempo	Etanol	Biomasa	Rendimiento etanol g/g
185	17.3	9.6	3.2	0.4	0.5	36	10.4	3.31	0.39
200	42.8	6.3	6.9	1.2	0.8	82	18.7	3.16	0.38

Cuadro 5. Cambios en la concentración de los principales biopolímeros del bagazo ocasionados por los pretratamientos, % en base seca.

Componente	Original	Explosión vapor (EV)	Explosión vapor + álcali (EV + A)
Celulosa	42.8	47.7	87.3
Hemicelulosa	25.8	8.9	6.9
Lignina	22.1	34.3	5.7

Cuadro 6. Glucosa en g/L e inhibidores en mg/L en los hidrolizados generados durante el pretratamiento y etanol producido durante la fermentación para muestras solo con EV y muestras con EV + A, a los tres diferentes tiempos de acción enzimática

Hidrolizado	Glucosa	Fenoles	HMF	Furfural	Etanol	Glucosa fermentada %	Rendimiento etanol g/g
EV12	27.67	80	1	1	10.17	98.77	0.367
EV24	21.40	68	1	1	6.18	97.99	0.289
EV48	22.94	73	1	1	5.33	98.39	0.232
EV + A 12	59.69	21	2	1	23.38	97.76	0.392
EV + A 24	50.40	16	2	1	18.02	99.25	0.357
EV + A 48	45.54	18	2	1	16.75	99.06	0.368

La explosión con vapor hidrolizó una cantidad significativa de la hemicelulosa y la catálisis con álcali subsiguiente solubilizó una apreciable cantidad de lignina. Los sólidos en una suspensión al 8 % se hidrolizaron con la mezcla de enzimas *Novozyme Celuclast* y 188 procediendo en forma de lote alimentado, al agregar sólidos a las 12, 24 y 48 h, y finalizando a las 120 h. Los hidrolizados se fermentaron empleando *Sacharomyces cerevisiae* UFPEDA 1238, 34 °C por 24 h, ajustando al inicio el pH a 5.5. Los resultados se encuentran en el Cuadro 6. Se observó una mayor cantidad de glucosa en las muestras con pretratamiento doble. En ambos casos la alimentación del reactor hidrolizado a las 12 horas resultó con mayor producción de etanol y un mejor rendimiento de conversión por la levadura. Los fenoles se redujeron apreciablemente en los hidrolizados con pretratamiento doble (Wanderley et al. 2013).

- **Pretratamiento con catálisis alcalina.** El bagazo se trató en una suspensión al 10 % con una solución de NH_4OH , 28 % en peso, a 70 °C por 96 h. El efecto principal del pretratamiento fue una reducción del 45 % de la lignina. El efecto sobre la celulosa y hemicelulosa fue mínimo. La hidrólisis enzimática se realizó con una mezcla de enzimas, *Genencor Spezyme* y *Novozyme 188*, a 50 °C por 24 h y 150 rpm de agitación. En los hidrolizados se detectaron ácidos orgánicos, en cantidades menores a 1 g/L, como posibles inhibidores, mayoritariamente el ácido acético. Por el contrario, no se detectaron furfural o HMF. La fermentación se llevó a cabo con *Saccharomyces cerevisiae* D₅A a 30 °C por 24 h y 150 rpm de agitación. La levadura únicamente utilizó la glucosa y no asimiló la xilosa. La mayor concentración de etanol obtenida fue de 4 g/L, con un rendimiento de 0.38 g/g (Kim y Day, 2013).

- **Pretratamiento organosolv con glicerol.** El bagazo se trató en una suspensión al 5 % con glicerol industrial, 70 %, por 2 h, a 220 °C, con agitación. La degradación de la celulosa fue marginal. Por el contrario, la hemicelulosa y la lignina fueron removidas en un 71 y 67 % del original, respectivamente. La concentración de inhibidores, furfural y HMF, en el licor resultante fue relativamente bajo. El residuo sólido fue hidrolizado con la enzima *Cellic CTec2*, a 50 °C por 72 h, obteniéndose 90 % de hidrólisis de la celulosa. La transformación a etanol, empleando una cepa de *Saccharomyces cerevisiae* comercial de China, se llevó a cabo en forma simultánea con la hidrólisis. El mejor resultado de etanol producido igual a 55.7 g/L en 72 h a 37 °C, se obtuvo en la modalidad de lote alimentado, con lo cual se logró llegar a una suspensión de sólidos del 30 % en el reactor (Sun et al. 2016).

Factibilidad técnica y económica

Existen diversos estudios publicados, principalmente en Brasil, sobre estimaciones de costo de producción, balance energético y análisis del ciclo de vida, algunos de los cuales se listan en la Bibliografía de Consulta. Como lo han expresado diferentes autores, no es fácil comparar los resultados obtenidos de varias fuentes, ya que las suposiciones hechas en cada estudio varían levemente o en forma drástica. De manera que no se intentará presentar un resumen de los mismos.

Conclusión

La información presentada reúne resultados de investigaciones realizadas en el concepto de utilizar la caña de azúcar en forma

integral para producir etanol, empleando, en combinación, tecnologías 1G y 2G. Se enfatizó el aspecto del pretratamiento del bagazo de la caña para modificar física y químicamente su estructura de manera que las enzimas produjeran azúcares fermentables por levaduras. En forma notoria se resaltó el hecho de contar con levaduras, u otros microorganismos, capaces de asimilar hexosas y pentosas en forma simultánea de manera de equiparar el tiempo de fermentación entre las tecnologías 1G y 2G. En forma breve se ilustró sobre posibles compuestos inhibidores de las levaduras en los hidrolizados y la variabilidad de su generación de acuerdo al proceso de tratamiento. El reto principal en la tecnología 2G estriba en procesar la mayor cantidad de sólidos en suspensión que el equipo disponible permita, con el objetivo de obtener una concentración final de etanol similar a la obtenida en la fermentación del jugo.

Bibliografía

- Agbor, V.B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A., Levin, D.B. (2012) *Biomass pretreatment: Fundamentals toward application* Biotechnology Advances 29: 675-685.
- Akhtar, N., Gupta, K., Goyal, D., Goyal, A. (2016) *Recent advances in pretreatment technologies for efficient hydrolysis of lignocellulosic biomass* Environmental Progress and Sustainable Energy 35 (2): 489-511.
- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., Negro, M. J. (2010) *Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review* Bioresource Technology 101 (13): 4851-4861.
- Archambault-Léger, V., Losordo, Z., Lynd, L.R. (2015) *Energy, sugar dilution, and economic analysis of hot water flow-through pre-treatment for producing biofuel from sugarcane residues* Biofuels, Bioproducts and Biorefining 9 (1): 95-108.
- Arenas-Cárdenas, P., López-López, A., Moeller-Chávez, G.E., León-Becerril, E. (2017) *Current Pretreatments of Lignocellulosic Residues in the Production of Bioethanol* Waste and Biomass Valorization 8 (1): 161-181.
- Bezerra, T. L., Ragauskas, A.J. (2016) *A review of sugarcane bagasse for second-generation bioethanol and biopower production* Biofuels, Bioproducts and Biorefining 10 (5): 634-647.
- Biswas, R., Uellendahl, H., Ahring, B.K. (2013) *Conversion of C6 and C5 sugars in undetoxified wet exploded bagasse hydrolysates using Scheffersomyces (Pichia) stipitis CBS6054* AMB Express 3:42.
- Benjamin, Y., García-Aparicio, M.P., Görgens, J.F. (2014a) *Impact of cultivar selection and process optimization on ethanol yield from different varieties of sugarcane* Biotechnology for Biofuels 7: 60.
- Benjamin, Y., Cheng, H., Görgens, J.F. (2014b) *Optimization of Dilute Sulfuric Acid Pretreatment to Maximize Combined Sugar Yield from Sugarcane Bagasse for Ethanol Production* Applied Biochemistry and Biotechnology 172 (2): 610-630.
- Benjamin, Y., Görgens, J.F., Joshi, S.V. (2014c) *Comparison of chemical composition and calculated ethanol yields of sugarcane varieties harvested for two growing seasons* Industrial Crops and Products 58: 133-141.
- Beukes, N., Pletschke, B.I. (2010) *Effect of lime pre-treatment on the synergistic hydrolysis of sugarcane bagasse by hemicellulases* Bioresource Technology 101 (12): 4472-4478.
- Canilha, L., Chandel, A.K., dos Santos Milessi, T.S., Fernandes Antunes, F.A., da Costa Freitas, W.L., Almeida Felipe, M.dG., da Silva, S.S. (2012) *Bioconversion of Sugarcane Biomass into Ethanol: An Overview about Composition, Pretreatment Methods, Detoxification of Hydrolysates, Enzymatic Saccharification, and Ethanol Fermentation* Journal of Biomedicine and Biotechnology Article ID 989572 doi: doi:10.1155/2012/989572.
- Cardona, C.A., Quintero, J.A., Paz, I.C. (2010) *Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives* Bioresource Technology 101 (13): 4754-4766.
- Carvalho, J.L.N., Nogueiro, R.C., Menandro, L.M.S., Bordonal, R.d.O.B., Clovis, D., Cantarella, H., Franco, H.C.J. (2017) *Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review* GCB Bioenergy 9: 1181-1195.
- Chandel, A.K., Kapoor, R.K., Singh, A., Kuhad, R.C. (2007) *Detoxification of sugarcane bagasse hydrolysate improves ethanol production by Candida shehatae NCIM 3501* Bioresource Technology 98: 1947-1950.
- Chandel, A.K., da Silva, S.S., Carvalho, W., Singh, O.V. (2012) *Sugarcane bagasse and leaves: foreseeable biomass of biofuel and bio-products* Journal of Chemical Technology and Biotechnol 87: 11-20.
- Chang, V., Nagwani, M., Holtzapfel, M. (1998) *Lime pretreatment of crop residues bagasse and wheat straw* Applied Biochemistry and Biotechnology 74 (3): 135-159.
- Chiaromonti, D., Prussi, M., Ferrero, S., Oriani, L., Ottonello, P., Torre, P., Cherchi, F. (2012) *Review of pretreatment processes for lignocellulosic ethanol production, and development of an innovative method* Biomass Bioenergy 46: 25-35.
- Devendra, L.P., Kiran Kumar, M., Pandey, A. (2016) *Evaluation of hydrotropic pretreatment on lignocellulosic biomass* Bioresource Technology 213: 350-358.
- Dias, M.O.S., Junqueira, T.L., Cavalett, O., Pavanello, L.G. Cunha, M.P., Jesus, C.D.F., Filho R.M., Bonomi, A. (2013) *Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane* Applied Energy 109: 72-78.
- Farzad, S., Mandegari, M.A., Guo, M., Haigh, K.F., Shah, N., Görgens, J.F. (2017) *Multi-product biorefineries from lignocelluloses: a pathway to revitalisation of the sugar industry?* Biotechnology for Biofuels 10: 87.
- Ferreira-Leitão, V., Cruz-Perrone, C., Rodrigues, J., Machado, A.P., Macrelli, F.S., Zacchi, G. (2010) *An approach to the utilisation of CO₂ as impregnating agent in steam pretreatment of sugar cane bagasse and leaves for ethanol production* Biotechnology for Biofuels 3: 7.
- Fuentes, L., Rabelo, S., Filho, R., Costa, A. (2011) *Kinetics of Lime Pretreatment of Sugarcane Bagasse to Enhance Enzymatic Hydrolysis* Applied Biochemistry and Biotechnology 163 (5): 612-625.
- Galbe, M., Zacchi, G. (2012) *Pretreatment: the key to efficient utilization of lignocellulosic materials* Biomass and Bioenergy 46: 70-78.
- Grimaldi, M.P., Marques, M.P., Laluca, C., Cilli, E.M., Sponchiado, S.R.P. (2015) *Evaluation of lime and hydrothermal pretreatments for efficient enzymatic hydrolysis of raw sugarcane bagasse* Biotechnology for Biofuels 8: 205.
- Gurgel, L.V.A., Pimenta, M.T.B., Curvelo, A.A.d.S. (2014) *Enhancing liquid hot water (LHW) pretreatment of sugarcane bagasse by high pressure carbon dioxide (HP-CO₂)* Industrial Crops and Products 57: 141-149.
- Hendriks, A.T.W.M., Zeeman, G. (2009) *Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass* Bioresource Technology 100 (1): 10-18.
- Hofsetz, K., Silva, M.A. (2012) *Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption* Biomass Bioenergy 46: 564-573.
- Jeoh, T., Cardona, M.J., Karuna, N., Mudinoor, A.R., Nill, J. (2017) *Mechanistic kinetic models of enzymatic cellulose hydrolysis-A review* Biotechnology and Bioengineering 114 (7): 1369-1385.
- Jing, X., Zhang, X., Bao, J. (2009) *Inhibition Performance of Lignocellulose Degradation Products on Industrial Cellulase Enzymes During Cellulose Hydrolysis* Applied Biochemistry and Biotechnology 159: 696-707.
- Kim, Y., Ximenes, E., Mosier, N.S., Ladisch, M.R. (2011) *Soluble inhibitors/deactivators of cellulase enzymes from lignocellulosic biomass* Enzyme and Microbial Technology 48 (4-5): 408-415.
- Kim, M., Day, D.F. (2013) *Enhancement of the Enzymatic Digestibility and Ethanol Production from Sugarcane Bagasse by Moderate Temperature-Dilute Ammonia Treatment* Applied Biochemistry and Biotechnology 171: 1108-1117.

- Kumar, D. Murthy, G.S. (2011) *Impact of pretreatment and downstream processing technologies on economics and energy in cellulosic ethanol production* *Biotechnology for Biofuels* 4: 27.
- Krishnan, C., da Coasta Sousa, L., Jin, M., Chang, L., Dale, B.E., Balan, V. (2010) *Alkali-based AFEX pretreatment for the conversion of sugarcane bagasse and cane leaf residues to ethanol* *Biotechnology and Bioengineering* 107 (3): 441-450.
- Laser, M., Schulman, D., Allen, S.G., Lichwa, J., Antal, M.J., Lynd, L.R. (2002) *A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol* *Bioresource Technology* 81 (1): 33-44.
- Leibbrandt, N.H., Knoetze, J.H., Görgens, J.F. (2011) *Comparing biological and thermochemical processing of sugarcane bagasse: An energy balance perspective* *Biomass and Bioenergy* 35 (5): 2117-2126.
- Mood, S.H., Hossein, A.G., Tabatabaei, M., Salehi Jouzani, G., Najafi, G.H., Gholami, M., Ardjmand, M. (2013) *Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment* *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27: 77-93.
- Nachiappan, B., Fu, Z., Holtzappple, M.T. (2011) *Ammonium carboxylate production from sugarcane trash using long-term air-lime pretreatment followed by mixed-culture fermentation* *Bioresource Technology* 102 (5): 4210-4217.
- Pedersen, M., Meyer, A.S. (2010) *Lignocellulose pretreatment severity - relating pH to biomatrix opening* *New Biotechnology* 27 (6): 739-750.
- Prior, B.A., Day, D.F. (2008) *Hydrolysis of ammonia-pretreated sugar cane bagasse with cellulase, β -glucosidase, and hemicellulase preparations* *Applied Biochemistry and Biotechnology* 146:151-164.
- Rabelo, S.C., Filho, R.M., Costa, A.C. (2008) *A Comparison between Lime and Alkaline Hydrogen Peroxide Pretreatments of Sugarcane Bagasse for Ethanol Production* *Applied Biochemistry and Biotechnology* 148: 45-58.
- Rabelo, S., Filho, R., Costa, A. (2009) *Lime Pretreatment of Sugarcane Bagasse for Bioethanol Production* *Applied Biochemistry and Biotechnology* 153 (1): 139-150.
- Ramos, L.P., da Silva, L., Ballem, A.C., Pitarello, A.P., Chiarello, L.M., Silveira, M.H.L. (2015) *Enzymatic hydrolysis of steam-exploded sugarcane bagasse using high total solids and low enzyme loadings* *Bioresource Technology* 175: 195-202.
- Rastogi, M., Shrivastava, S. (2017) *Recent advances in second generation bioethanol production: An insight to pretreatment, saccharification and fermentation processes* *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80: 330-340.
- Seabra, J.E.A., Tao, L., Chuma, H.L., Macedo, I.C. (2010) *A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering* *Biomass and Bioenergy* 34 (8): 1065-1078.
- Sims, R.E.H., Mabee W., Saddler, J.N., Taylor, M. (2010) *An overview of second generation biofuel technologies* *Bioresource Technology* 101 (6): 1570-1580.
- Singh, R., Shukla, A., Tiwari, S., Srivastava, M. (2014) *A review on delignification of lignocellulosic biomass for enhancement of ethanol production potential* *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32: 713-28.
- Socol, C.R., Porto de Souza Vandenberghe, L., Bianchi Pedroni Medeiros A., Karp, S.G., Buckeridge, M., Pereira Ramos, L., Pitarello A.P., Ferreira-Leitão, V., Fortes Gottschalk, L.M., Ferrara, M.A., Pinto da Silva Bon, E., Pepe de Moraes, L.M., de Amorim Araújo, J., Gonçalves Torres, F.A. (2010) *Bioethanol from lignocelluloses: Status and perspectives in Brazil* *Bioresource Technology* 101 (13): 4820-4825.
- Sun, F.F., Zhao, X., Hong, J., Tang, Y., Wang, L., Sun, H., Li, X., Hu, J. (2016) *Industrially relevant hydrolyzability and fermentability of sugarcane bagasse improved effectively by glycerol organosolv pretreatment* *Biotechnology for Biofuels* 9 (1): 59.
- Tejirian, A., Xu, F. (2011) *Inhibition of enzymatic cellulolysis by phenolic compounds* *Enzyme and Microbial Technology* 48 (3): 239-247.
- Templeton D.W., Sluiter, J.B., Sluiter, A., Payne, C., Crocker, D.P., Tao, L., Wolfrum, E. (2016) *Long-term variability in sugarcane bagasse feedstock compositional methods: sources and magnitude of analytical variability* *Biotechnology for Biofuels* 9: 223.
- Walter, A., Ensinas, A.V. (2010) *Combined production of second-generation biofuels and electricity from sugarcane residues* *Energy* 35 (2): 874-879.
- Wanderley, M.C.d.A., Martín, C., Rocha, G.J.dM., Gouveia, E.R. (2013) *Increase in ethanol production from sugarcane bagasse based on combined pretreatments and fed-batch enzymatic hydrolysis* *Bioresource Technology*, 128: 448-453.
- Wei, W., Wu, S., Xu, S. (2017) *Enhancement of enzymatic saccharification of bagasse by ethanol-based organosolv auto-catalyzed pretreatment* *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 92 (3): 580-587.
- Ximenes, E., Kim, Y., Mosier, N., Dien, B., Ladisch, M. (2010) *Inhibition of cellulases by phenols* *Enzyme and Microbial Technology* 46 (3-4): 170-176.
- Xu, Z., Huang, F. (2014) *Pretreatment Methods for Bioethanol Production* *Applied Biochemistry and Biotechnology* 174: 43-62.
- Zhuang, X., Wang, W., Yu, Q., Qi, W., Wang, Q., Tan, X., Zhou, G., Yuan, Z. (2016) *Liquid hot water pretreatment of lignocellulosic biomass for bioethanol production accompanying with high valuable products* *Bioresource Technology* 199: 68-75.

La producción de etanol del bagazo de caña de azúcar: tecnología 2G

Carlos Rolz

Estudios sobre la generación de electricidad y la producción de etanol 2G en biorefinerías

- Chagas, M.F., Bordonal, R.O., Cavalett, O., Carvalho, J.L.N., Bonomi, A., La Scala, N. (2016) *Environmental and economic impacts of different sugarcane production systems in the ethanol biorefinery* *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 10 (1): p. 89-106.
- Dias, M.O.S., Cunha, M.P., Jesus, C.D.F., Rocha, G.J.M., Pradella, J., Geraldo, C., Rossell, C.E.V., Filho, R.M., Bonomi, A. (2011a) *Second generation ethanol in Brazil: Can it compete with electricity production?* *Bioresource Technology* 102 (19): 8964-8971.
- Dias, M.O.S., Modesto, M., Ensinas, A.V., Nebra, S.A., Filho, R.M., Rossell, C.E.V. (2011b) *Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems* *Energy*, 36 (6): 3691-3703.
- Dias, M.O.S., Junqueira, T.L., Jesus, C.D.F., Rossell, C.E.V., Filho, R.M., Bonomi, A. (2012) *Improving bioethanol production - Comparison between extractive and low temperature fermentation* *Applied Energy* 98: 548-555.
- Ensinas, A.V., Nebra, S.A., Lozano, M.A., Serra, L.M. (2007) *Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane* *Energy Conversion and Management* 48 (11): p. 2978-2987.
- Furlan, F.F., Filho, R.T., Pinto, F.H.B., Costa, C.B.B., Cruz, A.J.G., Giordano, R.L.C., Giordano, R.C. (2013) *Bioelectricity versus bioethanol from sugarcane bagasse: is it worth being flexible?* *Biotechnology for Biofuels* 6: 142.
- Jonker, J.G.G., van der Hilst, F., Junginger, H. M., Cavalett, O., Chagas, M.F., Faaij, A.P.C. (2015) *Outlook for ethanol production costs in Brazil up to 2030, for different biomass crops and industrial technologies* *Applied Energy* 147: 593-610.
- Junqueira, T.L., Chagas, M.F., Gouveia, V.L.R., Rezende, M.C.A.F., Watanabe, M.D.B., Jesus, C.D.F., Cavalett, O., Milanez, A.Y., Bonomi, A. (2017) *Techno-economic analysis and climate change impacts of sugarcane biorefineries considering different time horizons* *Biotechnology for Biofuels* 10 (1) 50.
- Losordo, Z., McBride, J., Rooyen, J.V., Wenger, K., Willies, D., Froehlich, A., Macedo, I., Lynd, L. (2016) *Cost competitive second-generation ethanol production from hemicellulose in a Brazilian sugarcane biorefinery* *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 10 (5): 589-602.
- Luo, L., van der Voet, E., Huppel, G. (2009) *Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil* *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (6-7): 1613-1619.
- Macedo, I.C., Seabra, J.E.A., Silva, J.E.A.R. (2008) *Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020* *Biomass and Bioenergy* 32 (7): 582-595.
- Macrelli, S., Galbe, M., Wallberg, O. (2014) *Effects of production and market factors on ethanol profitability for an integrated first and second generation ethanol plant using the whole sugarcane as feedstock* *Biotechnology for Biofuels* 7: 26.
- Macrelli, S., Mogensen, J., Zacchi, G. (2012) *Techno-economic evaluation of 2nd generation bioethanol production from sugar cane bagasse and leaves integrated with the sugar-based ethanol process* *Biotechnology for Biofuels* 5: 22.
- Ojeda, K., Ávila, O., Suárez, J., Kafarov, V. (2011) *Evaluation of technological alternatives for process integration of sugarcane bagasse for sustainable biofuels production-Part 1* *Chemical Engineering Research and Design* 89 3: 270-279.
- Petersen, A.M., Aneke, M.C., Görgens, J.F. (2014) *Techno-economic comparison of ethanol and electricity coproduction schemes from sugarcane residues at existing sugar mills in Southern Africa* *Biotechnology for Biofuels* 7: 105.
- Quintero, J.A., Moncada, J., Cardona, C.A. (2013) *Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic residues in Colombia: A process simulation approach* *Bioresource Technology* 139: 300-307.
- Rabelo, S.C., Carrere, H., Maciel Filho, R., Costa, A. C. (2011) *Production of bioethanol, methane and heat from sugarcane bagasse in a biorefinery concept* *Bioresource Technology* 102 (17): 7887-7895.
- Sánchez, Ó.J., Cardona, C.A. (2012) *Conceptual design of cost-effective and environmentally-friendly configurations for fuel ethanol production from sugarcane by knowledge-based process synthesis* *Bioresource Technology* 104: 305-314.
- Santos, V.E.N., Ely, R.N., Szklo, A.S., Magrini, A. (2016) *Chemicals, electricity and fuels from biorefineries processing Brazil's sugarcane bagasse: Production recipes and minimum selling prices* *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53: 1443-1458.
- Sarrouh, B.F., Silva, S.S., Santos, D.T., Converti, A. (2007) *Technical/Economical Evaluation of Sugarcane Bagasse Hydrolysis for Bioethanol Production* *Chemical Engineering and Technology* 30 (2): 270-275.
- Seabra, J.E.A., Macedo, I.C. (2011) *Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil* *Energy Policy* 39 (1): p. 421-428.
- Seabra, J.E.A., Tao, L., Chum, H.L., Macedo, I.C. (2010) *A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering* *Biomass and Bioenergy* 34 (8): 1065-1078.
- Walter, A., Ensinas, A.V. (2010) *Combined production of second-generation biofuels and electricity from sugarcane residues* *Energy* 35 (2): 874-879.

Estudios sobre el pretratamiento del bagazo: hidro-térmico

- Aguar, R.S., Silveira, M.H.L., Pitarello, A.P., Corazza, M.L., Ramos, L.P. (2013) *Kinetics of enzyme-catalyzed hydrolysis of steam-exploded sugarcane bagasse* *Bioresource Technology* 147: 416-423.
- Allen, S.G., Kam, L.C., Zemann, A.J., Antal Jr. M.J. (1996) *Fractionation of sugarcane with hot, compressed, liquid water* *Industrial Engineering Chemistry Research* 35 (8): 2709-2715.

- Archambault-Leger, V., Shao, X., Lynd, L.R. (2012) *Integrated analysis of hydrothermal flow through pretreatment* *Biotechnology for Biofuels* 5:49.
- Biswas, R., Uellendahl, H., Ahring, B.K. (2014) *Wet explosion pretreatment of sugarcane bagasse for enhanced enzymatic hydrolysis* *Biomass and Bioenergy* 61: 104-113.
- Boussarsar, H., Rogé, B., Mathlouthi, M. (2009) *Optimization of sugarcane bagasse conversion by hydrothermal treatment for the recovery of xylose* *Bioresource Technology* 100 (24): 6537-6542.
- Chiarello, L.M., Ramos, C.E.A., Neves, P.V., Ramos, L.V. (2016) *Production of cellulosic ethanol from steam-exploded Eucalyptus urograndis and sugarcane bagasse at high total solids and low enzyme loadings* *Sustainable Chemical Processes* 4 (1): p. 15.
- Corrales, R.C.N.R., Mendes, F.M.T., Cruz Perrone, C., Sant'Anna, C., de Souza, W., Abud, Y., da Silva Bon, E.P., Ferreira-Leitão, V.F. (2012) *Structural evaluation of sugar cane bagasse steam pretreated in the presence of CO₂ and SO₂* *Biotechnology for Biofuels* 5: 36.
- da Cruz, S.H., Dien, B.S., Nichols, N.N., Saha, B.C., Cotta, M.A. (2012) *Hydrothermal pretreatment of sugarcane bagasse using response surface methodology improves digestibility and ethanol production by SSF* *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 39: 439-447.
- Ewanick, S., Bura, R. (2011) *The effect of biomass moisture content on bioethanol yields from steam pretreated switchgrass and sugarcane bagasse* *Bioresource Technology* 102 (3): 2651-2658.
- Ferrara, M., Bon, E., Neto, J. (2002) *Use of steam explosion liquor from sugar cane bagasse for lignin peroxidase production by Phanerochaete chrysosporium* *Applied Biochemistry and Biotechnology* 98-100 (1): 289-300.
- Fockink, D.H., Urio, M.B., Sánchez, J.H., Ramos, L.P., (2017) *Enzymatic Hydrolysis of Steam-Treated Sugarcane Bagasse: Effect of Enzyme Loading and Substrate Total Solids on Its Fractal Kinetic Modeling and Rheological Properties* *Energy & Fuels* 31 (6): 6211-6220.
- Glasser, W.G., Wright, R.S. (1998) *Steam-assisted Biomass Fractionation. II. Fractionation Behavior of various biomass resources* *Biomass and Bioenergy* 14 (3): 219-235.
- Hongdan, Z., Shaohua, X. Shubin, W. (2013) *Enhancement of enzymatic saccharification of sugarcane bagasse by liquid hot water pretreatment* *Bioresource Technology* 143: 391-396.
- Kaar, W.E., Gutierrez, C.V., Kinoshita, C.M. (1998) *Steam explosion of sugarcane bagasse as a pretreatment for conversion to ethanol* *Biomass and Bioenergy* 14 (3): 277-287.
- Kling, S.H., Carvalho Neto, C., Ferrara, M.A., Torres, J.C.R., Magalhaes, D.B., Ryu, D.D.Y. (1987) *Enhancement of enzymatic hydrolysis of sugar cane bagasse by steam explosion pretreatment* *Biotechnology and Bioengineering* 29 (8): 1035-1039.
- Lei, Y., Liu, S., Li, J., Sun, R. (2010) *Effect of hot-water extraction on alkaline pulping of bagasse* *Biotechnology Advances* 28 (5): 609-612.
- Li, J., Wu, K., Xiao, W., Zhang, J., Lin, J., Gong, Y., Liu, Z. (2014) *Effect of antioxidant extraction on the enzymatic hydrolysis and bioethanol production of the extracted steam-exploded sugarcane bagasse* *Biochemical Engineering Journal* 82: 91-96.
- Martín, C., Galbe, M., Nilvebrant, N.-O., Jönsson, L. (2002) *Comparison of the fermentability of enzymatic hydrolyzates of sugarcane bagasse pretreated by steam explosion using different impregnating agents* *Applied Biochemistry and Biotechnology* 98-100 (1):699-716.
- Martin, C., Gonzalez, Y., Fernandez, T., Thomsen, A.B. (2006) *Investigation of cellulose convertibility and ethanolic fermentation of sugarcane bagasse pretreated by wet oxidation and steam explosion* *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 81: 1669-1677.
- Martin, C., Marcet, M., Thomsen, A.B. (2008) *Comparison between wet oxidation and steam explosion as pretreatment methods for enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse* *Bioresources* 3 (3): 670-683.
- Morjanoff, P.J., Gray, P.P. (1987) *Optimization of steam explosion as a method for increasing susceptibility of sugarcane bagasse to enzymatic saccharification* *Biotechnology and Bioengineering* 29 (6): 733-741.
- Neves, P.V., Pitarello, A.P., Ramos, L.P. (2016) *Production of cellulosic ethanol from sugarcane bagasse by steam explosion: Effect of extractives content, acid catalysis and different fermentation technologies* *Bioresource Technology* 208: 84-194.
- Oliveira, F.M.V., Pinheiro, I.O., Souto-Maior, A.M., Martin, C., Gonçalves, A.R., Rocha, G.J.M. (2013) *Industrial-scale steam explosion pretreatment of sugarcane straw for enzymatic hydrolysis of cellulose for production of second generation ethanol and value-added products* *Bioresource Technology* 130: 168-173.
- Pal, S., Joy, S. Kumbhar, P., Trimukhe, K.D., Gupta, R., Kuhad, R.C., Varma, A.J., Padmanabhan, S. (2017) *Pilot-scale pretreatments of sugarcane bagasse with steam explosion and mineral acid, organic acid, and mixed acids: synergies, enzymatic hydrolysis efficiencies, and structure-morphology correlations* *Biomass Conversion and Biorefinery* 7 (2): 179-189.
- Playne, M.J. (1984) *Increased Digestibility of Bagasse by Pretreatment with Alkaline and Steam Explosion* *Biotechnology and Bioengineering* 26: 426-433.
- Ramos, L.P., da Silva, L., Ballem, A.C., Pitarello, A.P., Chiarello, L.M., Silveira, M.H.L. (2015) *Enzymatic hydrolysis of steam-exploded sugarcane bagasse using high total solids and low enzyme loadings* *Bioresource Technology* 175: 195-202.
- Rocha, G.J.M., Gonçalves, A.R., Oliveira, B.R., Olivares, E.G., Rossell, C.E.V. (2012) *Steam explosion pretreatment reproduction and alkaline delignification reactions performed on a pilot scale with sugarcane bagasse for bioethanol production* *Industrial Crops and Products* 35 (1): 274-279.
- Rocha, G.J.M., Silva, V.F.N., Martin, C., Gonçalves, A.R., Nascimento, V.M., Souto-Maior, A.M. (2013) *Effect of Xylan and Lignin Removal by Hydrothermal Pretreatment on Enzymatic Conversion of Sugarcane Bagasse Cellulose for Second Generation Ethanol Production* *Sugar Technology* 15 (4): 390-398.
- Rudolf, A., Baudel, H., Zacchi, G., Hahn-Hägerdal, B., Lidén, G. (2008) *Simultaneous saccharification and fermentation of steam-pretreated bagasse using Saccharomyces cerevisiae TMB3400 and Pichia stipitidis CBS6054* *Biotechnology and Bioengineering* 99 (4): 783-790.
- Sasaki, M., Adschiri, T., Arai, K. (2003) *Fractionation of sugarcane bagasse by hydrothermal treatment* *Bioresource Technology* 86 (3): 301-304.
- Saska, M., Ozer, E. (1995) *Aqueous extraction of sugarcane bagasse hemicellulose and production of xylose syrup* *Biotechnology and Bioengineering* 45 (6): 517-523.
- Schultz, T.P., Templeton, M.C., Biermann, C.J., McGinnis, G.D. (1984) *Steam explosion of mixed hardwood chips, rice hulls, corn stalks and sugar cane bagasse* *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 32 (5): 1166-1172.
- Silva, V.F.N., Arruda, P.V., Felipe, M.G.A., Gonçalves, A.R., Rocha, G.J.M. (2011) *Fermentation of cellulosic hydrolyzates obtained by enzymatic saccharification of sugarcane bagasse pretreated by hydrothermal processing* *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 38: 809-817.
- Singh, R., Varma, A. J., Seeta Laxman, R., Rao, M. (2009) *Hydrolysis of cellulose derived from steam exploded bagasse by Penicillium cellulases: Comparison with commercial cellulase* *Bioresource Technology* 100 (24): 6679-6681.
- Soares, I.B., Travassos, J. A., Baudel, H. M., Benachour, M., Abreu, C. A. M. (2011) *Effects of washing, milling and loading enzymes on the enzymatic hydrolysis of a steam pretreated sugarcane bagasse* *Industrial Crops and Products* 33 (3): 670-675.
- van der Pol, E., Bakker, R., van Zeeland, A., Sanchez Garcia, D., Punt, A., Eggink, G. (2015) *Analysis of by-product formation and sugar monomerization in sugarcane bagasse pretreated at pilot plant scale: Differences between autohydrolysis, alkaline and acid pretreatment* *Bioresource Technology* 181: 114-123.
- Wang, Q., Liu, S., Yang, G., Chen, J. (2014) *Characterization of High-Boiling-Solvent Lignin from Hot-Water-Extracted Bagasse* *Energy Fuels* 28: 3167-3171.
- Wang, W., Zhuang, X., Yuan, Z., Yu, Q., Qi, W., Wang, Q., Tan, X. (2012) *Effect of structural changes on enzymatic hydrolysis of eucalyptus, sweet sorghum bagasse and sugar cane bagasse after liquid hot water treatment* *Bioresources* 7 (2): 2469-2482.
- You, Y., Ziyuan Zhou, Z., Zhao, P., Bu, L., Jiang, J., Zhang, W. (2016) *Comparison of pretreatment methods for production of ethanol from sugarcane bagasse* *Bioresources* 11 (1): 2297-2307.

- Yu, Q., Xu, Ch., Zhuang, X., Yuan, Z., He, M., Zhou, G. (2015) Xylo-oligosaccharides and ethanol production from LHW hydrolysate of sugarcane bagasse *Bioresources* 10 (1): 30-40.
- Yu, Q., Zhuang, X., Lv, S., He, M., Zhang, Y., Yuan, Z., Qi, W., Wang, Q., Wang, W., Tan, X. (2013a) Liquid hot water pretreatment of sugarcane bagasse and its comparison with chemical pretreatment methods for the sugar recovery and structural changes *Bioresource Technology* 129: 592-598.
- Zeng, J., Tong, Z., Wang, L., Zhu, J.Y., Ingram, L. (2014) Isolation and structural characterization of sugarcane bagasse lignin after dilute phosphoric acid plus steam explosion pretreatment and its effect on cellulose hydrolysis *Bioresource Technology* 154: 274-281.
- Zhuang, X., Yu, Q., Yuan, Z., Kong, X., Wei, Q. (2015) Effect of hydrothermal pretreatment of sugarcane bagasse on enzymatic digestibility *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 90 (8): 1515-1520.
- Estudios sobre el pretratamiento del bagazo: Soluciones diluidas de ácidos inorgánicos y/o compuestos alcalinos**
- Aguilar, R., Ramírez, J., Garrote, G., Vázquez, M. (2002) Kinetic study of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse *Journal of Food Engineering* 55 (4): 309-318.
- Brienza, M., Tyhoda, L., Benjamin, Y., Görgens, J. (2017) Influence of pretreatment severity on structural changes, lignin content and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse samples *Renewable Energy* 104: 271-280.
- Bustos, G., Ramírez, J., Garrote, G., Vázquez, M. (2003) Modeling of the hydrolysis of sugar cane bagasse with hydrochloric acid *Applied Biochemistry and Biotechnology* 104 (1) 51-68.
- Canilha, L., Santos, V.T.O., Rocha, G.J.M., Almeida e Silva, J.B., Giulietti, M., Silva, S.S., Felipe, M.G.A., Ferraz, A., Milagres, A.M.F., Carvalho, W. (2011) A study on the pretreatment of a sugarcane bagasse sample with dilute sulfuric acid *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 38: 1467-1475.
- Carvalho, D.M.d., Sevastyanova, O., Queiroz, J.H.d., Colodette, J.L. (2016) Cold alkaline extraction as a pretreatment for bioethanol production from eucalyptus, sugarcane bagasse and sugarcane straw *Energy Conversion and Management* 124: 315-324.
- Chandel, A.K., Antunes, F.A.F., Silva, M.B., da Silva, S.S. (2013) Unraveling the structure of sugarcane bagasse after soaking in concentrated aqueous ammonia (SCAA) and ethanol production by *Scheffersomyces (Pichia) stipitidis* *Biotechnology for Biofuels* 6: 102.
- Chen, W.-H., Tu, Y.-J., Sheen, H.-K. (2011) Disruption of sugarcane bagasse lignocellulosic structure by means of dilute sulfuric acid pretreatment with microwave-assisted heating *Applied Energy* 88 (8): 2726-2734.
- de Vasconcelos, S.M., Santos, A.M.P., Rocha, G.J.M., Souto-Maior, A.M. (2013) Diluted phosphoric acid pretreatment for production of fermentable sugars in a sugarcane-based biorefinery *Bioresource Technology* 135: 46-52.
- Diedericks, D., van Rensburg, E., del Prado García-Aparicio, M., Görgens, J.F. (2012) Enhancing the enzymatic digestibility of sugarcane bagasse through the application of an ionic liquid in combination with an acid catalyst *Biotechnology Progress* 28 (1): 76-84.
- Diedericks, D., van Rensburg, E., Görgens, J.F. (2013) Enhancing sugar recovery from sugarcane bagasse by kinetic analysis of a two-step dilute acid pretreatment process *Biomass and Bioenergy* 57: 149-160.
- Fu, Z., Holtzapfel, M.T. (2010) Anaerobic mixed-culture fermentation of aqueous ammonia-treated sugarcane bagasse in consolidated bioprocessing *Biotechnology and Bioengineering* 106 (2): 216-227.
- Gamez, S., Gonzalez-Cabriales, J.J., Ramirez, J.A., Garrote, G., Vazquez, M. (2006) Study of the hydrolysis of sugar cane bagasse using phosphoric acid *Journal of Food Engineering* 74: 78-88.
- Gao, Y., Xu, J., Yuan, Z., Zhang, Y., Liu, Y. Liang, C. (2014) Ethanol production from high solids loading from alkali pretreated sugarcane bagasse with an SSF process *Bioresources* 9 (2): 3466-3479.
- Geddes, C.C., Peterson, J. J., Roslander, C., Zacchi, G., Mullinnix, M. T., Shanmugam, K. T., Ingram, L. O. (2010) Optimizing the saccharification of sugar cane bagasse using dilute phosphoric acid followed by fungal cellulases *Bioresource Technology* 101 (6): 1851-1857.
- Giese, E.C., Pierozzi, M., Dussan, K.J., Chandel, A.K., da Silva, S.S. (2013) Enzymatic saccharification of acid-alkali pretreated sugarcane bagasse using commercial enzyme preparations *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 88: 1266-1272.
- Greenwood, A.A., Farrell, T.W., O'Hara, I.M. (2013) Understanding Mild Acid Pretreatment of Sugarcane Bagasse Through Particle Scale Modeling *Biotechnology Bioengineering* 110: 3114-3125.
- Ju, Y.-H., Huynh, L.-H., Kasim, N.S., Guo, T.-J., Wang, J.-H. Fazary, A.E. (2011) Analysis of soluble and insoluble fractions of alkali and subcritical water treated sugarcane bagasse *Carbohydrate Polymers* 83 (2): 591-599.
- Kim, I.J., Lee, H.J., Kim, K.H. (2017) Pure enzyme cocktails tailored for the saccharification of sugarcane bagasse pretreated by using different methods *Process Biochemistry* 57: 167-174.
- Kumar, S., Dheeran, P., Singh, S.P., Mishra, I.M., Adhikari, D.K. (2015) Kinetic studies of two-stage sulphuric acid hydrolysis of sugarcane bagasse *Renewable Energy* 83: 850-858.
- Kurakake, M., Kisaka, W., Ouchi, K., Komaki, T., (2001) Pretreatment with Ammonia Water for Enzymatic Hydrolysis of Corn Husk, Bagasse, and Switchgrass *Applied Biochemistry and Biotechnology* 90: 251-259.
- Lavarack, B.P., Griffin, G.J., Rodman, D. (2002) The acid hydrolysis of sugarcane bagasse hemicellulose to produce xylose, arabinose, glucose and other products *Biomass and Bioenergy* 23 (5): 367-380.
- Li, J., Zhou, P., Liu, H., Wu, K., Kang, X., Gong, Y., Xiao, W., Lin, J., Liu, Z. (2014) A comparison of fermentation strategies for cellulosic ethanol production from NaOH-soaked sugarcane bagasse at high solid loading with decreased cellulase loading *Industrial Crops and Products* 62: 446-452.
- Li, J., Zhou, P., Liu, H., Xiong, C., Lin, J., Xiao, W., Gong, Y., Liu, Z. (2014) Synergism of cellulase, xylanase, and pectinase on hydrolyzing sugarcane bagasse resulting from different pretreatment technologies *Bioresource Technology* 155: 258-265.
- Liu, Y., Zhang, Y., Xu, J., Sun, Y., Yuan, Z., Xie, J. (2015) Consolidated bioprocess for bioethanol production with alkali-pretreated sugarcane bagasse *Applied Energy* 157: 517-522.
- Maeda, R.N., Serpa, V.I., Rocha, V.A.L., Mesquita, R.A.A.A., de Castro, L.M.M.S., Driemeier, C.E., Pereira Jr, N., Polikarpov, I. (2011) Enzymatic hydrolysis of pretreated sugar cane bagasse using *Penicillium funiculosum* and *Trichoderma harzianum* cellulases *Process Biochemistry* 46 (5): 1196-1201.
- Mesa, L., González, E., Romero, I., Ruiz, E., Cara, C., Castro, E. (2011) Comparison of process configurations for ethanol production from two-step pretreated sugarcane bagasse *Chemical Engineering Journal* 175:185-191.
- Mesa, L., Martínez, Y., Barrio, E., González, E. (2017) Desirability function for optimization of Dilute Acid pretreatment of sugarcane straw for ethanol production and preliminary economic analysis based in three fermentation configurations *Applied Energy* 198: 299-311.
- Monavari, S., Galbe, M., Zacchi, G. (2011) Influence of impregnation with lactic acid on sugar yields from steam pretreatment of sugarcane bagasse and spruce, for bioethanol production *Biomass and Bioenergy* 35: 3115-3122.
- Monte, J.R., Brienza, M., Milagres, A.M.F. (2011) Utilization of pineapple stem juice to enhance enzyme-hydrolytic efficiency for sugarcane bagasse after an optimized pre-treatment with alkaline peroxide *Applied Energy* 88 (1): 403-408.
- Mouta, R.O., Chandel, A.K., Rodrigues, R.C.L.B., Silva, M.B., Rocha, G.J.M., Silva, S.S. (2012) Statistical Optimization of Sugarcane Leaves Hydrolysis into Simple Sugars by Dilute Sulfuric Acid Catalyzed Process *Sugar Technology* 14 (1): 53-60.
- Neureiter, M., Danner, H., Thomasser, C., Saidi, B., Braun, R. (2002) Dilute-Acid Hydrolysis of Sugarcane Bagasse at Varying Conditions *Applied Biochemistry and Biotechnology* 98-100: 49-58.
- Oladi, S., Aita, G.M. (2017) Optimization of liquid ammonia pretreatment variables for maximum enzymatic hydrolysis yield of energy cane bagasse *Industrial Crops and Products* 103: 122-132.

- Pal, S., Joy, S., Kumbhar, P., Trimukhe, K.D., Varma, A.J., Padmanabhan, S. (2016) *Effect of Mixed Acid Catalysis on Pretreatment and Enzymatic Digestibility of Sugar Cane Bagasse Energy Fuels* 30: 7310-7318.
- Patel, H., Chapla, D., Shah, A. (2017) *Bioconversion of pretreated sugarcane bagasse using enzymatic and acid followed by enzymatic hydrolysis approaches for bioethanol production Renewable Energy* 109: 323-331.
- Rabelo, S.C., Amezquita Fonseca, N.A., Andrade, R.R., Filho, R.M., Costa, A.C. (2011) *Ethanol production from enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse pretreated with lime and alkaline hydrogen peroxide Biomass and Bioenergy* 35: 2600-2607.
- Ramadoss, G., Muthukumar, K. (2014) *Ultrasound assisted ammonia pretreatment of sugarcane bagasse for fermentable sugar production Biochemical Engineering Journal*, 2014. 83(0): p. 33-41.
- Rezende, C., de Lima, M.A., Maziero, P., de Azevedo E.R., Garcia, W., Polikarpov, I. (2011) *Chemical and morphological characterization of sugarcane bagasse submitted to a delignification process for enhanced enzymatic digestibility Biotechnology for Biofuels* 4 (1): 1-19.
- Rocha, G.J.d.M., Martin, C., Soares, I.B., Souto Maior, A.M., Baudel, H.M., Moraes de Abreu, C.A. (2011) *Dilute mixed-acid pretreatment of sugarcane bagasse for ethanol production Biomass and Bioenergy* 35 (1): 663-670.
- Rodrigues, R.d.C.L.B., Rocha, G.J.M., Rodrigues Jr, D., Filho, H.J.I., Felipe, M.d.G.A., Pessoa Jr, A. (2010) *Scale-up of diluted sulfuric acid hydrolysis for producing sugarcane bagasse hemicellulosic hydrolysate (SBHH) Bioresource Technology* 101 (4): 1247-1253.
- Rodríguez-Chong, A., Ramírez, J.A., Garrote, G., Vázquez, M. (2004) *Hydrolysis of sugar cane bagasse using nitric acid: a kinetic assessment Journal of Food Engineering* 61 (2): 143-152.
- Santos, V.T.O., Esteves, P.J., Milagres, A.M.F., Carvalho, W. (2011) *Characterization of commercial celluloses and their use in the saccharification of a sugarcane bagasse sample pretreated with dilute sulfuric acid Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 38: 1089-1098.
- Santos, J.R.A., Lucena, M.S., Gusmão, N.B., Gouveia, E.R. (2012) *Optimization of ethanol production by Saccharomyces cerevisiae UFPEDA 1238 in simultaneous saccharification and fermentation of delignified sugarcane bagasse Industrial Crops and Products* 36 (1): 584-588.
- Santosh, I., Ashtavinayak, P., Amol, D., Sanjay, P. (2017) *Enhanced bioethanol production from different sugarcane bagasse cultivars using co-culture of Saccharomyces cerevisiae and Scheffersomyces (Pichia) stipitis Journal of Environmental Chemical Engineering* 5 (3): 2861-2868.
- Silva, S.S., Matos, Z.R., Carvalho, W. (2005) *Effect of sulfuric acid loading and residence time on the composition of sugarcane bagasse hydrolysate and its use as a source of xylose for xylitol production Biotechnology Progress* 21 (5): 1449-1452.
- Sindhu, R., Binod, P., Satyanagalakshmi, K., Janu, K., Sajna, K., Kurien, N., Sukumaran, R., Pandey, A. (2010) *Formic Acid as a Potential Pretreatment Agent for the Conversion of Sugarcane Bagasse to Bioethanol Applied Biochemistry and Biotechnology* 162 (8): 2313-2323.
- Sindhu, R., Kuttiraja, M., Binod, P., Janu, K.U., Sukumaran, R.K., Pandey, A. (2011) *Dilute acid pretreatment and enzymatic saccharification of sugarcane tops for bioethanol production Bioresource Technology* 102 (23): 10915-10921.
- Soares, M.L., Gouveia, E.R. (2013) *Influence of the alkaline delignification on the simultaneous saccharification and fermentation (SSF) of sugar cane bagasse Bioresource Technology* 147: p. 645-648.
- Teixeira, L., Linden, J., Schroeder, H. (2000) *Simultaneous saccharification and cofermentation of peracetic acid-pretreated biomass Applied Biochemistry and Biotechnology* 84-86 (1): 111-127.
- Teixeira, L., Linden, J., Schroeder, H., (1999) *Optimizing peracetic acid pretreatment conditions for improved simultaneous saccharification and co-fermentation (SSCF) of sugar cane bagasse to ethanol fuel Renewable Energy* 16 (1-4): 1070-1073.
- Teramoto, Y., Lee, S.-H., Endo, T. (2009) *Cost reduction and feedstock diversity for sulfuric acid-free ethanol cooking of lignocellulosic biomass as a pretreatment to enzymatic saccharification Bioresource Technology* 100 (20): 4783-4789.
- Torres da Silva, G., Chiarello, L.M., Lima, E.M., Ramos, L.P. (2016) *Sono-assisted alkaline pretreatment of sugarcane bagasse for cellulosic ethanol production Catalysis Today* 269: 21-28.
- Tu, Q., Fu, S., Zhan, H., Chai, X., Lucia, L.A. (2008) *Kinetic modeling of formic acid pulping of bagasse Journal of Agriculture and Food Chemistry* 56: 3097-3101.
- Velmurugan, R., Muthukumar, K. (2011) *Utilization of sugarcane bagasse for bioethanol production: Sono-assisted acid hydrolysis approach Bioresource Technology* 102 (14): 7119-7123.
- Wu, L., Li, Y., Arakane, M., Ike, M., Wada, M., Terajima, Y., Ishikawa, S., Tokuyasu, K. (2011) *Efficient conversion of sugarcane stalks into ethanol employing low temperature alkali pretreatment method Bioresource Technology* 102 (24): 11183-11188.
- Yu, Q., Zhuang, X., Yuan, Z., Qi, W., Wang, W., Wang, Q., Tan, X. (2013b) *Pretreatment of sugarcane bagasse with liquid hot water and aqueous ammonia Bioresource Technology* 144: 210-215.
- Zhao, X., Song, Y., Liu, D. (2011) *Enzymatic hydrolysis and simultaneous saccharification and fermentation of alkali/peracetic acid-pretreated sugarcane bagasse for ethanol and 2,3-butanediol production Enzyme and Microbial Technology* 49: 413-419.
- Zhao, X., Wu, R., Liu, D. (2011) *Production of pulp, ethanol and lignin from sugarcane bagasse by alkali-peracetic acid delignification Biomass and Bioenergy* 35 (7): 2874-2882.
- Zhao, X.-B., Wang, L., Liu, D.-H. (2007) *Effect of several factors on peracetic acid pretreatment of sugarcane bagasse for enzymatic hydrolysis Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 82: 1115-1121.
- Zhao, X.-B., Wang, L., Liu, D.-H. (2008) *Peracetic acid pretreatment of sugarcane bagasse for enzymatic hydrolysis: a continued work Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 83 (6): 950-956.
- Zhu, Z.-S., Zhu, M.-J., Xu, W.-X., Liang, L. (2012) *Production of Bioethanol from Sugarcane Bagasse Using NH₄OH-H₂O₂ Pretreatment and Simultaneous Saccharification and Co-fermentation Biotechnology and Bioprocess Engineering* 17: 316-325.

Estudios sobre el pretratamiento del bagazo: organosolv

- Huang, Q., Yan, Q., Fu, J., Xiong, C., Lin, J., Liu, Z. (2016) *Comparative study of different alcoholate pretreatments for enhanced enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse Bioresource Technology* 211: 464-471.
- Martin, C., Puls, J., Saake, B., Schreiber, A. (2011) *Effect of glycerol pretreatment on component recovery and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse Cellulose Chemistry and Technology* 45 (7-8) 487-494.
- Mesa, L., González, E., Ruiz, E., Romero, I., Cara, C., Felissia, F., Castro, E. (2010) *Preliminary evaluation of organosolv pre-treatment of sugar cane bagasse for glucose production: Application of 2³ experimental design Applied Energy* 87 (1): 109-114.
- Mesa, L., González, E., Cara, C., Ruiz, E., Castro, E., Mussatto, S.I. (2010) *An approach to optimization of enzymatic hydrolysis from sugarcane bagasse based on organosolv pretreatment Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 85: 1092-1098.
- Mesa, L., González, E., Cara, C., González, M., Castro, E., Mussatto, S.I. (2011) *The effect of organosolv pretreatment variables on enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse Chemical Engineering Journal* 168 (3): 1157-1162.
- Novo, L.P., Gurgel, L.V.A., Marabezi, K., Curvelo, A.A.d.S. (2011) *Delignification of sugarcane bagasse using glycerol and water mixtures to produce pulps for saccharification Bioresource Technology* 102 (21): 10040-10046.
- Pasquini, D., Pimenta, M.T.B., Ferreira, L.H., Curvelo, A.A.d.S. (2005) *Sugar cane bagasse pulping using supercritical CO₂ associated with co-solvent 1-butanol/water Journal of Supercritical Fluids* 34: 125-131.
- Pasquini, D., Pimenta, M.T.B., Ferreira, L.H., Curvelo, A.A.d.S. (2005) *Extraction of lignin from sugar cane bagasse and Pinus taeda wood chips using ethanol-water mixtures and carbon dioxide at high pressures Journal of Supercritical Fluids* 36: 31-39.

- Rezayati-Charani, P., Mohammadi-Rovshandeh, J. (2005) *Effect of pulping variables with dimethyl formamide on the characteristics of bagasse-fiber* *Bioresource Technology* 96: 1658-1669.
- Saad, M.B.W., Oliveira, L. R. M., Cândido, R.G., Quintana, G., Rocha, G.J.M., Gonçalves, A.R. (2008) *Preliminary studies on fungal treatment of sugarcane straw for organosolv pulping* *Enzyme and Microbial Technology* 43 (2): 220-225.
- Terán-Hilares, R., Pereira Swets, M., Ahmed, M.A., Ramos, L., da Silva, S.S., Santos, J.C. (2017) *Organosolv pretreatment of sugar cane bagasse for bioethanol production* *Industrial and Engineering Chemistry Research* 56: 3833-3838.
- Vallejos, M.E., Zambon, M.D., Area, M.C., Curvelo, A.A.d.S. (2015) *Low liquid-solid ratio fractionation of sugarcane bagasse by hot water autohydrolysis and organosolv delignification* *Industrial Crops and Products* 65: 349-353.
- You, Y., Li, P., Lei, F., Xing, Y., Jiang, J. (2017) *Enhancement of ethanol production from green liquor-ethanol-pretreated sugarcane bagasse by glucose-xylose cofermentation at high solid loadings with mixed *Saccharomyces cerevisiae* strains* *Biotechnology for Biofuels* 10: 92.
- Yu, H., You, Y., Lei, F., Liu, Z., Zhang, W., Jiang, J. (2014) *Comparative study of alkaline hydrogen peroxide and organosolv pretreatments of sugarcane bagasse to improve the overall sugar yield* *Bioresource Technology* 187: 161-166.
- Zhang, Z., Wong, H.H., Albertson, P., Doherty, W.O.S., O'Hara, I.M. (2013) *Laboratory and pilot scale pretreatment of sugarcane bagasse by acidified aqueous glycerol solutions* *Bioresource Technology* 138: 14-21.
- Zhang, Z., Wong, H.H., Albertson, P., Harrison, M.D., Doherty, W.O.S., O'Hara, I.M. (2013) *Effects of glycerol on enzymatic hydrolysis and ethanol production using sugarcane bagasse pretreated by acidified glycerol solution* *Bioresource Technology* 192: 367-373.
- Zhang, Z., O'Hara, I.M., Rackemann, D.W., Doherty, W.O.S. (2013) *Low temperature pretreatment of sugarcane bagasse at atmospheric pressure using mixtures of ethylene carbonate and ethylene glycol* *Green Chemistry* 15: 255-264.
- Zhang, H., Wu, S. (2014) *Efficient Sugar Release by Acetic Acid Ethanol-Based Organosolv Pretreatment and Enzymatic Saccharification* *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 62 (48): 11681-11687.
- Mendes, F.M., Siqueira, G., Carvalho, W., Ferraz, A., Milagres, A.M.F. (2011) *Enzymatic hydrolysis of chemithermomechanically pretreated sugarcane bagasse and samples with reduced initial lignin content* *Biotechnology Progress* 27 (2): 395-401.
- Mendes, F.M., Laurito, D.F., Bazzeggio, M., Ferraz, A., Milagres, A.M.F. (2013) *Enzymatic digestion of alkaline-sulfite pretreated sugar cane bagasse and its correlation with the chemical and structural changes occurring during the pretreatment step* *Biotechnology Progress* 29 (4): 890-895.
- Mendes, F.M., Fonseca, M.B., Ferraz, A., Milagres, A.M.F. (2016) *Anatomic and Ultrastructural Characteristics of Different Regions of Sugar Cane Internodes Which Affect Their Response to Alkaline-Sulfite Pretreatment and Material Recalcitrance* *Energy and Fuels* 30 (2): 1078-1084.
- Morando, L.E.N., Domínguez Gómez, C.X., López Zamora, L., Aguilar Uscanga, Ma.G. (2014) *Statistical optimization of alkaline hydrogen peroxide pretreatment of sugarcane bagasse for enzymatic saccharification with Tween 80 using response surface methodology* *Biomass Conversion and Biorefinery* 4: 15-23.
- Rabelo, S.C., Filho, R.M., Costa, A.C. (2008) *A Comparison between Lime and Alkaline Hydrogen Peroxide Pretreatments of Sugarcane Bagasse for Ethanol Production* *Applied Biochemistry and Biotechnology* 148: 45-58.
- Rabelo, S.C., Amezquita Fonseca, N.A., Andrade, R.R., Maciel Filho, R., Costa, A.C. (2011) *Ethanol production from enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse pretreated with lime and alkaline hydrogen peroxide* *Biomass and Bioenergy* 35: 2600-2607.
- Rabelo, S.C., Andrade, R.R., Maciel Filho, R., Costa, A.C. (2014) *Alkaline hydrogen peroxide pretreatment, enzymatic hydrolysis and fermentation of sugarcane bagasse to ethanol* *Fuel* 136: 349-357.
- Siddique, A., Gul, A., Irfan, M., Nadeem, M., Quratlain, S. (2017) *Comparison of different pretreatment methods for efficient conversion of bagasse into ethanol* *Biofuels* 8 (1): 135-141.
- Siqueira, G., Várnai, A., Ferraz, A., Milagres, A.M.F. (2013) *Enhancement of cellulose hydrolysis in sugarcane bagasse by the selective removal of lignin with sodium chlorite* *Applied Energy* 102: 399-402.
- Yoon, L.W., Ngho, G.C., Chua, A.S.M., Mohd, A.H. (2011) *Comparison of ionic liquid, acid and alkali pretreatments for sugarcane bagasse enzymatic saccharification* *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 86: 1342-1348.
- Zhou, Z., Xue, W., Lei, F., Cheng, Y., Jiang, J., Sun, D. (2016) *Kraft GL-ethanol pretreatment on sugarcane bagasse for effective enzymatic hydrolysis* *Industrial Crops and Products* 90: 100-109.

Estudios sobre el pretratamiento del bagazo: agentes oxidantes y reductores

- Carrasco, C., Baudel, H.M., Sendelius, J., Modig, T., Roslander, C., Galbe, M., Hahn-Hägerdøl, B., Zacchi, G., Lidén, G. (2010) *SO₂-catalyzed steam pretreatment and fermentation of enzymatically hydrolyzed sugarcane bagasse* *Enzyme and Microbial Technology* 46 (2): 64-73.
- Gao, Y., Xu, J., Zhang, Y., Yu, Q., Yuan, Z., Liu, Y. (2013) *Effects of different pretreatment methods on chemical composition of sugarcane bagasse and enzymatic hydrolysis* *Bioresource Technology* 144: 396-400.
- Lee, Y.-J., Chung, C.-H., Day, D.F. (2009) *Sugarcane bagasse oxidation using a combination of hypochlorite and peroxide* *Bioresource Technology* 100 (2): 935-941.
- Liu, Y., Zhang, Y., Xu, J., Sun, Y., Yuan, Z., Xie, J. (2015) *Consolidated bioprocess for bioethanol production with alkali-pretreated sugarcane bagasse* *Applied Energy* 157: 517-522.
- Martín, C., Klinke, H.B., Thomsen, A.B. (2007) *Wet oxidation as a pretreatment method for enhancing the enzymatic convertibility of sugarcane bagasse* *Enzyme and Microbial Technology* 40 (3): 426-432.
- Martin, C., Thomsen, A.B. (2007) *Wet oxidation pretreatment of lignocellulosic residues of sugarcane, rice, cassava and peanuts for ethanol production* *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 82: 174-181.
- Martins, L.H.d.S., Rabelo, S.C., Costa, A.C.d. (2015) *Effects of the pretreatment method on high solids enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation of the cellulosic fraction of sugarcane bagasse* *Bioresource Technology* 191: 312-321.

Estudios sobre el pretratamiento del bagazo: métodos físicos, biológicos y líquidos iónicos

- Binod, P., Satyanagalakshmi, K., Sindhu, R., Janu, K.U., Sukumaran, R.K., Pandey, A. (2012) *Short duration microwave assisted pretreatment enhances the enzymatic saccharification and fermentable sugar yield from sugarcane bagasse* *Renewable Energy* 37 (1): 109-116.
- Chen, W.-H., Tu, Y.-J., Sheen, H.-K. (2011) *Disruption of sugarcane bagasse lignocellulosic structure by means of dilute sulfuric acid pretreatment with microwave-assisted heating* *Applied Energy* 88 (8): 2726-2734.
- Eblaghi, M., Niakousari, M., Sarshar, M., Mesbahi, G.R. (2016) *Combining Ultrasound with Mild Alkaline Solutions as an Effective Pretreatment to Boost the Release of Sugar Trapped in Sugarcane Bagasse for Bioethanol Production* *Journal of Food Process Engineering* 39 (3): 273-282.
- Kimon, K.S., Leslie Alan, E., Sinclair Doherty, W.O. (2011) *Enhanced saccharification kinetics of sugarcane bagasse pretreated in 1-butyl-3-methylimidazolium chloride at high temperature and without complete dissolution* *Bioresource Technology* 102 (19): 9325-9329.
- Krongtaew, C., Onsrithong, N., Suwankrua, R., Jongleritjunya, W. (2012) *Improving enzymatic saccharification of sugarcane bagasse by biological/physicochemical pretreatment using *Trametes versicolor* and *Bacillus* sp.* *Bioresources* 7: 3935-3947.

- Madison, M.J., Coward-Kelly, G., Liang, C., Karim, M.N., Falls, M., Holtzapfle, M.T. (2017) *Mechanical pretreatment of biomass - Part I: Acoustic and hydrodynamic cavitation* Biomass and Bioenergy 98: 135-141.
- Meza, J.C., Sigoillot, J.C., Lomascolo, A., Navarro, D., Auria, R. (2006) *New Process for Fungal Delignification of Sugar-Cane Bagasse and Simultaneous Production of Laccase in a Vapor Phase Bioreactor* Journal of Agriculture and Food Chemistry 54: 3852-3858.
- Moodley, P., Kana, E.B.G. (2017) *Microwave-assisted inorganic salt pretreatment of sugarcane leaf waste: Effect on physiochemical structure and enzymatic saccharification* Bioresource Technology 235: 35-42.
- Moretti, M.M.d.S., Bocchini-Martins, D.A., Nunes, C.d.C., Arévalo Villena, M., Perrone, O.M., da Silva, R., Boscolo, M., Gomes, E. (2014) *Pretreatment of sugarcane bagasse with microwaves irradiation and its effects on the structure and on enzymatic hydrolysis* Applied Energy 122: 189-195.
- Pirota, R.P.B., Delabona, P., Farinas, C. (2014) *Simplification of the Biomass to Ethanol Conversion Process by Using the Whole Medium of Filamentous Fungi Cultivated Under Solid-State Fermentation* BioEnergy Research 7 (2): 744-752.
- Qiu, Z., Aita, G.M., Mahalaxmi, S. (2014) *Optimization by response surface methodology of processing conditions for the ionic liquid pretreatment of energy cane bagasse* Journal of Chemical Technology and Biotechnology 89: 682-689.
- Qiu, Z., Aita, G.M., Walker, M.S. (2012) *Effect of ionic liquid pretreatment on the chemical composition, structure and enzymatic hydrolysis of energy cane bagasse* Bioresource Technology 117: 251-256.
- Ramadoss, G., Muthukumar, K. (2016) *Ultrasound assisted metal chloride treatment of sugarcane bagasse for bioethanol production* Renewable Energy 99: 1092-1102.
- Sasaki, C., Takada, R., Watanabe, T., Honda, Y., Karita, S., Nakamura, Y., Watanabe, T. (2011) *Surface carbohydrate analysis and bioethanol production of sugarcane bagasse pretreated with the white rot fungus, Ceriporiopsis subvermisporea and microwave hydrothermolysis* Bioresource Technology 102 (21): 9942-9946.
- Travaini, R., Morales Otero, M.D., Coca, M., Da-Silva, R., Bolado, S. (2013) *Sugarcane bagasse ozonolysis pretreatment: Effect on enzymatic digestibility and inhibitory compound formation* Bioresource Technology 133: 332-339.
- Valadares, F., Gonçalves, T.A., Gonçalves, D.S.P.O., Segato, F., Romanel, E., Milagres, A.M.F., Squina, F.M., Ferraz, A. (2016) *Exploring glycoside hydrolases and accessory proteins from wood decay fungi to enhance sugarcane bagasse saccharification* Biotechnology for Biofuels 9: 110.
- Velmurugan, R., Muthukumar, K. (2012) *Sono-assisted enzymatic saccharification of sugarcane bagasse for bioethanol production* Biochemical Engineering Journal 63: 1-9.
- Yachmenev, V., Condon, B., Klasson, T., Lambert, A. (2009) *Acceleration of the enzymatic hydrolysis of corn stover and sugarcane bagasse celluloses by low intensity uniform ultrasound* Journal of Biobased Materials and Bioenergy 3: 25-31.