

Producción de azúcares fermentables por hidrólisis ácida diluida del bagazo de caña de azúcar

Abreu Manuel

Libre Ejercicio Profesional
manuelmedina16@hotmail.com
Venezuela- Zulia

La Rosa Oswaldo

Libre Ejercicio Profesional
manuelmedina16@hotmail.com
Venezuela - Zulia

Chandler Cintia

Aiello Cateryna

Mármol Zulay

Villalobos Nercy

Rincón Marisela

Arenas Elsy

Laboratorio de Tecnología de Alimentos y Fermentaciones Industriales
Facultad de Ingeniería
Universidad del Zulia
manuelmedina16@hotmail.com
Venezuela- Zulia

Fecha de recepción: 06-02-2011 Fecha de aceptación: 15-03-2014

Resumen

El bagazo de la caña de azúcar es uno de los residuos agroindustriales más abundantes en Venezuela y es una posible alternativa para satisfacer la demanda energética, siendo además de bajo impacto ambiental. En esta investigación, se evaluó la producción de azúcares fermentables por hidrólisis ácida diluida del bagazo de caña de azúcar, empleando ácido sulfúrico (H_2SO_4) a diferentes concentraciones y tiempos de reacción. Se alcanzaron máximas concentraciones de azúcares reductores

(AR) de 11.54 g/L y azúcares totales (AT) 11.81 g/L a 4 h de reacción y 2% de ácido sulfúrico; sin embargo, a 3 h y 1,5% se obtuvieron concentraciones con 10.53 g/L para AR y 11.26 g/L para AT para los cuales no hubo diferencias significativas entre estos dos tratamientos. Al realizar la prueba de medias se tuvo como respuesta que las variables tiempo, concentración y la interacción tiempo-concentración tienen diferencias significativas ($p < 0.0001$), con ello se estudió el comportamiento de los azúcares a diferentes concentraciones de ácido y tiempos de reacción,

al igual que se determinó la ecuación cinética de conversión de azúcares reductores en función del tiempo. Se concluye que las ecuaciones cinéticas de las reacciones para azúcares reductores en función del tiempo de reacción resultaron ser de pseudo primer orden, encontrándose un mejor ajuste a medida que aumenta la concentración de ácido sulfúrico.

Palabras clave: Producción de etanol; reducción de gases de efecto invernadero; hidrólisis ácida diluida

Production of fermentable sugars by dilute acid hydrolysis of sugar cane bagasse

Abstract

Sugarcane bagasse is one of the most abundant agroindustrial wastes in Venezuela and is a possible alternative to satisfy the energy demand, being also of low environmental impact. In this research, the production of fermentable sugars by dilute acid hydrolysis of sugarcane bagasse was evaluated, using sulfuric acid (H₂SO₄) at different concentrations and reaction times. Maximum concentrations of reducing sugars (RS)

of 11.54 g/L and total sugars (TS) of 11.81 g/L were reached at 4 h of reaction and 2% sulfuric acid; however, at 3 h and 1.5%, concentrations of 10.53 g/L for RS and 11.26 g/L for TS were obtained, for which there were no significant differences between these two treatments. The test of means showed that the variables time, concentration and the interaction time-concentration have significant differences ($p < 0.0001$), with this the behavior of the sugars at different acid concentrations and

reaction times was studied, and the kinetic equation of conversion of reducing sugars as a function of time was determined. It is concluded that the kinetic equations of the reactions for reducing sugars as a function of reaction time were pseudo first order, finding a better fit as the concentration of sulfuric acid increases.

Keywords: Ethanol production; greenhouse gas reduction; dilute acid hydrolysis; dilute acid hydrolysis

Introducción

Los desechos y residuos sólidos generados por la industria, que son dispuestos en sitios a cielo abierto cerca de ríos y quebradas sumado a la materia orgánica (la cual puede ser de origen doméstico, industrial o agroindustrial), generan lixiviados los cuales representan un potente contaminante, que no solo contamina el suelo, sino que también impacta los recursos hidrológicos de la zona afectando el nivel freático y los acuíferos del lugar. En el mundo existe la necesidad de disponer y transformar los residuos industriales y agroindustriales en productos de mayor valor comercial, evitando así impactos ambientales por la descomposición de los mismos en vertederos de basura a cielo abierto (Tchobanglous, 1999).

Uno de los residuos agroindustriales que se dispone en grandes volúmenes y a bajo costo es el bagazo de caña de azúcar, el cual es generado en la producción del azúcar de caña el cual puede ser aprovechado mediante la hidrólisis ácida diluida con ácido sulfúrico (H₂SO₄), con la finalidad de obtener azúcares fermentables y establecer las condiciones necesarias para ser utilizado posteriormente en procesos de fermentación (Gámez, 2005).

Desde hace muchos años la mayor y más eficiente fuente de energía ha sido la combustión de combustibles fósiles, siendo el petróleo y sus derivados los de mayor demanda. El uso de estos combustibles fósiles, trae como consecuencia la emisión

de gases contaminantes a la atmósfera, principalmente dióxido de carbono, conocido hoy como gas de invernadero, en referencia al efecto que produce sobre el ecosistema. Es por ello que se presenta la necesidad de buscar formas de energía alternativas, que produzcan el menor impacto sobre el ambiente y no interrumpa el avance y aplicación de nuevas tecnologías.

Una posible alternativa es la fermentación de los azúcares producidos por la hidrólisis ácida del bagazo, con la finalidad de obtener etanol cuya combustión podría generar la energía suficiente para satisfacer la demanda energética, con una producción estequiométrica de dióxido de carbono muy por debajo que la producida por los combustibles fósiles representando una alternativa más amigable al ambiente.

En esta investigación se evaluó la producción de azúcares fermentables por hidrólisis ácida diluida del bagazo de caña de azúcar usando distintos tiempos de reacción y variando las concentraciones de ácido sulfúrico.

Materiales y Métodos

Sustrato

Se utilizó bagazo de la caña de azúcar proveniente del Central Azucarero La Pastora, ubicado en la parroquia Cecilio Zubillaga, municipio Torres del estado Lara, Venezuela. El bagazo se secó, se molió utilizando un molino de cuchillas (Thomas Wiley Laboratory Mill, Model 4) y se

pasó por un tamiz de 20 mesh, para obtener un tamaño de partícula $\leq 1\text{mm}$ y se almacenó en bolsas plásticas de cierre hermético a temperatura ambiente hasta el momento de su uso.

Caracterización del bagazo

Para la caracterización del bagazo tratado y sin tratar se determinó el contenido de celulosa, hemicelulosa y sólidos solubles utilizando el método de Goering y Van Soest (1970), en el cual se obtiene una relación con la fibra ácido detergente (FAD), fibra neutro detergente (FND) y lignina ácido detergente (LAD) de acuerdo a las Ecuaciones 1, 2 y 3:

$$\text{Celulosa (\%)} = \text{FAD (\%)} - \text{LAD (\%)} \quad (1)$$

$$\text{Hemicelulosa (\%)} = \text{FND (\%)} - \text{FAD (\%)} \quad (2)$$

$$\text{Lignina (\%)} = \text{LAD (\%)} - \text{Cenizas} \quad (3)$$

Hidrólisis ácida diluida

La hidrólisis ácida se realizó con ácido sulfúrico diluido al 0.5; 1.0; 1.5; 2.0 % y tiempos de reacción de 1, 2, 3 y 4 h, en una relación L/S=15:1 con ebullición a reflujo. Todas las hidrólisis se realizaron por triplicado. Una vez transcurrido el tiempo establecido, se enfrió la mezcla rápidamente para detener la reacción y luego el hidrolizado se filtró a través de papel Whatman Nº1. Por último se guardó a 4 °C hasta su posterior utilización. Cuando se realizaron los análisis el pH se ajustó a 4.5 con una solución 6N de NaOH.

Determinación de azúcares reductores

El contenido de azúcares reductores, presente en el hidrolizado se determinó empleando el método del ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS), propuesto por Miller (1959), utilizando glucosa como estándar. La absorbancia se midió en un espectrofotómetro de rayos UV modelo (Genesis 10UV) a una longitud de onda de 550 nm.

Determinación de azúcares totales

Los azúcares totales se determinaron a través del método colorimétrico propuesto por [Dubois et al., (1956)], el cual utiliza glucosa como estándar. Las lecturas de absorbancia se midieron en un espectrofotómetro UV visible (Genesis 100v de Thermo Scientific, Electron Corp.) a 490 nm.

Análisis estadístico

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de media HSD de Tukey para todos los resultados con el paquete estadístico Statistical

Analysis System 9.1 (SAS).

Análisis Cinético

Para evaluar la cinética de la reacción de hidrólisis ácida diluida del bagazo de caña de azúcar, se utilizó el método integral el cual consiste en hacer regresiones lineales construyendo los gráficos de Concentración de azúcares (Caz), Logaritmo neperiano de concentración de azúcares (Ln Caz) y el inverso de la concentración de azúcares (1/Caz) contra tiempo (t), siendo el orden de la reacción 0, 1 ó 2 respectivamente según la regresión que presente una mejor correlación. Para determinar las constantes de velocidad (k) se realizó una regresión exponencial de los datos de concentración de azúcares, en cuya ecuación producto de la regresión, el coeficiente de la variable tiempo representa la constante de velocidad.

Rendimiento de producción de azúcares fermentables

El rendimiento para azúcares fue calculado usando la ecuación formulada por [Neureiter et al., (2002)] que

se expresa en la Ecuación (4):

Rendimiento (%): (Concentración de azúcar(g/L)) *100 (4)
(Volumen de ácido(L)*Masa de bagazo (g))

Este rendimiento describe la cantidad de sustancia en gramos que puede ser obtenida a partir de 100 gramos de materia seca de bagazo, después de una reacción completa de acuerdo a lo propuesto por Neureiter et al., (2002).

Resultados y Discusión

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del bagazo de caña de azúcar seco y molido previo al hidrólisis. Los valores corresponden los promedios de dos réplicas. Todos los componentes porcentuales están expresados en base seca.

Tabla 1. Caracterización del bagazo de la caña de azúcar (base seca)

Compuesto	%
Hemicelulosa	10.05
Celulosa	58.90
Lignina	13.62
Materia Seca Total	95.26

Estos resultados están en el orden de rangos de los valores reportados en otras investigaciones, con valores de celulosa 40-60% y lignina 10-25%; sin embargo, el contenido de hemicelulosa es menor con un valor de 10% [Hon y Shiarishi, 2001; Ferrer et al., (2002); Pernalette *et al.*, (2008); Schacht *et al.*, (2008); Cortinez, 2010)]. Estos valores permiten afirmar que el bagazo de caña de

azúcar es una importante y potencial fuente de azúcares debido a su alto contenido de celulosa y de hemicelulosa [Zanin G, (2000); Pernalette *et al.*, (2008); Schacht *et al.*, (2008); Gutiérrez, (2009); Cortinez, (2010); Rocha, (2011)].

En la Tabla 2 se presenta la concentración de azúcares reductores en los diferentes hidrolizados para cada

concentración de ácido sulfúrico (%) y tiempo (h). En los resultados se aprecia que, para todas las hidrólisis, a medida que aumenta el tiempo de reacción la concentración de azúcares reductores se incrementa, esta tendencia también ha sido reportada por otros investigadores (Gámez *et al.*, (2005); Gutiérrez *et al.*, (2009); Cortinez, 2010)].

Tabla 2. Contenido de azúcares reductores (g/L) para las diferentes concentraciones de ácido y tiempos de reacción

Concentración de ácido (%)	Tiempo de hidrólisis (h)			
	1	2	3	4
0.5	2.10±0.71 ^f	4.00±0.38 ^{d*}	4.83±0.06 ^{d*}	3.89±0.25 ^e
1.0	4.98±0.29 ^d	7.11±0.33 ^c	8.24±0.03 ^b	7.00±0.12 ^c
1.5	6.92±0.24 ^c	8.68±0.20 ^b	10.53±0.08 ^a	10.61±0.68 ^a
2.0	8.48±0.51 ^b	8.96±0.25 ^b	10.94±0.07 ^a	11.54±0.20 ^a

Nota: Letras distintas como superíndices en una fila, indican diferencias significativas entre medias para un mismo tratamiento a un determinado tiempo de reacción, a diferentes concentraciones de ácido.

La excepción se observa en las hidrólisis con 0.5 y 1.0 % de ácido, en las cuales se alcanza una concentración de azúcares máxima a las 3 horas de reacción y luego decrece. Este efecto pudiera ser causado por la degradación térmica de los azúca-

res, sin embargo, no pudo ser comprobado.

El análisis de varianza para la producción de azúcares reductores arrojó una correlación de 98.99%, lo cual indica que tanto la concen-

tración de ácido como el tiempo de reacción influyen significativamente sobre la concentración de azúcares reductores producto del hidrolizado.

La prueba de medias de Tukey (letras diferentes en la fila denotan

diferencias significativas) indica que durante las primeras horas de reacción y bajas concentraciones de ácido las variables ejercen mayor influencia sobre la concentración de azúcares, la cual se hace menos significativa a medida que aumenta el tiempo de reacción y la concentración de ácido. También se puede observar que la variable de mayor influencia sobre la producción de azúcares reductores es la concentración de ácido.

La máxima concentración de azúcares reductores fue de 11.54 g/L obtenida para la hidrólisis realizada con y 2% ácido sulfúrico durante 4 horas, sin embargo, este valor es muy cercano al obtenido para la hidrólisis con ácido al 1.5% durante 3 horas, no encontrándose diferencias significativas mediante la prueba de Tukey entre los dos valores. Esto permite indicar que se puede reducir

el costo de la hidrólisis en función del consumo de ácido sulfúrico y de energía por el tiempo de duración del proceso.

Los valores obtenidos de azúcares reductores concuerdan con los resultados de otros investigadores. [Ferrer *et al.*, (2002)] obtuvieron una concentración máxima de azúcares reductores de 16.76 g/L en hidrólisis de bagacillo caña de azúcar con ácido sulfúrico al 6% durante 4 horas. Esta concentración es ligeramente mayor, pero el consumo de ácido sulfúrico es tres veces mayor, lo cual afecta la economía del proceso. [Neureiter *et al.*, (2002)] reportaron la producción de 22.95 g/L de xilosa durante la hidrólisis de bagazo de caña de azúcar con de ácido sulfúrico (0.045 mol/L y 20% de materia seca) a 159°C y 17 minutos de reacción, por lo que utilizaron cantidades de solución ácida con baja concentración de bagazo

y altas temperaturas, lo cual puede causar problemas de degradación de los azúcares generados durante el proceso.

En la Tabla 3 se presentan la concentración de azúcares totales obtenida en los diferentes hidrolizados para todos los tiempos de reacción y porcentajes de ácido sulfúrico. Los resultados arrojados por el análisis de varianza para la producción de azúcares totales tuvieron una correlación de 99.61%, lo cual indica que tanto la concentración de ácido como el tiempo de reacción influyen teniendo diferencias significativas ($p < 0.0001$) sobre la concentración de azúcares reductores producto del hidrolizado. Este tipo de interacciones también fueron reportadas por otros investigadores [Pessoa *et al.*, (1997); Ferrer *et al.*, (2002); Neureiter *et al.*, (2002); Gámez, 2005; Sarrouh *et al.*, (2005); Schacht *et al.*, (2008)].

Tabla 2. Contenido de azúcares reductores (g/L) para las diferentes concentraciones de ácido y tiempos de reacción

Concentración de ácido (%)	Tiempo de hidrólisis (h)			
	1	2	3	4
0.5	2.61±0.19 ⁱ	4.16±0.15 ^h	4.92±0.07 ^g	4.14±0.31 ^h
1.0	5.86±0.11 ^f	7.23±0.11 ^e	8.94±0.14 ^{d,c}	7.12±0.03 ^e
1.5	7.35±0.10 ^e	9.52±0.18 ^c	11.26±0.20 ^a	11.53±0.32 ^a
2.0	8.67±0.41 ^d	10.52±0.45 ^b	11.39±0.06 ^a	11.81±0.10 ^a

Nota: Letras distintas como superíndices en una fila, indican diferencias significativas entre medias para un mismo tratamiento a un determinado tiempo de reacción, a diferentes concentraciones de ácido.

Al igual que para los azúcares reductores, a medida que aumenta la concentración y el tiempo de reac-

ción, aumenta el contenido de azúcares totales, lo cual concuerda con lo reportado por [Gámez *et al.*, (2005),

Gutiérrez *et al.*, (2009) y Cortinez, (2010)]. La excepción se presenta en las hidrólisis con ácido al 0.5 y 1.0 %

en las cuales se alcanza una concentración de azúcares máxima a las 3 horas de reacción y luego decrece, no existiendo diferencias significativas entre las concentraciones obtenidas a las 3 y 4 horas.

Las máximas concentraciones de azúcares totales fue 11.81 g/L para las 4 horas y 2% ácido sulfúrico, no existiendo diferencias significativas

con la concentración obtenida en la hidrólisis con ácido al 1.5% durante 3 horas, de 11.26 g/L. Estos resultados coinciden con lo obtenido para los azúcares reductores, por lo que utilizar estas últimas condiciones permitiría un ahorro de ácido y energía en el proceso.

En la Tabla 4 se muestran las correlaciones obtenidas a partir de las

tendencias lineales de las gráficas de Concentración de azúcares (Caz), Logaritmo neperiano de concentración de azúcares (Ln Caz) y el inverso de la concentración de azúcares (1/Caz) en función del tiempo (t). Se observa que las mejores tendencias se logran con las dos últimas, cuyos factores de correlación lineal coinciden.

Tabla 4. Correlaciones (R2) obtenidas a partir de las tendencias lineales de las gráficas Concentración de azúcares (Caz), Logaritmo neperiano de concentración de azúcares (Ln Caz) y el inverso de la concentración de azúcares (1/Caz) contra tiempo (t)

Variable Y	Tiempo de hidrólisis (h)			
	0.5	1.0	1.5	2.0
Caz	0.4861	0.4684	0.9045	0.9374
Ln (Caz)	0.4799	0.5084	0.8919	0.9376
1/Caz	0.5157	0.5078	0.8742	0.9374

Se elige como orden de la reacción un pseudo orden uno en función de los resultados reportados por [Seaman (1945), Rodríguez Chong *et al.*, (2002) y Aguilar *et al.*, (2004)] que establecen que las reacciones generadas en la hidrólisis ácida de materiales lignocelulósicos son muy complejas y por ende es recomendable usar modelos empíricos o simplificados para determinar la cinética, la cual sigue una tendencia exponencial

y se va adecuando más a medida que aumenta la concentración de ácido sulfúrico [Gámez, (2005); Schacht *et al.*, (2008)].

En la Tabla 5 se muestran las ecuaciones cinéticas que rigen el comportamiento. Se observa que a medida que aumenta el tiempo de reacción, la constante de velocidad va disminuyendo, lo cual puede ser debido a que se dificulta la hidrólisis

al material que aún no ha reaccionado. Estos resultados coinciden con los reportados por Gonçalves (2003), Rodríguez-Chong (2004), Gámez (2005), Area (2008) y Schacht *et al.*, (2008). Por otro lado la constante varía a pesar de ser una reacción isotérmica, lo cual indica que debe existir dependencia con la concentración de ácido.

Tabla 5 Ecuaciones cinéticas de producción de azúcares reductores y constantes de velocidad

Concentración de ácido (%)	Ecuación cinética	k (s-1)
0.5	$C_{az} = 2.130e^{0.203t} R^2 = 0.529$	0.203
1.0	$C_{az} = 5.019e^{0.116t} R^2 = 0.501$	0.116
1.5	$C_{az} = 6.257e^{0.147t} R^2 = 0.891$	0.147
2.0	$C_{az} = 7.473e^{0.112t} R^2 = 0.937$	0.112

Rodríguez-Chong *et al.*, (2002) afirman que el modelo cinético que rige la conversión de las fracciones de celulosa y hemicelulosa constituyentes del bagazo de caña de azúcar en azúcares reductores sigue el siguiente paso elemental empleando un modelo cinético pseudohomogéneo en fase líquida basándose en el trabajo de Seaman (1945) de la hidrólisis de madera de asbesto usando ácido sulfúrico:

Polímeros (Hemicelulosa y Celulosa)

Monómeros (Azúcares reductores, mayormente xilosa)

La xilosa se toma como producto principal del hidrólisis debido a que es el monómero que mayoritariamente constituye la hemicelulosa, y es la fracción que sufrió mayor hidrólisis, considerando también que la concentración de azúcares fermentables frente a la concentración de azúcares totales son muy próximas. Aguilar y Canizales (2004) desarrollaron un modelo cinético para las condiciones óptimas del hidrólisis, basado en dos reacciones consecutivas de pseudo primer orden irreversibles homogéneas para la sacarificación promedio.

En la Tabla 6 se observa el rendimiento de producción de azúcares fermentables, basándose en la canti-

dad de azúcares máxima que pudiese ser extraída si toda la hemicelulosa y celulosa fuese hidrolizada. Se observa que a medida que aumenta la concentración de ácido y el tiempo se va obteniendo mayor cantidad de azúcares fermentables con respecto a los disponibles, teniendo un máximo de 17.31%.

Estos valores concuerdan con lo reportado por [Neureiter *et al.*, (2002)] quienes indican que los experimentos con alta cantidad materia seca usualmente dan hidrolizados con alta concentración de azúcares, aunque el rendimiento pueda ser menor.

Tabla 6. Rendimiento de producción en azúcares reductores (%)

Concentración de ácido (%)	Tiempo (h)			
	1	2	3	4
0.5	3.15	6.00	7.24	5.84
1.0	7.47	10.67	12.36	10.50
1.5	10.38	13.02	15.80	15.92
2.0	12.72	13.44	16.41	17.31

Conclusiones

Los máximos valores de azúcares reductores producidos fueron de 11.54 g/L (11.81 g/L de azúcares totales) con un rendimiento de 17.31% y de 10.53 g/L de (11.26 g/L de azúcares totales) con un rendimiento de 15.80%, para las hidrólisis realizadas con ácido sulfúrico diluido al 2% durante 4h y al 1.0% durante 3 horas, respectivamente.

Las ecuaciones cinéticas de las reacciones para azúcares reductores en función del tiempo de reacción resultaron ser de pseudo primer orden, encontrándose un mejor ajuste a medida que aumenta la concentración de ácido sulfúrico.

Agradecimiento

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad del Zulia (CONDES) por el financiamiento de esta investigación.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar N., Canizales M. (2004). Cinética del hidrólisis ácida de la cascarilla de cebada. *Revista mexicana de ingeniería química*. 3, 257-263.
- Area M., Felissia F., Vallejos M. (2008). Fraccionamiento etanol-agua de bagazo de caña de azúcar catalizado con ácidos. *Universidad de Guadalajara*. 6-8.
- Cortinez, V. (2010). Comparación de pretratamientos en residuos forestales para la producción de bioetanol de segunda generación: hidrólisis ácida y líquidos iónicos. *Universidad de Chile*. 13-41.
- Dubois, M.; Gilles, K.A.; Hamilton, J. K.; Rebers, P. A.; Smith, F. (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Anal. Chem.* 28 (3): 350-356.
- Ferrer, J.; Páez, G.; Arenas de Moreno, L.; Chandler, C.; Mármol, Z.; Sandoval, L. (2002) Cinética del hidrólisis ácida de bagacillo de caña de azúcar. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 19. 23-33.
- Gámez, S.; Gonzalez-Cabriales, J.; Ramírez, J.; Garrote, G.; Vázquez, M. (2006). Study of the hydrolysis of sugar cane bagasse using phosphoric acid. *Journal of food engineering* 74:78-88.
- Gámez, S.; González-Cabriales, J.; Ramírez, J.; Garrote, G.; Vázquez, M. (2006). Study of the hydrolysis of sugar cane bagasse using phosphoric acid. *Journal of food engineering*. 74: 78-88.
- Goering, H. K.; Van Soest, P. J. (1970). Forage fiber analysis. *Agricultural handbook*. Nº 379. USDA, Washington, DC. USA.
- Gutiérrez, B.; Ortiz, B.; Montero, M.; Barradas, D.; Aguilar, G. (2009). Efecto del doble hidrólisis ácida del bagazo de caña sobre la producción de azúcares y furfural. *Instituto Tecnológico de Veracruz*. 1.
- Hon, D.; Shiraiishi, N. (2001) *Wood and Cellulosic Chemistry*. Editorial Marcel Dekker, Inc. segunda edición. 51-212.
- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal. Chem.* 31: 426-428.
- Neureiter, M.; Danner, H.; Thomasser, C.; Saidi, B.; Braun, R. (2002). Diluted-acid hydrolysis of sugarcane bagasse at varying conditions. *Applied biochemistry and biotechnology*. 98- 100: 49-58.
- Pernalet, Z.; Piña F.; Suárez, M.; Ferrer, A.; Aiello, C. (2008). Fraccionamiento del bagazo de caña de azúcar mediante tratamiento amoniacal: efecto de la humedad del bagazo y la carga de amoníaco. *Bioagro*. 20: 3-10.
- Pessoa, A.; Mancilha, I.; Sato, S. (1997). Acid hydrolysis of hemicellulose from sugarcane bagasse. *Braz. J. Chem Eng*, 14. 2-5.
- Rocha, G.; Martin, C.; Soares, I.; Maior, A.; Baudel, H.; Moraes de Abreu, C. (2011). Dilute mixed-acid pretreatment of sugarcane bagasse for ethanol production. *Biomass and bioenergy*. 35:663-670.
- Rodríguez-Chong, A.; Ramírez, J.; Garrote, G.; Vázquez, M. (2004). Hydrolysis of sugarcane bagasse

using nitric acid: a kinetic assessment. *Journal of food engineering*. 61: 143-152.

Sarrouh, B.; Jover, J.; González, E. (2005). Estudio del hidrólisis del bagazo con ácido sulfúrico concentrado utilizando dos variantes de una sola etapa y una sola etapa modificada para la obtención de etanol y análisis técnico-económico de dicho proceso. *Revista Ingeniería e Investigación*. 25: 36-37.

Schacht, C.; Zetzl, C.; Brunner, G. (2008). From plant materials to ethanol by means of supercritical fluid technology. *J. of Supercritical Fluids*. 46:301-308.

Seaman, J.F. (1945). Kinetic of wood saccharification. Hydrolysis of cellulose and decomposition of sugar in dilute acid at high temperature. *Ind. Eng. Chem.* 37: 43-52.

Tchobanglous, G. (1999). *Gestión integral de residuos sólidos*. Editorial Mc Graw Hill. Tomo I: 6-18: 407-424.

Zanin, G.; Santana, C.; Bon, E.; Giordano, R.; Moraes, F.; Andrietta, S.; Neto, C.; Macedo I.; Fo, D.; Ramos, L. y Fontana, J. (2000). *Brazilian Bioethanol Program*. *Applied Biochemistry and*