

# Hidrólisis química y digestión anaerobia termofílica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

**Yosvany Díaz Domínguez**

Correo electrónico: ydiaz@quimica.cujae.edu.cu

**Artículo Original**

**Elina Fernández Santana**

Correo electrónico: elina@quimica.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

**Iлона Sárvári Horváth**

Correo electrónico: ilona.horvath@.hb.se

Escuela de Ingeniería, Universidad de Borås Suecia

**Susana Rodríguez Muñoz**

Correo electrónico: susana@quimica.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

## Resumen

La hidrólisis de las macromoléculas que componen la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, puede ser llevada a cabo por métodos químicos, físicos y biológicos, teniendo todos como objetivo el desdoblamiento de las moléculas complejas en unidades monoméricas más simples. De esta manera se mejora la degradación de la materia orgánica y se hace más eficiente el proceso de obtención de biogás por vía anaerobia. En el trabajo se aplican métodos químicos utilizando como reactivos hidróxido de sodio (NaOH) y peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ). La demanda química de oxígeno soluble (DQOs), el rendimiento máximo de metano y la velocidad de producción del mismo fueron parámetros empleados para evaluar la efectividad de los métodos. Se logró incrementar la degradación del residuo permitiendo, mediante un análisis comparativo, determinar las mejores condiciones de trabajo para esta etapa y su posterior incidencia en la generación de biogás, específicamente en el metano.

Palabras claves: pretratamiento químico, hidrólisis química, biogás, metano

Recibido: 8 de abril del 2013

Aprobado: 26 de noviembre del 2013

## INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos, el hombre ha comenzado a ocuparse de los problemas medioambientales debido a su acelerado deterioro. Por tal motivo se hace cada vez más importante el conocimiento de los mecanismos que rigen la interacción humana-medio ambiente y las tendencias de cambio del planeta. Anualmente se producen millones de toneladas de residuos sólidos que no disponen de un tratamiento adecuado. En vez de pensarse en soluciones que cierren el ciclo de vida y ser devueltos a la tierra, se destinan de forma indiscriminada a contaminar el entorno.

"La complejidad de estos residuos impone el estudio de métodos alternativos que contribuyan a mejorar la eficiencia del proceso subsiguiente de estabilización, reconociéndose que el paso limitante es la etapa de hidrólisis del material orgánico complejo". La hidrólisis de las macromoléculas que componen los diferentes residuos sólidos, puede ser llevada a cabo por métodos químicos, físicos y biológicos, teniendo todos como objetivo el desdoblamiento de las moléculas complejas en unidades monoméricas más simples, para de esta forma, aumentar la degradación de la materia orgánica y hacer más eficiente el proceso de digestión

anaerobia [1]. El fenómeno antes expuesto se pone de manifiesto también cuando se estabilizan lodos residuales secundarios por vía anaerobia donde resulta la hidrólisis de los sólidos suspendidos la etapa más complicada. El motivo es para este caso la presencia de exopolímeros que forman parte del floculo [2].

Actualmente Suecia es uno de los países, que a nivel mundial, se destaca en la producción de biogás. La planta industrial Sobacken ubicada en la ciudad de Borås, desarrolla este proceso a partir de residuos sólidos urbanos provenientes de dicha urbe. Afectaciones en su rendimiento determinan la necesidad de encontrar alternativas económicamente factibles que garanticen mejorar la eficiencia de generación del biogás.

Una variante muy utilizada es la hidrólisis alcalina o pretratamiento alcalino, el que refiere la utilización de soluciones alcalinas como por ejemplo NaOH, hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) o amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) para eliminar lignina, parte de hemicelulosa y de manera eficiente la accesibilidad de la enzima a la celulosa se incrementa. Este método puede ser ejecutado a bajas temperaturas pero en un tiempo muy prolongado y altas concentraciones de base. Los pretratamientos con NaOH pueden ser clasificados como *de alta concentración y baja concentración*. En estos últimos específicamente con porcentajes de NaOH entre 0,5 y 4 se usan altas temperaturas y presiones. El NaOH a altas temperaturas desintegra la lignina y la hemicelulosa, eliminándola de la fase sólida. En el caso del pretratamiento con concentraciones elevadas considerándose porcentajes de NaOH entre 6 y 20, se aplican bajas temperaturas y se trabaja a la presión atmosférica [3], [4].

Estudios realizados muestran la eficacia de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), NaOH,  $\text{H}_2\text{O}_2$  y ozono ( $\text{O}_3$ ) en pretratamientos para la conversión enzimática de tallo de algodón. En estos se determinó que el pretratamiento con NaOH resultó el de mejores niveles de delignificación con un 65 % empleando 2 % de NaOH en 90 min., a una temperatura de 121°C y la conversión de celulosa fue de 60,8 % [5]. El pretratamiento con NaOH puede obtener mayor proporción de conversión enzimática de celulosa comparado con el empleo del pretratamiento con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  [6]. Además, el pretratamiento básico es el método más efectivo en la ruptura de las cadenas de esteres entre la lignina, hemicelulosa y celulosa, evitando la fragmentación del polímero de hemicelulosa [7]. Este pretratamiento básico también se ha usado en la producción de biogás, por ejemplo, en el tratamiento de lodos con 0,3 g NaOH/ g sólido volátil (SV) a 130 °C por 5 min., obteniéndose entre un 40 y un 50 % de solubilización de sólidos volátiles y más de un 200 % de mejoras en la producción de metano. Un tratamiento similar por 5 g/kg de NaOH en residuos sólidos urbanos ha mejorado en un 35 % la formación de biogás [7].

Un pretratamiento con NaOH fue aplicado a paja de maíz con el objetivo de ser empleada para la obtención de biogás por vía anaerobia. La combinación reactivo-sustrato fue

de 8 % peso de NaOH. Se demostró la efectividad que posee este reactivo químico en la ruptura de estructuras lignocelulósicas, obteniéndose una disminución de un 2,83 % de lignina, 14,11 % de celulosa y un 15,88 % de hemicelulosa. De esta forma la producción de biogás se incrementó en 207 % lo cual supera en 16,58 % a la producción que se logra con la paja de maíz que no recibe pretratamiento con NaOH [8]. También se ha investigado la efectividad del hidróxido de sodio en el tratamiento de pulpa de papel previo a la digestión anaerobia. La concentración óptima del reactivo químico fue de 8 g de NaOH/100g de sólidos totales (ST) de pulpa. En estas condiciones se logra un incremento de la solubilización del residuo expresado en términos de la demanda química de oxígeno soluble (DQOs) de 83 %. La digestión anaerobia para las condiciones óptimas del pretratamiento reportaron 0,34  $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg}$  de SV eliminado, siendo muy superior a la producción de la muestras sin pretratar (183,5 %) [9]. "En particular la hidrólisis alcalina es el más barato y efectivo método químico disponible en términos de capacidad de solubilización" [7].

Otro método utilizado es la hidrólisis alcalina con adición de peróxido. En este método la lignocelulosa es absorbida en agua con pH ajustado (pH 11-12 empleando NaOH) y  $\text{H}_2\text{O}_2$  a temperatura de cuarto (21°C) por un período de tiempo (6-24 h). Empleando pretratamiento con peróxido alcalino a paja de trigo puede ser convertido a azúcar fermentable con un excelente rendimiento de 97 % por sacarificación enzimática [10]. En otro reporte se muestra que un tratamiento de peróxido alcalino diluido (7,5 %  $\text{H}_2\text{O}_2$ , v/v; pH 11,5; 35°C; 24 h) es un método efectivo para pretratar cáscara de arroz, resultando una conversión casi completa de 96% de cáscara de arroz a azúcar después de la hidrólisis enzimática [11]. Se ha aplicado una combinación de pretratamientos físico (explosión de vapor) con el pretratamiento peróxido alcalino lográndose incrementar la solubilización de un residuo lignocelulósico y mejorado la producción de biogás en un 107 % [12].

El presente trabajo tiene el objetivo de aplicar dos pretratamientos químicos basados en el empleo de hidróxido de sodio y la combinación de este con peróxido de hidrógeno. De esta manera se pretende incrementar la biodegradación de la fracción orgánica de un residuo sólido urbano sintético y mejorar el rendimiento de metano que se obtiene en la digestión anaerobia del mismo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolla en la universidad sueca de Borås. Teniendo en cuenta la complejidad de los residuos sólidos urbanos y la manera de coleccionar una muestra representativa, se prepara un residuo sintético en el laboratorio. Dicho residuo se elabora mezclando manualmente los componentes según datos de composición de los residuos que se reciben en la planta de biogás Sobacken ubicada en la ciudad. La composición física media por componentes del residuo se reporta en la figura 1. El contenido de sólidos totales (ST) es de 36,38 %, el de sólidos volátiles (SV) fue de 68,77 % referidos a los ST. La DQOs obtenida es de 3120 mg/L.

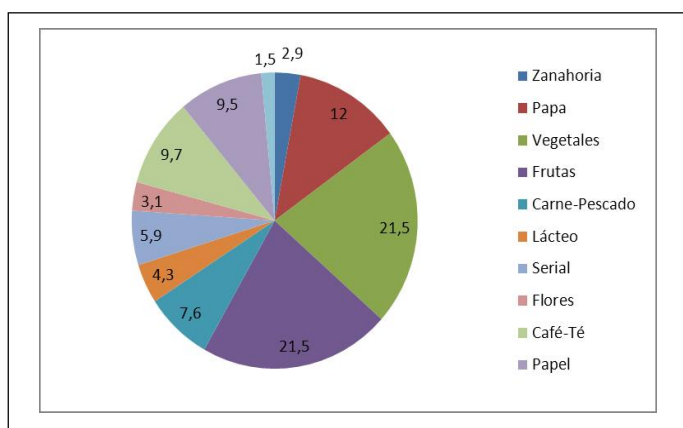


Fig.1. Composición media en porcentaje del residuo sintético

### Pretratamientos y sistema experimental

La hidrólisis alcalina se desarrollará en una autoclave que garantiza los valores de temperatura de 100, 110 y 120 °C para que ocurra la hidrólisis química por acción de NaOH, suministrado en concentraciones de 2 y 4 g/L. El tiempo del pretratamiento es de 10 min.

El pretratamiento alcalino con adición de peróxido de hidrógeno se lleva a cabo en una zaranda con un nivel de agitación constante de 122 rpm y a temperaturas de 21 y 50 °C. Se emplea el NaOH y se combinará con el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a una concentración de 3 g/L de dos formas, una simultánea donde se ponen en contacto al mismo tiempo con el residuo por un tiempo de 24 h y la otra manera es consecutiva donde el residuo entra en contacto por 24 h con el NaOH y luego de transcurrido ese tiempo se pone en contacto con el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por otras 24 h.

La efectividad de estos pretratamientos se evaluará en función del rendimiento de la solubilización, el que es cuantificado a través del incremento de la demanda química de oxígeno soluble (DQOs). Se aplican los métodos estándares para las determinaciones de DQOs, sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) [13]. Las experiencias se llevaron a cabo en reactores de 100 mL de capacidad efectiva a los cuales se les adicionó 100mL del residuo y una concentración de reactivos químicos para cada uno de ellos según el diseño de experimento. Cada reactor operó en régimen discontinuo y en ausencia de oxígeno del aire.

### Diseño estadístico

El experimento en la hidrólisis alcalina se concibió según un diseño factorial 3<sup>2</sup> aleatorio con réplicas. Los factores serán la concentración de hidróxido de sodio y la temperatura. Los niveles fijados para la concentración de hidróxido de sodio fueron de 0, 2 y 4 g/L y para la temperatura serán de 100, 110 y 120 °C. Para la hidrólisis alcalina con adición de peróxido de hidrógeno el experimento se desarrolla de acuerdo con un diseño factorial 2<sup>2</sup> con réplicas. Los factores serán la temperatura y la forma en que se combina el hidróxido de sodio con el peróxido de hidrógeno. Los niveles de estudio de la temperatura son 21 y 50 °C y para la forma de combinación de los reactivos se estudia la mezcla simultánea y la consecutiva. Se emplea el programa STATGRAPHICS Centurión, versión XV.

### Digestión anaerobia. Método para la determinación del potencial de metano de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

Para la digestión anaerobia se aplica el método que consiste en la incubación de una pequeña cantidad del residuo en contacto con un inóculo activo de un proceso anaerobio, realizándose la medición de la generación de metano. Las mediciones del volumen de gas y la composición del mismo se realizan periódicamente [14]. En el sistema experimental se emplearon frascos de 118 mL. Se impone como régimen de trabajo el discontinuo, o sea, se adiciona una cantidad del residuo al recipiente donde estará en contacto con el inóculo, después se cierra el sistema. De esta manera durante el experimento no se suministrará más residuo. Se utilizó un inóculo de la planta de biogás Sobacken que opera en condiciones termofílicas de 55 °C. La operación se desarrolla también en condiciones termofílicas preparándose blancos para medir la generación de metano a partir del inóculo. Se alimenta a los reactores, las muestras sin previo tratamiento, fueron pretratadas con NaOH a temperatura de 120 °C y la pretratada con la combinación simultánea de NaOH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a temperatura de 50 °C. La cantidad adicionada de residuo fue 5 g (conteniendo 0,345 g SV) y 20 mL de inóculo. La figura 2 muestra el sistema experimental.



Fig.2. Esquema del reactor experimental

### Determinación de la potencialidad de CH<sub>4</sub> teórica. Actividad metanogénica específica (AME)

La determinación de la potencialidad teórica de metano está basada en un método empírico que contempla los porcentajes de grasas, proteínas y carbohidratos presentes en el residuo. La caracterización del residuo en cuanto a dichos componentes fue tomada a partir de estudios previos para residuos domésticos. En este se considera que la composición de dichos residuos es 20 % de grasas, 20 % de proteínas y 60 % de carbohidratos. Teniendo en cuenta lo antes expuesto y conociendo que para grasas se producen 0,85 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV, para proteínas es de 0,50 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV y para carbohidratos es 0,40 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV entonces el

potencial teórico se puede calcular a través de la ecuación 1 [15]:

$$CH_4 \text{ teórico} = \%_{\text{grasas}} * \left( \frac{m^3 \text{ CH}_4}{SV} \right)_{\text{grasas}} + \%_{\text{proteínas}} * \left( \frac{m^3 \text{ CH}_4}{SV} \right)_{\text{proteínas}} + \%_{\text{carbohidratos}} * \left( \frac{m^3 \text{ CH}_4}{SV} \right)_{\text{carbohidratos}} \quad (1)$$

Siendo:

$CH_4$  teórico: Potencialidad teórica de metano.

% (grasas, proteínas, carbohidratos): Porcentajes presentes en el residuo.

$m^3 CH_4/SV$ : Producción de metano por kilogramo de sólido volátil de grasas, proteínas y carbohidratos.

La AME se determina a partir de la siguiente expresión:

$$AME = \frac{R}{(FC * V * SV)} \text{ (g DQO-CH}_4\text{/gSVd)} \quad (2)$$

Siendo:

$R$ : Velocidad de producción de metano. Valor de la pendiente en el período de tiempo que se observa la máxima velocidad ( $mLCH_4/d$ ).

$CF$ : Factor de conversión de  $mLCH_4$  a g DQO ( $T= 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $FC$  aproximado a 350) [16].

$V$ : Volumen del lodo (mL)

$SV$ : Concentración de sólidos volátiles en el lodo (gSV/mL)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Hidrólisis alcalina:** Al adicionar el agente químico, se inicia la hidrólisis del residuo, es decir, el desdoblamiento de la materia orgánica compleja, lo que se evidencia con el aumento de la DQOs a los 10 min., de iniciado el proceso. Los resultados alcanzados durante dicho pretratamiento, además de la desviación estándar, se muestran en la figura 3.

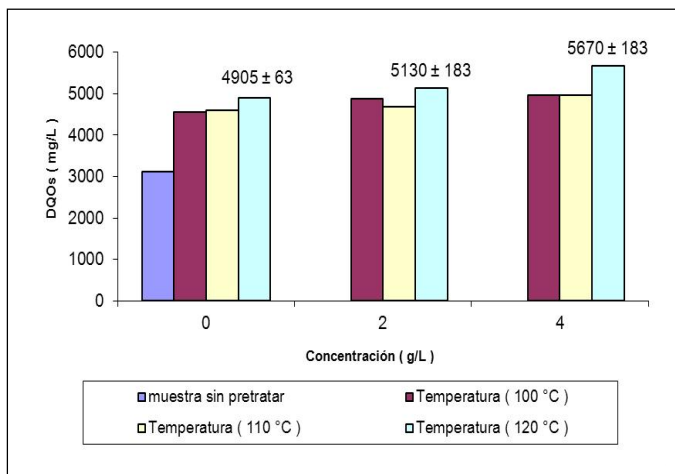


Fig. 3. Efecto del tratamiento con NaOH en la DQOs a diferentes temperaturas

Se demostró que el incremento de DQOs obtenido en el pretratamiento alcalino para las diversas condiciones evidenció diferencias significativas (95 % de confianza) respecto a una muestra del residuo que no fue sometida a pretratamiento. De acuerdo con los resultados anteriores, se procedió a obtener un modelo que explicase el comportamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, ante el pretratamiento químico, teniendo en cuenta las condiciones experimentales estudiadas. Los efectos se analizan a partir del diseño, donde se ha particionado la variabilidad de la DQOs para cada uno de los mismos. De esta manera se prueba la significación estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, tres efectos tienen una probabilidad (valor-P) menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0 %. Los resultados se aprecian en la tabla 1.

Efectos e interacciones	P-valor < 0,05
Concentración	0,000 1
Temperatura	0,000 3
Interacción Temperatura	0,004 2

El modelo obtenido solo tiene en cuenta los efectos que influyeron significativamente, quedando representado por la ecuación 3.

$$DQOs = 34\ 445,80 + (129,58 * c^2_{(NaOH)}) - (566,58 * T) + (2,67 * T^2) \text{ (mg/L)} \quad (R^2=84,29\%) \quad (3)$$

Siendo:

DQOs: Demanda química de oxígeno soluble (mg/L).

$c$ : Concentración de NaOH (g/L).

$T$ : Temperatura del pretratamiento ( $^\circ\text{C}$ ).

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 84,29 % de la variabilidad en DQOs. Existe un estudio realizado para incrementar la biodegradabilidad de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en Cuba, empleando un pretratamiento químico con hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Las variables de estudio fueron la concentración del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y el tiempo. El modelo tiene un grado de ajuste, ( $R^2= 92,36 \%$ ) con un 95 % de confianza [17]. Este resultado puede tomarse en cuenta para inferir cuán cercano está el grado de ajuste del modelo obtenido en el presente trabajo (independientemente de las variables consideradas en cada uno).

EL mejor valor para la DQOs se obtiene para los valores de temperatura y concentración más elevados

(120°C y 4 g/L), lo que se corrobora con el modelo antes expuesto. El resultado es 5 494,17 mg/L, demostrándose que el grado de solubilización aumenta con el incremento de la concentración del reactivo químico [18]. Además, la temperatura favoreció este proceso pudiendo haber incidido en la ruptura de las macromoléculas poliméricas. Este supuesto está dado por el consumo necesario de energía que se debe garantizar siempre que se desee romper enlaces y por consiguiente romper una estructura.

**Hidrólisis alcalina con adición de peróxido de hidrógeno:** En este experimento se adicionó el peróxido de hidrógeno de forma combinada con el hidróxido de sodio. En ambos casos se evidenció un incremento de la DQOs de manera significativa (95 % de confianza). En la figura 4 se muestran los resultados de la DQOs alcanzados además de la desviación estándar.

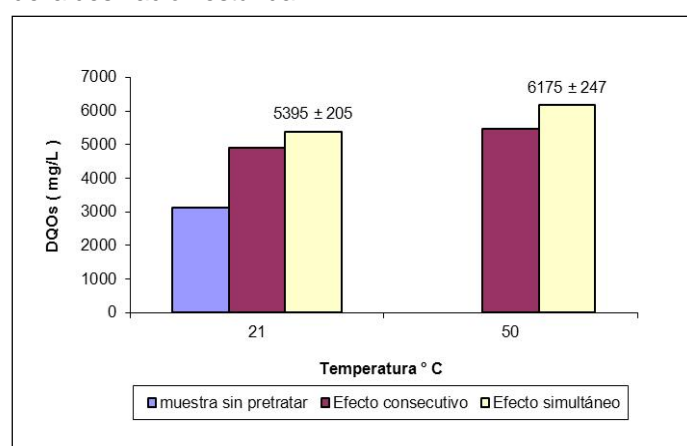


Fig. 4. Efecto del tratamiento con NaOH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a diferentes temperaturas en la DQOs

De acuerdo con el diseño de experimento, la combinación de los reactivos químicos NaOH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es una variable cualitativa que se considerará en el análisis solo para evaluar la forma de aplicación de dicho pretratamiento. El efecto simultáneo es el de mejores resultados. En cuanto a la temperatura se obtiene el mayor incremento de la para los 50°C, teniendo un valor máximo de 6175 mg/L.

#### Digestión anaerobia

La digestión anaerobia se desarrolló durante un período de 32 días. La potencialidad de metano teórica fue de 510 mL CH<sub>4</sub>/g SV y tomando en cuenta que la alimentación realizada a cada digestor fue de 0,345 g SV, entonces el valor será de 175 mL de metano. Los valores obtenidos para el rendimiento máximo de metano ( $Y_{máx}$ ) en cada muestra, el rendimiento de metano para el octavo día de digestión y la velocidad de producción de metano teniendo en cuenta las réplicas se muestran en la tabla 2.

Como se observa en la tabla 2 el rendimiento máximo de metano (cantidad máxima de metano que produce la muestra durante la digestión) obtenido para todas las muestras se encuentra en el mismo orden que el potencial teórico determinado (510 mL CH<sub>4</sub>/g SV), existiendo valores superiores e inferiores si se compara numéricamente la

producción de cada reactor con dicho valor teórico. Sin embargo, no se evidencian diferencias significativas que pudieran invalidar el criterio empleado en cuanto al contenido de grasas, proteínas y carbohidratos con lo que fue calculado el potencial teórico de metano anteriormente reportado. Las muestras que manifestaron mayor rendimiento máximo de metano fueron, las que no recibieron tratamiento (I) y aquellas donde se aplicó NaOH (2 y 4 g/L) (III y IV). Para poder conocer si el efecto de los pretratamientos aplicados fue significativo en términos de obtener mayor cantidad de metano o generarlo con mayor rapidez, se realizó un análisis estadístico basado en la comparación del rendimiento de la muestra que no fue tratada con cada una de las que sí lo fueron. Estadísticamente se recurre a una comparación de dos muestras pareadas. El estadístico empleado fue la prueba-*t* y para todos los casos el valor-*P* fue mayor o igual que 0,05 con lo cual se demuestra que no existen diferencias entre los valores de  $Y_{máx}$ . Por tal motivo se demuestra que el efecto del pretratamiento no influye en el rendimiento máximo de metano bajo las condiciones experimentales de este trabajo.

En la figura 5 se presentan las curvas de acumulación de metano para todas las muestras, observándose que entre los ocho y los diez días de comenzada la digestión anaerobia el volumen de metano producido por las muestras excepto las pretratadas de manera combinada con NaOH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sobrepasan el 65 % del metano total que se produce. Los valores exactos se exponen en la tabla 3.

Este es un resultado interesante pues se corrobora que en este primer tiempo del proceso la producción es muy elevada, obteniéndose para algunas muestras entre 70 y 80 % del total de metano producido. Por tal motivo se utiliza el término  $Y_{8día}$  para evidenciar la producción de metano en ese tiempo. Si a esto se adiciona que los valores de porcentajes de producción de metano expuestos en la tabla 3 son para este intervalo de tiempo (ocho y diez) más elevados y que del día 12 en lo adelante comienzan a disminuir, entonces se puede enfocar el efecto del pretratamiento a estos primeros días de digestión en donde se ha generado un alto porcentaje de metano. Haciendo uso del estadístico *t* se realiza una comparación entre las cantidades de metano generadas por las muestras que fueron tratadas con 2 y 4 g/L de NaOH y la muestra sin tratar, tomando como base que a partir de lo expuesto en la tabla 3 las primeras produjeron entre un 11 y 14 % más de metano que las últimas.

Se demostró que existe diferencia significativa entre la muestra sin tratar y la tratada a 120°C y 4 g/L, ya que el valor de *t* fue de -5,346 99 asociado a una probabilidad de 0,033 242 7 que es menor que 0,05. De esta manera se puede atribuir tal comportamiento al tratamiento previo del residuo con NaOH, es decir, con la aplicación de este método se incrementó la velocidad de generación de metano de la fracción orgánica del residuo en estudio. En el caso del tratamiento con 2 g/L NaOH a 120°C no evidenció diferencias significativas.

Tabla 2  
Resultados de la digestión anaerobia termofílica del residuo

Tratamiento	$Y_{m\acute{a}x}$ (mLCH <sub>4</sub> /gSV)				$Y_{8\text{día}}$ (mLCH <sub>4</sub> /gSV)				$v(\text{CH}_4)_{8\text{día}}$ (NmLCH <sub>4</sub> /gSV/d)			
				media±DE*				media±DE*				media±DE*
I	592,31	511,73	585,15	563,06 ± 44,60	385,09	365,03	374,54	374,88 ± 10,03	48,13	45,62	46,81	46,85 ± 1,25
II	557,17	505,09	502,54	521,60 ± 30,83	354,22	336,22	349,99	346,81 ± 9,41	44,27	42,02	43,74	43,34 ± 1,17
III	540,86	530,22	563,44	544,84 ± 16,96	402,30	429,14	432,77	421,40 ± 16,64	50,28	53,64	54,09	52,67 ± 2,08
IV	507,03	552,52	517,99	525,84 ± 23,74	419,14	430,92	422,45	424,17 ± 6,07	52,39	53,86	52,80	53,01 ± 0,75
V	503,00	546,89	446,65	498,84 ± 50,24	94,77	100,62	58,25	84,54 ± 22,96	11,84	12,57	7,28	10,56 ± 2,86

donde:

$Y_{m\acute{a}x}$ : Rendimiento máximo de metano.

$Y_{8\text{día}}$ : Rendimiento de metano día ocho de la digestión.

$v(\text{CH}_4)_{8\text{día}}$ : Velocidad de producción de metano día ocho de la digestión.

I: Muestra sin tratar.

II: 0 g / L NaOH, 120°C.

III: 2 g / L NaOH, 120°C

IV: 4 g / L NaOH, 120°C

V: 2 g / L NaOH, 3 g / L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 50°C.

DE\*: Desviación estándar.

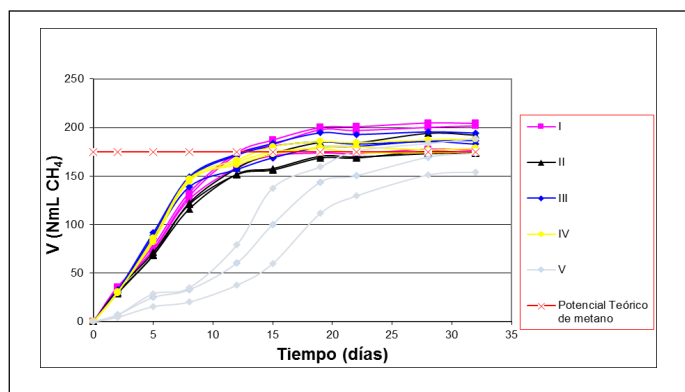


Fig.5. Volumen de metano (NmL) acumulado en el tiempo

Tabla 3 Porcentaje de volumen de metano a los ocho días de digestión					
	I	II	III	IV	V
% Vol	66,57	66,48	77,34	80,66	16,94

donde:

% Vol: Relación  $V(\text{CH}_4)_{8\text{día}} / V(\text{CH}_4)_{m\acute{a}x}$ .

I: Muestra sin tratar.

II: Muestra 0 g / L NaOH, 120°C.

III: Muestra 2 g / L NaOH, 120°C.

IV: Muestra 4 g / L NaOH, 120°C.

V: Muestra 2 g / L NaOH, 3 g / L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 50°C.

En el caso de las muestras pretratadas con la combinación NaOH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, la velocidad de producción de metano se mostró afectada presentando un valor bajo de 10,66 NmL CH<sub>4</sub>/gSV/d como promedio (el más bajo de todos). Este comportamiento pudo corroborarse cuando se determinó el metano producido a los ocho días, el que resultó ser de aproximadamente un 17 %. Tales resultados pueden estar relacionados probablemente con la presencia de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en las muestras en el momento de la digestión anaerobia, pues en la fase de pretratamiento se procedió adecuadamente con la adición de dicho reactivo al medio, garantizándose que el pH estuviera entre los valores de 11 y 12, de esta forma se evita que su carácter oxidante sea acentuado, fenómeno que se favorece en medio ácido. En cuanto a los digestores también fue ajustado el pH a valores entre 7,5 y 8 antes del proceso. Cuando se detiene la digestión al cabo de los 32 días se vuelve a medir este parámetro en cada digestor sin reportarse cambios en cuanto al intervalo de valores antes mencionado. Es probable que la cantidad de peróxido de hidrógeno adicionada en el pretratamiento no fuese consumida totalmente, quedando una cantidad que afectó posteriormente a los microorganismos, prolongándose la fase de adaptación de los mismos. Además, se debe tener en cuenta que la temperatura en este experimento fue de 50°C por debajo de la temperatura de ebullición del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (126°C), con lo cual no se espera que se haya favorecido la descomposición del reactivo. No obstante, el rendimiento de metano máximo obtenido para dichas muestras fue de 499 NmL CH<sub>4</sub> como promedio, bastante cercano al

rendimiento de las demás muestras, demostrándose que no existen diferencias significativas en cuanto a rendimiento máximo de metano.

El otro parámetro que se calculó fue la actividad metanogénica específica, en este caso para la muestra donde se logró incrementar de manera significativa la velocidad de producción de metano. El resultado obtenido fue de 0,134 g DQO-CH<sub>4</sub>/g SV d para la muestra pretratada superior a 0,103 g DQO-CH<sub>4</sub>/g SVd para la muestra que no se sometió a ningún tratamiento. Este parámetro es un indicador de la velocidad con que se produce el metano, complementándose de esta forma los resultados antes analizados.

## CONCLUSIONES

- Se demostró que los dos pretratamientos químicos con el empleo de NaOH y la combinación de NaOH con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> son alternativas favorables para incrementar la solubilización de la fracción orgánica del residuo sintético.
- Las condiciones óptimas en términos de maximizar la DQOs se obtuvieron para pretratamiento con hidróxido de sodio: concentración de NaOH: 4 g/L y temperatura: 120 ° C. Pretratamiento con adición de peróxido de hidrógeno: combinación: simultánea y temperatura: 50 ° C.
- Se demostró que es posible mejorar la velocidad de generación de metano a los ocho días de comenzada la digestión anaerobia en las muestras tratadas con NaOH de concentración 4 g/L a 120 ° C.

## REFERENCIAS

1. **LÓPEZ, Matilde; ESPINOSA, María del Carmen; ESCOBEDO, Rigoberto.** "Estudio comparativo del pretratamiento químico para mejorar la digestión anaerobia de residuos sólidos". *Revista CENIC Ciencias Biológicas*. 2005, vol. 36, núm. Especial, pp.1-2. ISSN: 0254-0525. Disponible en Web: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181220525025> [consultado 20 de enero de 2012].
2. **VIGUERAS CARMONA, Sergio Esteban; RAMÍREZ VIVES, Florina; NOYOLA ROBLES, Adalberto; MONROY HERMOSILLO, Oscar.** "Efecto del pretratamiento termo-alcalino en la digestión anaerobia mesofílica y termofílica de lodos residuales secundarios". *Revista mexicana de Ingeniería Química*. 2011, vol.10, núm.2, pp. 247-255. ISSN: 1665-2738. Disponible en Web: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v10n2/v10n2a9.pdf> [consultado 20 de enero de 2012]
3. **MIRAHMADI, Kambiz; MOHSENI, Madjid et al.** "Alkaline pretreatment of spruce and birch to improve bioethanol and biogas production". *BioResources*. 2010, vol. 5(2), pp. 928-938. ISSN: 1930-2126. Disponible en Web: [http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes\\_05/BioRes\\_05\\_2\\_0928](http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_05/BioRes_05_2_0928) [consultado 20 de enero de 2012]
4. **CABRERA RODRÍGUEZ, Emir; CURBELO HERNÁNDEZ, Caridad; KARIMI, Keikhosro; TAHERZADEH, Mohammad J.** "Efecto del pretratamiento con hidróxido de sodio a baja temperatura sobre la composición química y la hidrólisis enzimática del abeto". *Revista CENIC Ciencias Químicas*. 2012, vol. 43. Disponible en Web: <http://revista.cnic.edu.cu/revistaCQ/sites/default/files/articulos/CQ12-11.pdf> [consultado 12 de febrero de 2013].
5. **SILVERSTEIN, Rebecca; CHEN, Ye et al.** "Comparison of chemical pre-treatment methods for improving saccharification of cotton stalks". *Bioresource Technology*. 2007, vol.98, pp. 3000 - 3011. ISSN: 0960-8524. Disponible en Web: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17158046> [consultado 20 de enero de 2012].
6. **ZHAO, Xuebing; ZHANG, Lihua; LIU, Dehua.** "Comparative study on chemical pre-treatment methods for improving enzymatic digestibility of crofton weed stem". *Bioresource Technology*. 2007, vol. 42, pp. 1135 - 1139. ISSN: 0960-8524. Disponible en Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407005640> [consultado 20 de enero de 2012].
7. **TAHERZADEH, Mohammad J.; KARIMI, Keikhosro.** "Pretreatment of lignocellulosic waste to improve in ethanol and biogas production": A review. *International Journal of Molecular Science*. 2008, vol.8 Especial, pp. 13-15. ISSN: 0363-907X. Disponible en Web: <http://www.readcube.com/articles/10.3390/ijms9091621> [consultado 20 de enero de 2012].
8. **ZHONG, Weizhang; ZHANG, Zhongzhi et al.** "Comparison of chemical and biological pretreatment of corn straw for biogasproduction by anaerobic digestion". *Renewable Energy*. 2011, vol. 36, pp. 1875 - 1879. ISSN: 0960-1481. Disponible en Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110005744> [consultado 10 de febrero de 2012]
9. **YUNQIN, Lin; DEHAN, Wang. et al.** "Alkali pretreatment enhances biogas production in the anaerobic digestion of pulp and paper sludge". *Journal of Hazardous Materials*. 2009, vol. 170, pp. 366 - 373. ISSN: 0304-3894. Disponible en Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409006694> [consultado 10 de febrero de 2012].
10. **SAHA, Badal C.; COTTA, Michael A.** "Ethanol production from alkaline peroxide pretreated enzymatically saccharified wheat straw". *Biotechnology Progress*. 2006, vol. 22, pp. 449-453. ISSN: 8756-7938. Disponible en Web: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16599561> [consultado 10 de febrero de 2012].
11. **SAHA, Badal C.; COTTA, Michael A.** "Enzymatic saccharification and fermentation of alkaline peroxide pretreated rice hulls to ethanol". *Enzyme and Microbial Technology*. 2007, vol. 41, pp. 528-532. ISSN: 0141-0229. Disponible en Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141022907001512> [consultado 10 de febrero de 2012].
12. **TEGHAMMAR, Anna; YNGVESSON, Johan et al.** "Pretreatment of paper tube residuals for improved biogas production". *Bioresource Technology*. 2010, vol.101,

- pp. 1206-1207. ISSN: 0960-8524. Disponible en Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409012358> [consultado 10 de febrero de 2012].
13. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd edition. Association and the Water Environment Federation. 2012, Disponible en Web: [www.environmental-expert.com/22nd-edition-2012](http://www.environmental-expert.com/22nd-edition-2012) [consultado 10 de febrero de 2012].
14. **HANSENA, Trine L.; SCHMIDTA, Jens Ejbye. et al.** "Method for determination of methane potentials of solid organic waste". *Waste Management*. 2004, vol. 24, pp. 393-400. ISSN: 0956-053X. Disponible en Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X0300223X> [consultado 10 de febrero de 2012].
15. **DAVIDSSON, Asa.** "Increase of biogas production at wastewater treatment plants. Addition of urban organic waste and pre-treatment of sludge". *Water and Environmental Engineering*. Department of Chemical Engineering Lund University, Sweden, 2007. Disponible en Web: [http://books.google.com.cu/books/about/Increase\\_of\\_Biogas\\_Production\\_at\\_Wastewa.html?id=Zwt1MgAA\\_CAAJ&redir\\_esc=y](http://books.google.com.cu/books/about/Increase_of_Biogas_Production_at_Wastewa.html?id=Zwt1MgAA_CAAJ&redir_esc=y) [consultado 10 de febrero de 2012].
16. **PAGÉS DÍAZ, Josané.** "Potencialidad de residuos agroindustriales para producir biogás. Caso de Estudio EPG Camilo Cienfuegos. Tutores: Ileana Pereda Reyes, José María Ameneiros; Ilona Sarvári Horváth. Tesis de maestría, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, diciembre de 2010. Disponible en Web: <http://biblioteca.cujae.edu.cu/Tesis/Maestría%5CTesis70.pdf> [consultado 15 de enero de 2012].
17. **LÓPEZ, Matilde; ESPINOSA, María del Carmen.** "Effect of alkaline pre-treatment on anaerobic digestion of solid waste". *Waste Management*. 2008, vol. 28(11), pp. 2229-34. ISSN: 0956-053X. Disponible en Web: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18068345?> [consultado 20 de enero de 2012].
18. **CONVERTI, Attilio; DEL BORGHI, Marco.** "Alkaline hydrolysis for treatments of the organic fraction of municipal solid wastes and sludges". *Chemical Biochemical*. 1995, vol. 9, pp. 195-199. ISSN: 0352-9568. Disponible en Web: [http://www.dicnep.unige.it/old\\_site/.../luappa\\_98\\_2.pdf?](http://www.dicnep.unige.it/old_site/.../luappa_98_2.pdf?) [consultado 20 de enero de 2012].

## AUTORES

### Yosvany Díaz Domínguez

Ingeniero Químico, Máster en Ingeniería Ambiental, Instructor, Departamento de Fundamentos Químicos y Biológicos, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

### Elina Fernández Santana

Ingeniera Química, Doctora en Ciencias Técnicas, Profesora Titular, Departamento de Química, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

### Ilona Sárvári Horváth

Ingeniera Química, Doctora en Microbiología (Doctora en Ciencias Biológicas), Profesora Titular, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería, Universidad de Borås Suecia

### Susana Rodríguez Muñoz

Ingeniera Química, Doctora en Ciencias Técnicas, Profesora Auxiliar, Centro de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

## Chemical Hydrolysis and Thermophilic Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste

### Abstract

The hydrolysis of the macromolecules that compose the organic fraction of municipal solid waste can be taken for chemical, physical and biological methods, having all as aim the unfolding of the complex molecules in simpler monomer. Thereby the degradation of organic matter is enhanced and results more efficient the process of biogas via anaerobic. Chemical pretreatments were employed in the work using sodium hydroxide (NaOH) and hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) as reagents. The soluble chemical oxygen demand (COD), the maximum methane yield and the methane rates production were used to evaluate the pretreatment actions. The degradation of the waste was able to be increased by allowing a comparative analysis to determine the best working conditions for this stage and subsequently its impact in the generation of biogas, methane specifically.

Key words: chemical pretreatment, chemical hydrolysis, biogas, methane