

## ESTUDIO DE LA CINÉTICA DEL PRETRATAMIENTO E HIDRÓLISIS ÁCIDA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

María M. Domínguez-Domínguez, Alberto Álvarez-Castillo\*, Manuel Granados-Baeza, Francisco Hernández-Campos

1) Instituto Tecnológico de Zacatepec, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica y Ciencias Básicas, Calzada Tecnológico No. 27 Zacatepec Morelos, C.P. 62780. Correo electrónico: [nuabli@yahoo.com.mx](mailto:nuabli@yahoo.com.mx)

Recibido: Febrero 2012 ; Aceptado: Junio 2012

### RESUMEN

Se analizó la influencia de las variables de reacción para el pretratamiento del bagazo de caña con ácido fosfórico, bajo las siguientes condiciones: tiempo de reacción (30, 60 y 120 min), temperatura (40, 50 y 60°C) y concentración del ácido (40, 50, 60 y 80%) sobre las variables dependientes, contenido de celulosa y lignina. La determinación de tales componentes en el bagazo natural y pretratado se llevó a cabo por métodos gravimétricos. Se analizaron los datos obtenidos para determinar las mejores condiciones de reacción, que permite describir el proceso de eliminación de lignina y posteriormente realizar el tratamiento. Se obtuvo que tales condiciones se encuentran en un proceso con solución acuosa al 60%, a 50°C durante 120 minutos.

Se llevó a cabo la hidrólisis del bagazo de caña pretratado, con ácido sulfúrico a distintas condiciones de reacción. Se analizó la influencia de las variables independientes, tiempo de reacción (10, 20, 40, 60 y 90 min), temperatura (30, 45, 60 y 75°C) y concentración del ácido sulfúrico (4, 8, 12 y 16 %), sobre la variable dependiente, azúcares reductores totales (ART). La determinación cuantitativa de ART se realizó por espectrofotometría UV-Vis a 570 nm por el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), usando glucosa como estándar. Con los datos obtenidos se estudió la cinética de reacción para obtener las mejores condiciones de reacción, que permite describir el proceso de producción de azúcares reductores totales a partir del bagazo de caña. Se determinó que tales condiciones se encuentran a 16% de ácido, a 75°C durante 60 minutos.

**Palabras claves:** Pretratamiento, bagazo de caña de azúcar, celulosa, lignina, hidrólisis ácida.

### ABSTRACT

We analyzed the influence of reaction variables for the pretreatment of sugarcane bagasse with phosphoric acid under the following conditions: reaction time (30, 60 and 120 min), temperature (40, 50 and 60°C) and concentration acid (40, 50, 60 and 80%) on the dependent variables, cellulose and lignin content. The determination of such compounds in natural and pretreated bagasse was carried out by gravimetric methods. Data were analyzed to determine the best reaction conditions, which allows to describe the process of removing lignin and follow the treatment. It was found that such conditions are in a process with 60% aqueous solution at 50°C for 120 min.

We carried out the hydrolysis of pretreated sugar cane bagasse with sulfuric acid at different reaction conditions. We analyzed the influence of independent variables, reaction time (10, 20, 40, 60 and 90 min), temperature (30, 45, 60 and 75°C) and sulfuric acid concentration (4, 8, 12 and 16%) on the dependent variable, total reducing sugars (ART). Quantitative determination of ART was performed by UV-Visible spectrophotometer at 570 nm by the method of 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS), using glucose as standard. With the data we studied the reaction kinetics for the best reaction conditions in order to describe the process of total reducing sugar production from sugarcane bagasse. It was determined that such conditions are at 16% acid at 75°C for 60 min.

**Keywords:** Pretreatment, sugar cane bagasse, cellulose, lignin, acid hydrolysis.

### 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, se usan muchas fuentes de energía renovables, por ejemplo, energía solar, eólica e hidráulica. Irónicamente, todavía utilizamos como mayores recursos energéticos aquellos provenientes de fuentes de energía no renovable, o combustibles fósiles. Al no ser renovables estas

fuentes tendrán una tendencia a subir de precio hasta niveles en los que no será su utilización económicamente satisfactoria. Lamentablemente, la mayor parte de la energía que consumimos procede del petróleo, del gas natural o de otros combustibles fósiles. No resulta nada difícil predecir que el petróleo siendo un combustible fósil de amplio uso y, por tanto, potencialmente agotable, podría disminuir significativamente en el mediano o largo plazo sus reservas naturales, debido al notable y significativo incremento del consumo mundial [1].

Esta situación debe, por su importancia, trascendencia y actualidad, despertar el interés y la atención de los países potencialmente afectados, sometiendo a revisión y estudio los recursos disponibles y sus necesidades energéticas, procurando diagnosticar y principalmente evaluar la viabilidad real de aprovechamiento de las fuentes alternativas de energía renovables. Por otro lado, el consumo global de combustibles genera enormes cantidades de gases contaminantes que son liberados a la atmósfera. Este tipo de contaminación ha causado cambios en el clima del planeta, por lo que se ha convertido también en una de las problemáticas que más preocupan a los gobiernos, las comunidades y la opinión pública en general [2].

Se considera que la denominada biomasa lignocelulósica, que incluye residuos agrícolas, forestales y sólidos urbanos, así como residuos agroindustriales, de la industria de alimentos y de otras industrias, comprende aproximadamente el 50% de la biomasa en el mundo. Esta biomasa es un recurso que puede ser procesado de diferentes formas para la obtención de una gran variedad de productos entre los que destacan el etanol, metanol, hidrógeno y electricidad [2]. El contenido de biomasa lignocelulósica es rico y renovable, por lo que la aplicación de esa biomasa ofrece [3]. Además, la producción de biocombustibles a partir de biomasa lignocelulósica de bajo costo potenciaría la economía rural, disminuiría la emisión del gas invernadero y realzaría la economía de la industria de energía nacional [4].

Uno de los productos de la agroindustria que es fuerte candidato para obtener bioetanol, debido a su alta disponibilidad, es el bagazo de caña. El bagazo de caña de azúcar es un material lignocelulósico constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Se encuentra como subproducto o residuo en los ingenios azucareros, que, se obtiene después de la extracción del jugo de caña de azúcar y representa aproximadamente entre el 25 y 40% del total de materia procesada, dependiendo del contenido de fibra de la caña y la eficiencia en la extracción del jugo [5].

El bagazo de caña de azúcar, como todos los materiales lignocelulósicos es rico en fibra, sin embargo, debido a su compleja estructura son difíciles de hidrolizar, por lo que es necesario someterlo a pre tratamientos que conduzcan a la disminución o eliminación de las barreras físicas y químicas, tales como la cristalinidad de la celulosa, los grupos acetilos de la hemicelulosa y los

enlaces entre la hemicelulosa y la lignina; además estos también permiten aumentar el área superficial y eliminar o disminuir la presencia de sustancias que interfieren o dificultan la hidrólisis [5].

Por otro lado, los métodos de pretratamiento se refieren a la solubilización y separación de uno o más de los cuatro componentes de la biomasa (hemicelulosa, celulosa, lignina y extractos) para hacer la biomasa sólida restante más accesible a un posterior tratamiento químico o biológico [6]. Estos métodos pueden ser clasificados en cuatro categorías: físico, químico, biológico y combinado [7]. Los pretratamientos químicos han recibido mayor atención porque los pretratamientos físicos son relativamente ineficientes, y los pretratamientos combinados raramente han mejorado la digestibilidad cuando son comparados con tratamientos simples [8]. El pretratamiento permite que los rendimientos en la hidrólisis de celulosa aumenten con respecto a los rendimientos teóricos a valores mayores al 90% [8].

Dentro de los pretratamientos químicos se han utilizado diferentes sustancias y condiciones, pero uno de los pretratamientos más novedosos en estudio es con ácido fosfórico. Entre las ventajas más sobresalientes de este método se encuentra su bajo costo comparado con los que usan líquidos iónicos, tolerancia a la presencia de agua, capacidad de disolución de celulosa a baja temperatura, no volatilidad, estabilidad química y fácil reciclamiento. El ácido fosfórico puede hinchar o disolver la celulosa, dependiendo de su concentración y el tipo de biomasa [4]. Geoffrey et al. [4] ha reportado el uso del pretratamiento con ácido fosfórico del cáñamo industrial usando diferentes condiciones de reacción, por lo que en este trabajo se aplicó la metodología usada, cambiando la fuente lignocelulósica de producción, es decir, bagazo de caña de azúcar. Respecto al tratamiento de los materiales lignocelulósicos, la hidrólisis ácida de los materiales lignocelulósicos ha sido la tecnología más utilizada para la obtención de azúcares fermentables, que posteriormente son convertidos a etanol [10].

Por otro lado, en el estado de *Morelos* se cuenta con la producción del bagazo de la caña de azúcar como su principal residuo lignocelulósico generado en los ingenios azucareros. En el caso del estado de Morelos el bagazo de caña se usa en diversas industrias tales como la papelera, maderera, entre otras, así como forraje para el ganado vacuno y porcino. No obstante, su aplicación en la generación de energía brinda la posibilidad de obtener energía limpia [11].

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

**2.1. Material.** Se utilizó bagazo de caña de azúcar como materia prima, el cual fue donado por el *Ingenio Emiliano Zapata*, ubicado en la población de *Zacatepec*, municipio del *Estado de*

Morelos. Como reactivos se empleó lo siguiente: ácido acético, agua destilada, ácido nítrico, alcohol etílico, ácido sulfúrico, ácido fosfórico, acetona, hidróxido de sodio, carbón activado, 3,5-dinitrosalicílico, glucosa anhídrica, tartrato de sodio y potasio.

**2.2. Equipo.** El instrumental utilizado fué: tamices de diferentes números de malla (10, 20, 30, 40) marca *FIIC*, S.A. de C.V, estufa marca *Thermolyne*, parrilla con agitador magnético, modelo *Nuova*, marca *Thermolyne*, mufla, y espectrofotómetro UV-Vis.

### 2.3. Metodología.

**2.3.1. Preparación del bagazo de caña de azúcar.** En esta investigación se molió y tamizó el bagazo de caña durante 20 minutos y se seleccionó el tamaño de fibra malla 30. El bagazo se lavó con agua a temperatura ambiente, lo anterior para eliminar impurezas adheridas a la fibra de origen. Se filtró y se secó en una estufa a 70°C durante 24 h.

**2.3.2. Determinación porcentual de celulosa [12].** A un gramo de muestra seca se le añadieron 15 mL de ácido acético al 80% y 1.5 mL de ácido nítrico concentrado y se llevó a reflujo por 20 minutos. La muestra tratada se filtró y el residuo se lavó con etanol, se secó en un horno a 100–105°C y se pesó (material A). Entonces se incineró a 540°C (material B) dejando que se enfriara a temperatura ambiente en un desecador y después se pesó.

La determinación del porcentaje de celulosa se calculó mediante la ecuación:

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{(\text{material A}) - (\text{material B})}{\text{Peso de la muestra utilizada}} \cdot 100 \quad (1)$$

**2.3.3. Determinación de lignina [12].** A un gramo de muestra seca se le añadieron 70 mL de ácido sulfúrico al 1,25%. La mezcla se llevó a reflujo, con agitación constante, por 120 minutos, se filtró y lavó con agua. A este material se le añadieron 30 mL de ácido sulfúrico al 72% y se le permitió permanecer durante 4 horas con agitación constante. Posteriormente los sólidos se filtraron, lavaron, secaron (100–105°C) y pesaron (material C). Despues el material se incineró a 540°C. Despues se enfrió a temperatura ambiente en una desecador y se pesó (material D).

El contenido de bagazo de lignina en la muestra de bagazo se obtendrá utilizando la ecuación:

$$\% \text{ Lignina} = \frac{(\text{material C}) - (\text{material D})}{\text{Peso de la muestra utilizada}} \cdot 100 \quad (2)$$

**2.3.4. Pretratamiento con ácido fosfórico [4].** Cuatro gramos de muestra seca de bagazo de caña se colocaron en un matraz de tres bocas. Se añadieron 32 mL de ácido fosfórico y se mezclaron por medio de un agitador magnético, a reflujo y temperatura constante en un baño de

agua. Se añadieron 120 mL de acetona para precipitar el compuesto acuoso lignocelulósico. La mezcla fue colocada en tubos de plástico y se centrifugaron a 3.600 rpm a temperatura ambiente por 20 minutos. El precipitado fue re-suspendido añadiendo acetona y se centrifugó dos veces. El sobrenadante combinado del lavado con acetona contiene en mayor parte ácido fosfórico, acetona y lignina disuelta. Después el precipitado, que contiene celulosa, hemicelulosa y alguna cantidad de lignina, se re-suspendió con agua destilada y centrifugó a 3.600 rpm durante 20 minutos. Después de que el sobrenadante se decantó, el precipitado se resuspendió en agua y centrifugó cuatro veces más. El residuo se secó en un horno (100 – 105°C). Una vez efectuado el pretratamiento, se determinó el porcentaje de celulosa y lignina para cada experimento de acuerdo a la metodología de los apartados 2.3.2 y 2.3.3, respectivamente.

**2.3.4.1. Estudio de la cinética de reacción del pretratamiento de bagazo de caña con ácido fosfórico.** Se buscó determinar las mejores condiciones de reacción en la función de la concentración de ácido, tiempo de reacción y temperatura sobre el proceso. Se determinó cuales condiciones producen la mayor reducción de lignina en el bagazo de caña de azúcar sin afectar significativamente la cantidad de celulosa. Para cada una de los experimentos se estudió la influencia de las variables antes mencionadas.

**2.3.5. Tratamiento mediante hidrólisis ácida.** La hidrólisis ácida se realizó con muestras de bagazo de caña pre-tratado. Se utilizaron soluciones de ácido sulfúrico a diferentes concentraciones (4, 8, 12 y 16%), a distintos tiempos de reacción (10, 20, 40, 60 y 90 minutos) y a diferentes temperaturas de reacción (30, 45, 60 y 75°C), con una relación líquido:sólido de 30/1 [13].

El bagazo se agregó a una solución acuosa de ácido sulfúrico en un matraz de tres bocas, previamente calentada hasta la temperatura determinada. Se dejó reaccionar bajo condiciones de agitación constante y reflujo. Para detener la reacción de hidrólisis se usó un enfriamiento rápido de la mezcla por medio de agua y hielo en un baño de agua. Se ajustó el hidrolizado a pH neutro con una solución 2N de hidróxido de sodio. Este se filtró a través de papel *Whatman* No. 2 y se pasó por una columna de vidrio empacada con carbón activado, en la cual se decoloró. Se guardó bajo refrigeración en tubos de ensayo hasta su utilización [13].

**2.3.5.1. Cuantificación de azúcares reductores.** El contenido de azúcares reductores presentes en los hidrolizados se determinó utilizando el método de ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) con glucosa como estándar. La cuantificación consistió en agregar 1,0 mL del reactivo de DNS a un volumen de 0,1 mL de muestra de bagazo de caña hidrolizado, se calentó a ebullición durante 10 min. Se enfrió durante 5 minutos en un baño de agua a temperatura ambiente y se determinó la absorbancia en el espectrofotómetro a 570 nm [14, 15]. Con los obtenidos, se calculó

la cantidad de azúcares reductores totales de acuerdo a la ecuación que se obtuvo de la elaboración de una curva estándar de glucosa, donde la variable dependiente es la cantidad de ART en la muestra tratada y, la variable independiente es la absorbancia de tal muestra.

**2.3.5.2. Estudio de la cinética de reacción de la hidrólisis ácida del bagazo de caña pretratado.** Para cada una de los experimentos se determinó el porcentaje de conversión en base a la cantidad teórica de celulosa y hemicelulosa en la mezcla bagazo–ácido sulfúrico–agua al inicio de cada reacción. Se calculó la cantidad de masa no degradada para cada uno de los experimentos en base al número de moles iniciales de celulosa más hemicelulosa y la cantidad de azúcares reductores totales experimentales. Se probaron diferentes órdenes de reacción ( $n = 0,1$  y  $0,5$ ). Una vez determinado el orden de la reacción, de acuerdo a la ecuación de *Arrhenius* y a las ecuaciones dadas (del análisis de regresión y tendencia lineal), se obtiene el valor de la constante de velocidad de reacción,  $k$ , para obtener la energía de activación.

### 3. RESULTADOS

El porcentaje de celulosa y lignina de la muestra de bagazo de caña sin pretratamiento fue de 53,73 y 26,37% respectivamente. Se observa que, tanto para el porcentaje de celulosa como para el de lignina, los valores se encuentran cercanos a los teóricos reportados para el bagazo de caña de azúcar. Para la celulosa: 46,6 [16] y 52,25% [13]. Para la lignina: 25,2 [16] y 19,27% [13]. Una vez efectuado el pre–tratamiento con ácido fosfórico, para cada una de las muestras pre–tratadas se determinó la cantidad de bagazo final y en base a estos resultados se observó la influencia de las variables de reacción. En la Figura 1 se muestra la influencia del tiempo de reacción sobre la cantidad de bagazo pre–tratado, para cada una de las concentraciones a temperatura constante, se observa que, para cada temperatura, el comportamiento para cada concentración es similar. Se observa que la pérdida de masa se incrementa respecto al aumento del tiempo de reacción. Esto puede deberse a una eliminación significativa de lignina, lo cual se comprueba con la determinación porcentual de tal componente. Después del pre–tratamiento, se determinó la cantidad de celulosa final, tal y como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de celulosa de muestras pre–tratadas con  $H_3PO_4$ .

$\% H_3PO_4$	$T, ^\circ C$	Tiempo, min		
		30	60	120
40	40	49,90	51,47	52,86
	50	52,19	52,12	45,27
	60	48,12	50,83	53,14
50	40	50,60	49,87	49,73
	50	50,10	51,09	52,64

	60	49,30	53,41	53,20
60	40	46,98	50,79	51,05
	50	47,88	52,43	51,06
	60	51,23	48,78	52,33
80	40	52,39	52,64	51,70
	50	53,58	53,71	52,93
	60	53,71	53,01	52,91

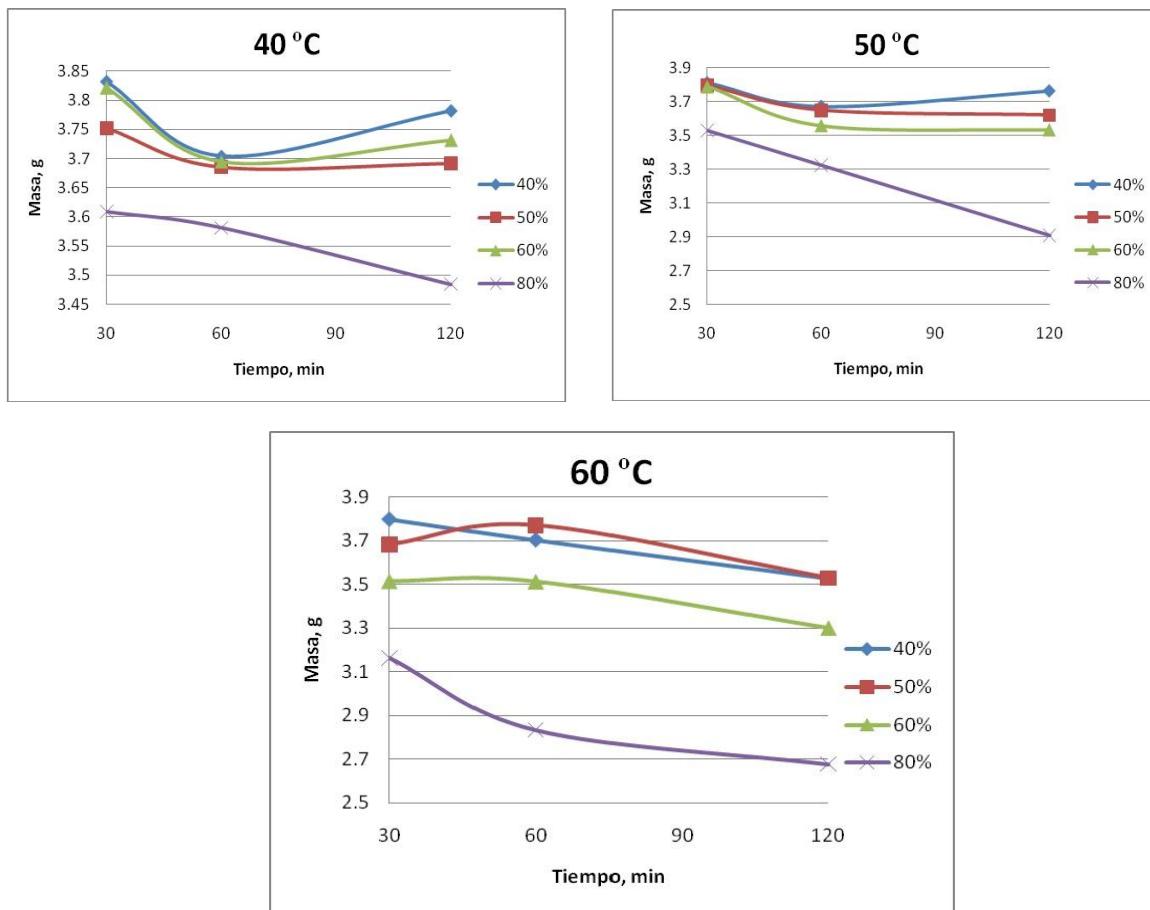


Figura 1. Influencia del tiempo de reacción sobre la cantidad de bagazo pre-tratado, para cada una de las concentraciones a temperatura constante.

Tabla 1. Porcentaje de celulosa de muestras pre-tratadas con H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	T, °C	Tiempo, min		
		30	60	120
40	40	49,90	51,47	52,86
	50	52,19	52,12	45,27
	60	48,12	50,83	53,14
50	40	50,60	49,87	49,73
	50	50,10	51,09	52,64
	60	49,30	53,41	53,20
60	40	46,98	50,79	51,05

	50	47,88	52,43	51,06
	60	51,23	48,78	52,33
80	40	52,39	52,64	51,70
	50	53,58	53,71	52,93
	60	53,71	53,01	52,91

Se observó que, en base al porcentaje inicial (53,73%), la cantidad final de celulosa para cada una de las muestras no se vio afectado significativamente, lo cual es un comportamiento favorable para la obtención de azúcares reductores totales. Así también, se determinó el porcentaje final de lignina, tal y como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de lignina de muestras pretratadas con  $H_3PO_4$ .

$H_3PO_4$ , %	T, °C	Tiempo, min		
		30	60	120
40	40	14,53	21,27	12,57
	50	23,39	16,96	17,47
	60	15,66	25,85	17,20
50	40	17,09	14,54	19,73
	50	15,84	26,12	15,48
	60	12,98	25,02	18,70
60	40	17,86	18,45	20,88
	50	26,26	19,92	9,40
	60	19,92	19,77	20,50
80	40	22,84	26,22	22,96
	50	18,97	26,23	25,46
	60	22,71	25,47	24,25

Se observa que el contenido porcentual de lignina en el bagazo pre-tratado se afectó significativamente, con la reducción aproximada del 50% en algunos de los casos en base al contenido de lignina en la muestra de bagazo sin pre-tratamiento (26,37%). Se determinó que la mejor condición de reacción para el pre-tratamiento de bagazo de caña de azúcar, se encuentra a una concentración de ácido fosfórico en solución acuosa del 60%, a 50°C durante 120 minutos, sin que el porcentaje de celulosa sea afectado significativamente.

Las siguientes figuras muestran la influencia de las variables de reacción sobre el porcentaje de lignina, en base a las condiciones seleccionadas como mejores para efectuar el pre-tratamiento.

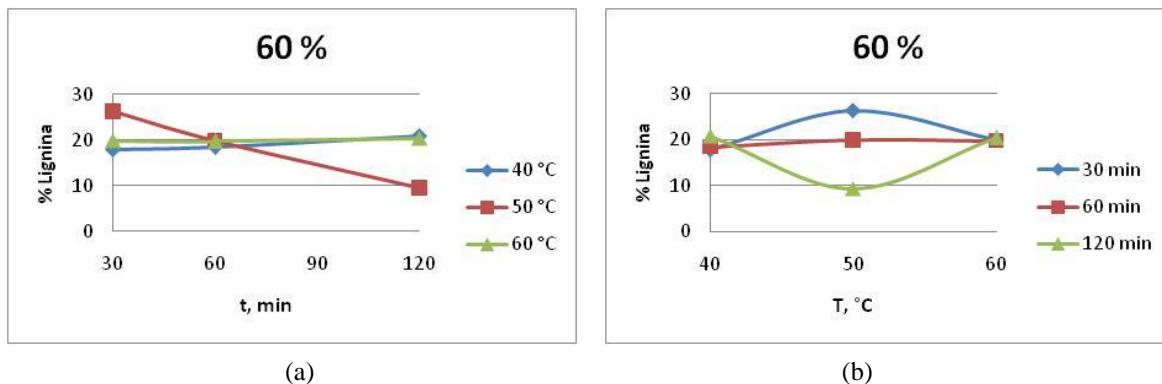


Figura 2. Influencia del tiempo de reacción (a) y temperatura (b) sobre el porcentaje de lignina a concentración constante.

Se observa que a concentración constante, la temperatura que presenta una mejor tendencia de reducción de lignina es de 50°C y en cuanto al tiempo se da a los 120 minutos.

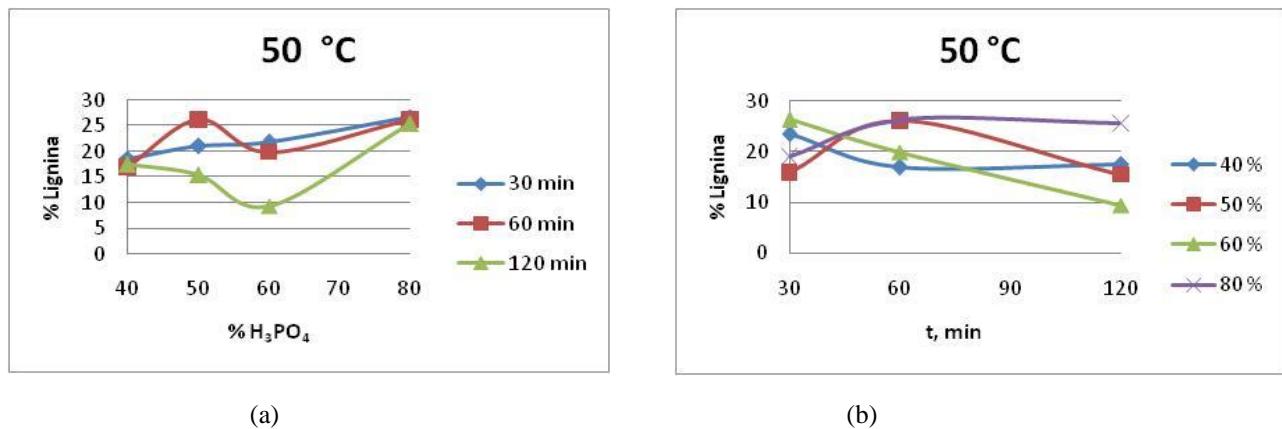


Figura 3. Influencia la concentración (a) y tiempo de reacción (b) sobre el porcentaje de lignina, a temperatura constante.

Se observa que a temperatura constante, el tiempo que presenta una mejor tendencia de reducción de lignina es de 120 minutos, y en cuanto a la concentración, esta se encuentra en el intervalo de 40 a 60%.

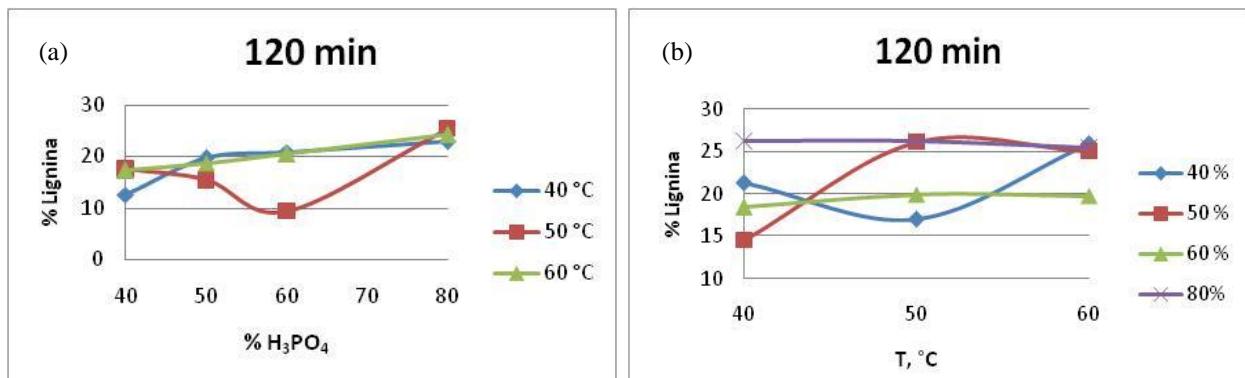


Figura 4. Influencia de la concentración (a) y temperatura (b) sobre el porcentaje de lignina a concentración constante

constante.

Se observa que a tiempo constante, la temperatura que presenta una mejor tendencia de reducción de lignina es de 50°C, y en cuanto a la concentración, esta se encuentra a 80%.

De todo esto se puede concluir que las condiciones más convenientes, en cuanto a reducción del porcentaje lignina sin afectar significativamente el de celulosa, se da a concentraciones y temperaturas medias en tiempos prolongados.

El grado de hidrólisis y la velocidad del proceso dependen de muchos factores, entre otros del pH, de la temperatura, de la concentración de biomasa hidrolítica, del tipo de materia orgánica y del tamaño de partícula. El modelo que se obtuvo para hidrólisis con ácido sulfúrico, en el cual la constante de velocidad de reacción está en la función de la concentración de ácido, tiempo y temperatura sobre el proceso. Después de pre-tratar el bagazo a las condiciones establecidas y llevar a cabo la hidrólisis ácida, se cuantificaron los azúcares reductores totales, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentración de azúcares reductores totales (ART) en las muestras de bagazo de caña hidrolizado obtenidas a diferentes condiciones de reacción.

$H_2SO_4$ , %	$T$ , °C	Tiempo, min				
		10	20	40	60	90
4	30	0,33	0,52	0,08	0,50	0,43
	45	0,30	0,29	0,48	0,30	0,25
	60	0,11	0,28	0,26	0,33	0,25
	75	0,41	0,30	0,68	0,24	0,59
8	30	0,16	0,16	0,19	0,02	0,30
	45	0,16	0,15	0,23	0,17	0,19
	60	0,07	0,12	0,17	0,24	0,29
	75	0,18	0,53	0,60	0,94	0,92
12	30	0,17	0,14	0,07	0,24	0,14
	45	0,07	0,04	0,14	0,01	0,12
	60	0,04	0,01	0,03	0,03	0,14
	75	0,11	0,25	0,65	0,20	0,14
16	30	0,18	0,25	0,27	0,17	0,01
	45	0,01	0,01	0,26	0,20	0,12
	60	0,28	0,16	0,16	0,07	0,44
	75	0,21	0,43	0,69	1,18	0,29

Para cada uno de los experimentos se determinó la conversión en base a la cantidad de celulosa y hemicelulosa total en bagazo de caña de azúcar obtenida experimentalmente (70,3%), obteniendo

que el mayor porcentaje de conversión a una concentración de ácido de 16%, a 75°C durante 60 minutos, con un valor de 4,54%.

Con los datos obtenidos (en base a la masa no degradada) se probaron diferentes órdenes de reacción. Los datos se representaron y se efectuó un análisis de regresión lineal para determinar las ecuaciones respectivas y sus correlaciones. Se determinó valor de la constante de velocidad de reacción,  $k$ , y se representó como una función de las diferentes concentraciones de ácido con el fin de observar el comportamiento de dicha constante para cada temperatura de reacción. Haciendo una comparación entre las correlaciones para cada orden de reacción, se observó que el mejor orden de reacción correspondiente a la reacción es de primer orden. Por último, se calculó la energía de activación, obteniendo los resultados de la Tabla 5.

Tabla 5. Energía de activación en función de la concentración.

Concentración %	<i>E, cal/mol</i>
4	$3,2 \cdot 10^3$
8	$11,5 \cdot 10^3$
12	$6,3 \cdot 10^3$
16	$0,8 \cdot 10^3$

Se observa que para la concentración de 16% se obtuvo una energía de activación aparente de  $0,8 \cdot 10^3$  cal/mol, mucho menor que las otras concentraciones, lo cual es la condición más favorable para llevar a cabo la hidrólisis ácida a temperaturas mayores.

#### 4. CONCLUSIONES

Se demostró que el pre-tratamiento de bagazo de caña de azúcar con ácido fosfórico es eficiente en la reducción de lignina. En base al porcentaje de celulosa en bagazo sin pre-tratamiento (53,73%), la cantidad final no se afectó significativamente, lo cual es favorable para la posterior hidrólisis y obtención de azúcares reductores totales. El contenido porcentual de lignina en el bagazo pre-tratado se afectó de manera significativa, con la reducción aproximada del 50% en algunos de los casos en base al contenido de lignina bagazo sin pre-tratamiento (26,37%). Se determinó que las mejores condiciones de reacción para el pre-tratamiento de bagazo de caña de azúcar, se encuentra a una concentración de ácido fosfórico en solución acuosa del 60%, a 50°C durante 120 minutos.

En general, se concluyó que las condiciones más convenientes, en cuanto a reducción del porcentaje lignina sin afectar significativamente el de celulosa, se da a concentraciones y temperaturas medias en tiempos prolongados.

En cuanto a la hidrólisis ácida con ácido sulfúrico (tratamiento), se obtuvo el mayor porcentaje de conversión a azúcares reductores totales a una concentración de ácido de 16%, a 75°C durante 60 minutos, con un valor de 4,5%, correspondiente a una reacción de primer orden. Se determinó, para la concentración de 16%, una energía de activación aparente de  $0,8 \cdot 10^3$  cal/mol, mucho menor que las otras concentraciones, lo cual es la condición más favorable para llevar a cabo la hidrólisis ácida a temperaturas altas.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chaves M. La caña de azúcar como materia prima para la producción de alcohol carburante. En: Congreso de ATACORI, Memoria: (15). (2004)
- [2] Sánchez O, Cardona C “Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas”, *Interciencia*, **30**, 11 (2005)
- [3] Wei-Ching W, Chu-Yang C “Study of the bioethanol production: degradation of the lignocellulosic biomass wastes by using the dilute acids pretreatment”. The 4th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agricultural and Biosystems Engineering, mayo 2008, p 27–29.
- [4] Geoffrey M, Zhiguang Z, Percival Z “Efficient Sugar Release by the Cellulose Solvent-Based Lignocellulose Fractionation Technology and Enzymatic Cellulose Hydrolysis”, *J. Agric. Food Chem.*, **56** (17), 7885 (2008)
- [5] Pernalete Z, Pina F, Suarez M “Fraccionamiento del bagazo de caña de azúcar mediante tratamiento amoniacal: efecto de la humedad del bagazo y la carga de amoníaco”, *Bioagro.*, **20**(1), 3 (2008)
- [6] Demirbas A “Bioethanol from Cellulosic Materials: A Renewable Motor Fuel from Biomass”, *Energy Sources*, **27**, 327 (2005)
- [7] Sun Y, Cheng J “Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review”, *Bioresource Technology*, **83**, 1 (2002)
- [8] Rabelo S, Maciel R, Costa A “A Comparison Between Lime and Alkaline Hydrogen Peroxide Pretreatments of Sugarcane Bagasse for Ethanol Production”, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **144**(1), 87 (2008)
- [9] McMillan JD “Pretreatment of lignocellulosic biomass”. En ME Himmel, Baker JO, Overend RP (Editores) “Enzymatic conversion of biomass for fuel production”, American Chemical Society, Washington. 292 (1994)
- [10] Sarrouh B, Jover J, González E “Estudio de la Hidrólisis ácida del bagazo con ácido sulfúrico concentrado utilizando dos variantes de una sola etapa y una sola etapa modificada para la obtención de etanol”, *Ingeniería e Investigación*, **25**(3), 34 (2005).
- [11] Flores R, Muñoz R, Flores B, Cano K “Estimación de la generación de energía a partir de biomasa para proyectos del programa de mecanismo de desarrollo limpio”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, **7** (1). Distrito Federal, México, 35 (2008).
- [12] Abdullah N, Ejaz N, Abdullah M, Alim U, Firdous S “Lignocellulosic degradation in solid-state fermentation of sugar cane bagasse by *termitomyces* SP”. *Micología aplicada Internacional*, **18**(2), 15 (2006)
- [13] Ferrer JR, Páez G, Arenas De Moreno L, Chandler C, Mármol Z, Sandoval L “Cinética de la hidrólisis ácida de bagacillo de caña de azúcar”, *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, **19**, 23 (2002)
- [14] Marsden W, Gray P, Quinlan M “Evaluation of the DNS method for analysing lignocellulosic hydrolysate”, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **32**, 1016 (1982)
- [15] Miller GL “Use of Dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar”, *Anal. Chem.*, **31**, 426 (1959)
- [16] Vaz Rossell CE “Etanol como combustible. Programa general de las jornadas sobre biocombustibles, cultivos no tradicionales y su impacto en las economías regionales”. Mendoza, Argentina (2006)