



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Análisis cinético de la biodegradabilidad anaerobia de la cachaza con pretratamiento termoalcalino en la producción de metano

Kinetic analysis of biodegradability anaerobia of the filter cane with pre-treatment thermoalcalino in the production of methane

Jorge Manuel Ríos Obregón¹, Regla María Bernal Gutiérrez¹, Lisbet López González², Janet Jiménez Hernández², Yelinnay García Pérez de Villamil³, Leobel Morell Perez. .

¹Universidad Estatal Amazónica, Ecuador, ²Universidad de Sancti Spiritus “José Martí Pérez”, Cuba, ³Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza, Ecuador

*Autor de correspondencia:  jrios@uea.edu.ec (J.M. Ríos Obregón)

Resumen

La cachaza, es el principal residuo del proceso de fabricación de azúcar y su elevado volumen se ha convertido en un importante contaminante del entorno. El pretratamiento termoalcalino constituye un método eficaz dada la naturaleza de la cachaza y permite una mayor producción de metano en condiciones anaeróbicas. En esta investigación se realiza un análisis cinético de la biodegradabilidad anaeróbica de la cachaza previamente tratada, a diferentes tiempos, con hidróxido de sodio NaOH, como agente químico y temperatura de 75 °C. Para el estudio se tomó cachaza proveniente el ingenio azucarero “Melanio Hernández”, provincia de Sancti Spiritus; Cuba y su caracterización físico-química se realizó mediante el análisis de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y Ph. Se determinaron los parámetros cinéticos por digestión anaeróbica en condiciones mesófilicas (37± 1 °C) se obtiene que los modelos cinéticos que describieron el mejor comportamiento de la digestión anaerobia fueron el de Hill y Chapman con un alto coeficiente de correlación. Los menores rendimientos alcanzados comparados con la literatura para otros sustratos pueden estar afectados por compuestos no deseados que pudieran solubilizarse y afectar el proceso de digestión anaerobia. La oxidación de la lignina a compuestos fenólicos solubles es un riesgo por su posible efecto inhibitorio sobre el proceso de digestión anaerobia. Entre ellos, se encuentran ácidos, aldehídos y alcoholes aromáticos. También las reacciones de Maillard pueden ocurrir bajo condiciones termo-alcalinas con sustratos que contienen proteínas y carbohidratos, como es el caso de estudio, con la formación de compuestos recalcitrantes como son las melanoidinas.

Palabras claves: Hidrólisis, residuos, digestión anaerobia, metano, cachaza, pretratamiento

Abstract

Filter cane is the main residue of the sugar manufacturing process and its high volume has become an important pollutant of the environment. The thermoalkaline pretreatment is an effective method given the nature of filter cane and allows a greater production of methane in anaerobic conditions. In this research, a kinetic analysis of the anaerobic biodegradability of the previously treated filter cake is carried out, at different times, with sodium hydroxide NaOH, as chemical agent and temperature of 75 °C. For the study filter cane was taken from the sugar mill "Melanio Hernández", located in the province of Sancti Spiritus; Cuba and its physical-chemical characterization was carried out through the analysis of total solids (ST), volatile solids (SV) and Ph. Kinetic parameters were determined by anaerobic digestion in mesophilic conditions (37 ± 1 °C) is obtained that the kinetic models that describe the improved performance of anaerobic digestion were Chapman Hill and with a high correlation coefficient. The lower yields achieved compared with the literature for other substrates may be affected by undesirable compounds that could be solubilized and affect the anaerobic digestion process. Oxidation



of lignin to soluble phenolics is a risk for possible inhibitory effect on the anaerobic digestion process. Among them are acids, aldehydes and aromatic alcohols. Maillard reactions can also occur under thermo-alkaline conditions with substrates containing proteins and carbohydrates, as is the case of the study, with the formation of recalcitrant compounds such as melanoidins.

Keywords: Hydrolysis, waste, anaerobic digestion, methane, filter cane, pretreatment.

Introducción

Millones de toneladas de residuos sólidos son producidos en la actualidad y solo una pequeña parte se utiliza para la producción de energía; el resto contamina el medio ambiente. Es por ello que se impone la necesidad de estudiar estos residuos y aplicar métodos alternativos que contribuyan a mejorar la eficiencia del proceso de estabilización de los mismos.

La generación de energía a partir de biomasa es una de las fuentes renovables con mayor potencialidad en Cuba, proveniente de residuales de vacunos y de porcinos, de la producción de azúcar, alcohol, despulpadoras de café y de vertederos sanitarios, que constituyen hoy día, en su conjunto, una vía de contaminación ambiental. (Contreras, López, & Romero, 2006)

La cachaza o torta de filtro es el principal residuo de la industria del azúcar de caña, produciéndose de 30 a 50 Kg. por tonelada de materia prima procesada, lo cual representa entre 3 y 5 % de la caña molida. Este porcentaje y su composición varían con las características agroecológicas de la zona, con el cultivar cosechado, eficiencia de fábrica, método de clarificación empleado, entre otros factores. Esta por su alto contenido de materia orgánica insoluble 85 % (Sánchez et al., 1996), precio relativamente bajo y por los grandes volúmenes generados hacen de esta biomasa una fuente atractiva para los procesos de bioconversión.

A pesar de los múltiples usos que tiene la cachaza, permanecen grandes cantidades de este residuo sin ser utilizadas lo cual trae como consecuencia serios problemas de contaminación en las zonas destinadas a su deposición y solo una pequeña parte recibe algún tipo de tratamiento. Un método efecti-

vo y práctico que se aplica es someter este residual a deshidratación por calor, obteniendo como resultado un material más estable y de fácil manejo llamado melote (Sarria, 1990).

En Cuba se ha recurrido a la descomposición anaerobia de la cachaza como alternativa de tratamiento (Cruz, 1991) (González, 1995). Para ello se emplean grandes volúmenes de agua (relación en volumen 1:4, cachaza: agua) con el objetivo de diluir el elevado contenido de sólidos en suspensión. Si bien hay avances en el estudio del tratamiento de residuos sólidos a nivel internacional, aún quedan aspectos sobre la posibilidad de una etapa previa de tratamiento, que permita la estabilización final del material orgánico complejo sin necesidad de grandes diluciones. Más aún, cuando se conoce de la aplicabilidad de la hidrólisis para diversos fines en materiales con elevado contenido de carbohidratos, lo que constituye el paso limitante en el proceso de digestión anaerobia.

En la actualidad, existen diferentes métodos de pretratamiento incluyendo mecánica, física, térmica y química (es decir, álcali, ácido, por oxidación), así como los métodos biológicos (A. Hendriks & G. Zeeman, 2009). En el pretratamiento termoalcalino varios trabajos confirman lo mencionado anteriormente. (J. M. B. R. L. Gossett, 1982) concluyó que la lignina pretratada por tratamiento termoalcalino en concentraciones por encima de un g L-1 tuvo un mayor efecto inhibitorio para los metanógenos.

En general, para todos los métodos de pretratamiento abordados la selección de los parámetros durante del pretratamiento resulta un aspecto importante para la productividad y/o el rendimiento de metano. En el caso del pretratamiento termoalcalino con NaOH,

podiera pensarse en utilizar las aguas de limpieza de los equipos que contiene sosa para pretratar la cachaza y abaratar el pretratamiento en cuanto al agua y la compra de este producto químico para su posterior conversión a bioetanol o biogás, lo que ofrecen alternativas de solución para el aprovechamiento del potencial económico y ambiental de dicha biomasa.

El objetivo de la investigación fue determinar el efecto del pretratamiento termoalcalino con NaOH en la biodegradabilidad de la cachaza para incrementar el rendimiento de metano.

Materiales y métodos

La cachaza usada en los experimentos se recolectó durante la zafra 2015 procedente de la Unidad Empresarial de Base Central Azucarero “Melanio Hernández” de la provincia de Sancti Spiritus. La cachaza se secó al aire por 72 horas, y posteriormente se almacenó a 4 oC en bolsas de nylon.

Métodos Analíticos

La caracterización fisico-química de la cachaza consistió en el análisis de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y pH, según los métodos estándares

El pH se midió con un electrodo Crison 52-11, conectado a un medidor de pH/mV Crison GLP 22. La resolución de la lectura es de 0,01 unidades de pH y la precisión de $\pm 0,01$. Se realizó la calibración con disolu-

ciones también estándar CRISON de pH 7,02 y 4,00 a 20 °C. Las muestras se mezclaron con agua a una proporción 1:10 y se agitaron a 150 rpm por espacio de 20 minutos (VDI 4630 2005).

Pretratamiento termoalcalino con hidróxido de sodio (NaOH)

En el pretratamiento termoalcalino con NaOH, se realizó en dos tiempos, con dos repeticiones en un tiempo de 1 hora y las otras dos en un tiempo de 2 horas. Las mezclas se prepararon añadiendo 3,8 g de hidróxido de sodio, 40 g de cachaza y 380 g de agua para mantener la dilución de 10 partes; las mismas fueron hermetizadas y cubiertas con papel de aluminio para evitar la pérdida de calor al medio y puestos en un termoreactor, alcanzando la temperatura requerida al cabo de los 29 minutos de haberlos puestos en el equipo.

Análisis cinético

La aproximación a la cinética del proceso se realizó mediante los modelos de Roediger (ecuación 4) (Borja, Martín, Durán, & R., 1991) , de Chapman (Mähnert, 2007) ; (Linke & Schelle, 2000) (ecuación 5), Hill (ecuación 6) (Mähnert, 2007) y el modelo de transferencia (ecuación 7). El ajuste a los modelos se realizó mediante un análisis de regresión no lineal, se utilizó el Software Statgraphics Centurion XVI para Windows y de esta forma fue posible obtener los parámetros cinéticos y rendimiento máximo de metano.

$$y_{(t)} = y_{max} \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (4)$$

$$y_{(t)} = y_{max} \cdot (1 - e^{-b \cdot t})^c \quad (5)$$

$$y_{(t)} = y_{max} \cdot (t^b / (c^b + t^b)) \quad (6)$$

$$y_{(t)} = y_{max} \cdot (1 - e^{-Rm(t-d)/y_{max}}) \quad (7)$$

Donde:

$y(t)$: Producción de metano acumulativa ($\text{mLN}_g^{-1}\text{SV}^{-1}$)

y_{max} : Rendimiento máximo de metano ($\text{mLN}_g^{-1}\text{SV}^{-1}$)

t : Tiempo de digestión (d)

k : Constante de velocidad aparente (d^{-1})

b, c : Constantes del modelo

Rm: Máxima producción de metano alcanzada en un día ($\text{mLN}_g^{-1}\text{SV}^{-1}\text{d}^{-1}$)

Resultados y discusión

Los valores de los parámetros químicos analizados en la cachaza que se utilizó en el estudio experimental se recogen en la tabla 1,

la cual muestra un contenido de sólidos totales de 94.95%, de los cuales el 76.32% son volátiles y un pH de 5.4; similar al reportado por (Radjaram & Saravanane, 2011).

Tabla 1. Caracterización de la cachaza

Parámetros	Unidad	Cachaza	Valores reportados
pH		5.4±0.06	7,5 ^a , (4,5 - 5) ^c , 7,7 ^d , 5,5 ^f
ST	%MF	9.95 ±2.01	10 ^a , 9,09 ^b , 29 ^c , 20 ^e , 6,28 ^f
SV	% ST	80.38±5. 02	83,91 ^f
SV	% MF	76.32 ±5.22	

Los datos están expresados como el valor medio ± desviación estándar. Todos los porcentajes son sobre base seca, excepto para los ST.

^aRouf *et al.*, (2010); ^bLópez-González, 2013; ^cRadjaram y Saravanane (2011); ^dMeunchang *et al.*, (2005); ^eBaez-Smith (2008); ^fSánchez *et al.*, (1996).

El pH fue de 5.4, valor que se encuentra en el rango reportado por (Meunchang, Alfons, Panichsakpatana, & Weaver, 2005) (Meunchang *et al.*, 2005), (Radjaram & Saravanane, 2011). La variación de pH se debe al proceso de generación de cachaza, método de colección, preservación y determinación. La composición química de la cachaza depende de una diversidad de factores como son: la variedad de la caña de

azúcar, edafología, nutrientes, proceso de clarificación adoptado, operación de filtración, y otros factores ambientales (Velarde, León, Cuéllar, & Villegas, 2004).

Parámetros cinéticos

El comportamiento de los modelos cinéticos de la cachaza tratada y sin pretratar (Figura 1 y Figura 2), reflejó un buen ajuste para todos los modelos, aunque los de mayor ajuste fueron Hill y Chapman con una R2 del pretratamiento termoalcalino a 1 hora de 98,47% y 98,0% respectivamente. El R2 del pretratamiento termoalcalino a 2 horas (Hill a 98,51% y Chapman a 98,20%) y la R2 de la cachaza de 98,27% y 98,88 % correspondiente a cada uno de los modelos.

Figura 1. Modelos cinéticos del rendimiento de metano. Pretratamiento pretratamiento termo-alcalino a 1 h de la cachaza (a) y la cachaza sin pretratar (b)

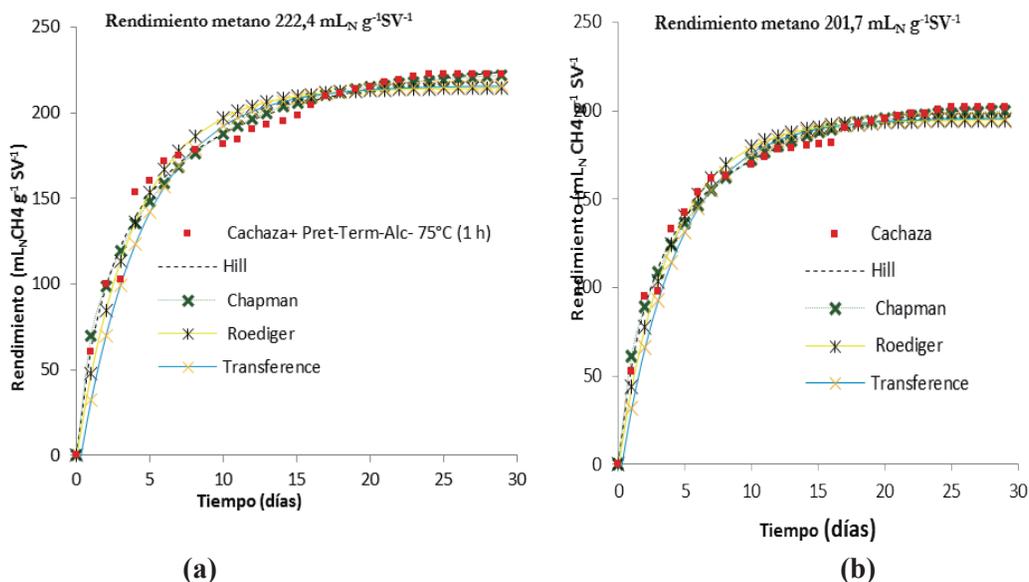
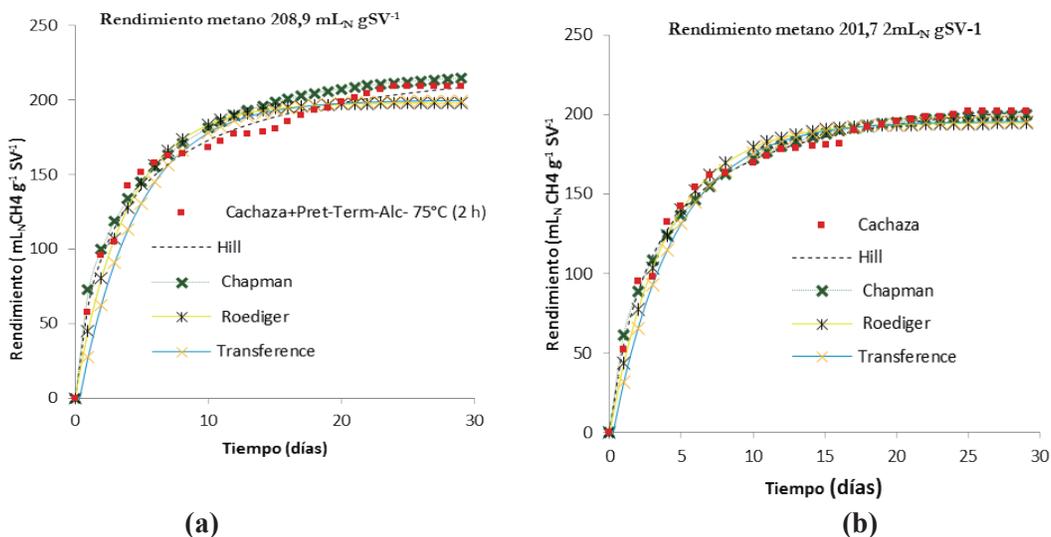


Figura 2. Modelos cinéticos del rendimiento de metano. Pretratamiento pretratamiento termoalcalino a 2 h de la cachaza (a) y la cachaza sin pretratar (b)



En la tabla 2 se muestran los modelos y parámetros cinéticos para el pretratamiento biológico del proceso de digestión anaerobia. El mayor rendimiento se obtuvo en el modelo de Hill modificado con un incremento de 11.1% para el pretratamiento de 1h con

un R² 98.47%. La máxima producción de metano (R_m) para el pretratamiento fue de 49.0 mLCH₄/gSV/d, mostrando la alta disponibilidad de materia orgánica degradable en la mezcla alimentada.

Tabla 2. Parámetros cinéticos para el pretratamiento termoalcalino de la cachaza (a 1 hora y 2 horas) y la cachaza sin pretratar

Pretratamiento termo-alcalino de la Cachaza 1 h							
Modelos cinéticos	yCH₄máx	R²	k	Rm	λ	b	c
Roediger	214,5	96,49	0,25				
Hill modified	250,3	98,47				0,96	3,19
Chapman	224,4	98,00				0,13	0,55
Transferencia	215,9	96,64		49,0	0,29		
Pretratamiento termo-alcalino de la Cachaza 2 h							
Modelos cinéticos	yCH₄máx	R²	k	Rm	λ	b	c
Roediger	198,2	95,38	0,26				
Hill modified	242,6	98,51				0,84	3,38
Chapman	218,0	98,20				0,12	0,50
Transferencia	199,9	95,69		45,7	0,35		
Cachaza sin pretratar							
Modelos cinéticos	yCH₄máx	R²	k	Rm	λ	b	c
Roediger	194,9	97,74	0,25				
Hill modified	222,5	99,27				1,02	3,01
Chapman	201,5	98,88				0,15	0,60
Transferencia	195,9	97,91		45,8	0,24		

Conclusiones

- El pretratamiento termo-alcalino de la cachaza aumentó la biodegradabilidad del sustrato favoreciendo los rendimientos de metano con incrementos de un 11.1% respecto a la cachaza sin tratar.
- Los modelos cinéticos que describen el mejor comportamiento de la digestión anaerobia fueron los de Hill y Chapman con un buen ajuste.
- El rendimiento de metano estuvo por debajo a otros estudios del pretratamiento con otros sustratos.

- Borja, R., Martín, A., Durán, M., & R., Maestro. (1991). Estudio cinético comparativo del proceso de digestión anaerobia del alpechín en los Límites mesofílico y termofílico de temperatura. *Grasas y aceites*, 43 (6). 341-346.
- Contreras, L M., López, L, & Romero, O. (2006). Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico. *Revista futuros*, 16(4), 1-8.
- Cruz, F. (1991). Biogás de cachaza. *Revista Energía.*, 2, 23 - 35.
- González, H. Fernández, E. Collazo, Y. (1995). Nueva tecnología para el tratamiento de efluentes. *Revista Ingeniería Química*, 312 (4). 46-49.
- Gossett, J M. Belsler R L. (1982). Anaerobic digestion of waste activated sludge. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 108(6), 1101-1120.
- Gossett, J.M., Stuckey, D.C., Owen, W.F., & McCarty, P.L. (1982). Heat treatment and anaerobic

- digestion of refuse. *J. Environ. Eng. Div.*, 108, 437–454.
- Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*, 100(1), 10-18. doi: DOI 10.1016/j.biortech.2008.05.027
- Hendriks, A., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 100(1), 10-18.
- Linke, B. , & Schelle, H. . (2000). Solid State Anaerobic Digestion of Organic Wastes. *AgEng Warwick. EurAgEng. Paper Number 00-AP-025.*, 1-10.
- Mähnert, P. (2007). Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle., Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät.
- Meunchang, S. , Alfons, JM. , Panichsakpatana, S., & Weaver, R W. (2005). Co-composting of filter cake and bagasse; by-products from a sugar mill. *Bioresource technology.*, 96(4), 437-442.
- Penaud, V., Delgenés, J.P., & Moletta, R. (1999). Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability. *Enzyme and Microbial Technology*, 25 258–263.
- Radjaram, B., & Saravanane, R. (2011). Assessment of optimum dilution ratio for biohydrogen production by anaerobic co-digestion of press mud with sewage and water. *Bioresource technology.*, 102(3), 2773-2780.
- Sánchez, C. , de la Noval, B., Hernández, M I., Hernández, JC, .Hernández, A N, .García, D. , . . . Fernández, F. (1996). BIOFERTILIZERS AND PLANT NUTRITION. *Cultivos tropicales: CT.*, 17(3), 4.
- Sarria, P. Solano , A. Preston, TR. (1990). Utilización de jugo de caña y cachaza panelera en la alimentación de cerdos. *Livestock Research for Rural Development*, 2(2), 92-100.
- Velarde, S.E., León, O.M., Cuéllar, A.I., & Villegas, D.R. (2004). Production and application of compost (1th ed.). La Habana. Cuba.