

Efecto de la aplicación de pre-tratamientos físicos y químicos en la digestión anaerobia de pulpa de café

Effect of the application of physical and chemical pre-treatments on anaerobic digestion of coffee pulp

NAVA-VALENTE, Noemi†*, LÓPEZ-ESCOBAR, Luis Antonio, DEL ÁNGEL-CORONEL, Oscar Andrés y ATENODORO-ALONSO, Jesús

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, Maestría en Ingeniería, Avenida 25 Poniente 100, Col. Reserva Territorial, Huatusco, Veracruz, C.P. 94100, México

Universidad Politécnica de Huatusco, División de Ingeniería en Biotecnología, Calle 9 Sur S/N Entre Avenidas 7 Y 9 Col. Centro, C.P. 4100. Huatusco, Veracruz, México.

ID 1^{er} Autor: Noemi, Nava-Valente/ ORC ID: 0000-0002-1598-5821, CVU CONACYT ID: 332980

ID 1^{er} Coautor: Luis Antonio López-Escobar/ ORC ID: 0000-0002-4845-3573

ID 2^{do} Coautor: Oscar Andrés, Del Ángel-Coronel/ ORC ID: 0000-0002-0848, CVU CONACYT ID: 226585

ID 3^{er} Coautor: Jesús, Atenodoro-Alonso/ ORC ID: 0000-0001-7307-0550, CVU CONACYT ID: 172674

DOI: 10.35429/JOTI.2019.11.3.14.22

Recibido 11 de Julio, 2019; Aceptado 17 de Septiembre, 2019

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de pre-tratamientos térmicos (50, 70 Y 90 °C durante 1 h) y ácidos (2.5%, 5% y 10% v/v durante 1 h) en el proceso de digestión anaerobia de pulpa de café. La metodología consistió en tres etapas donde se obtuvieron los residuos, aplicaron pre-tratamientos para evaluar el porcentaje de tasa de hidrólisis y producción de biogás. El residuo presentó un valor de 91.80 % de SV, pH de 5.04, DQO total de 24.46 g/L y DQO soluble de 14.88 g/L. Los porcentajes de tasa de hidrólisis aplicando pre-tratamientos térmicos oscilaron entre 0.92-4.98%, mientras que al aplicar los pre-tratamientos de 2.6-18.86%. La aplicación de pre-tratamientos disminuyó significativamente el TRH de 23d a 14d, de igual manera se favoreció la producción de biogás en los tratamientos térmicos con respecto a la prueba control, efecto contrario con las muestras tratadas con ácido, puesto la mayor producción de biogás se produjo en la prueba control. Se concluye que el pre-tratamiento es significativo para incrementar el porcentaje de tasa de hidrólisis, sin embargo, el porcentaje de tasa de hidrólisis no se puede relacionar directamente con la producción de biogás en la digestión anaerobia.

Pulpa de café, pre-tratamiento térmico y ácido, Digestión anaerobia

Resumen

The present study aims to evaluate the effect of thermal pre-treatment (50, 70 Y 90 °C during 1 h) and acid pre-treatment (2.5%, 5% y 10% v/v during 1 h) in anaerobic digestion process of coffee pulp. The methodology consisted of three stages where the waste was obtained and characterized, applied pre-treatments to evaluate the solubilization degree and biogas production. The residue presented a %VS of 91.80, pH of 5.04, total COD 24.26 g/L and soluble COD 14.88 g/L. The solubilization values obtained by applying thermal pre-treatment increased to 0.92-4.98%, while applying acids pre-treatments of 2.6-18.86%. Subsequently, in the anaerobic digestion process, retention time decreased from 23 up to 14 days. The results obtained in this study demonstrate that, pretreatment is significant to increase the percentage of hydrolysis rate, however, the hydrolysis rate percentage cannot be directly related to biogas production in anaerobic digestion.

Coffee pulp, thermal and acid pre-treatment, anaerobic digestion

Citación: NAVA-VALENTE, Noemi, LÓPEZ-ESCOBAR, Luis Antonio, DEL ÁNGEL-CORONEL, Oscar Andrés y ATENODORO-ALONSO, Jesús. Efecto de la aplicación de pre-tratamientos físicos y químicos en la digestión anaerobia de pulpa de café. Revista de Invención Técnica 2019. 3-11:14-22

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: noemi_nava@itshuatusco.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En años recientes, el uso de fuentes renovables de energía ha obtenido una gran importancia como alternativa a los combustibles fósiles (Karakashev *et al.*, 2007). Hoy en día, el uso de combustibles fósiles ya no es sustentable debido a que este recurso está limitado y no es amigable con el medio ambiente (Kamm y Kamm, 2006).

Es por ello, que los recursos energéticos renovables han generado un gran interés en la comunidad internacional durante las últimas décadas.

La biomasa es una fuente de energía prometedora, la cual incluye desechos orgánicos, desechos animales, desechos de plantas de tratamiento de aguas, residuos industriales y agrícolas, así como cultivos energéticos los cuales pueden ser usados como para la producción de biocombustibles (Antonopoulou *et al.*, 2008).

La fruta madura del café, también conocida como café cereza, es un material perecedero, que luego de ser cosechado, debe ser rápidamente procesado a granos de café seco (endocarpio con un contenido de humedad 10%). El procesamiento del fruto se realiza generalmente mediante el llamado "Beneficio Húmedo del Café", donde se consume grandes cantidades de agua y casi el 80 al 90.5 % del fruto se considera de poco o nulo valor económico y por consiguiente es designado como desecho (Calle, 1997; Pérez, 2002). La contaminación ocasionada por la industria cafetalera en el proceso de beneficio del café constituye un serio problema en los países productores del mismo.

Se han planteado un sin número de alternativas de tratamiento, entre ellos la digestión anaerobia, que es un proceso biotecnológico que convierte la materia orgánica en energía en forma de biogás, mediante consorcios microbianos (hidrolíticos, acidogénicos y metanogénicos) y que implican una serie de reacciones bioquímicas (Abelleira *et al.*, 2012), surgen como alternativa de solución para el tratamiento y aprovechamiento de residuos orgánicos.

Sin embargo, la presencia de grandes moléculas orgánicas asociadas con células microbianas no permite una estabilización rápida y completa de los sustratos (Vergine *et al.*, 2014), por lo que, tratamientos previos a la digestión anaerobia podrían favorecer la hidrólisis macromolecular, y por tanto la capacidad del proceso anaerobio incrementando su capacidad de tratamiento, la eficiencia del proceso y el rendimiento de metano.

En este aspecto se han realizado diversos estudios para evaluar el desempeño del proceso cuando el sustrato recibe un pre-tratamiento, con el objetivo de acelerar la etapa de hidrólisis, generalmente, estos tratamientos se realizan antes de que el sustrato se alimente al proceso.

El pre-tratamiento térmico de los residuos, ha sido utilizado de manera considerable en los últimos años (Donoso-Bravo *et al.*, 2011) debido a que puede lograr una alta solubilidad de compuestos orgánicos y un alto porcentaje de reducción de materia orgánica al final de tratamiento anaerobio, además de favorecer la inactivación de las concentraciones de microorganismos patógenos presentes en los sustratos crudos (Menert *et al.*, 2008) En, la mayoría de las investigaciones citadas se han utilizado altas temperaturas de pretratamiento que van desde 120-200°C y diferentes tiempos de tratamiento que van desde 30-60 min (Nava *et al.*, 2016, Yang *et al.*, 2010, Wilson *et al.*, 2009, y Pérez-Elvira *et al.*, 2008).

Por otra parte, el pre-tratamiento ácido, puede operar ya sea con alta temperatura y baja concentración de ácido (ácido diluido) o con baja temperatura y elevada concentración de ácido (ácido concentrado) (Jones *et al.*, 1984). La baja temperatura de operación en pre-tratamientos con ácidos concentrados es claramente una ventaja comparado con los pre-tratamientos con ácidos diluidos (Wyman, 1999). Sin embargo, una concentración elevada de ácido (30%- 70%) en el pre-tratamiento con ácidos concentrados puede ser extremadamente peligroso y corrosivo (Sun *et al.*, 2005).

Pre-tratamientos con ácidos como acético y nítrico han sido empleados para remover la lignina de residuos de papel periódico (Xia y Clarkson, 1997) y lodos activados para la producción de biogás (Cheng *et al.*, 2007).

Nava *et al.*, (2016) aplicaron pre-tratamientos térmicos a una mezcla de residuos agroindustriales (lodo residual, pollinaza y RAC) evaluando temperaturas de exposición de 80°C, 85°C Y 90°C durante 30, 60 y 90 min, las condiciones de pre-tratamiento permiten el tratamiento de grandes cantidades de residuo y la generación de un 10% más de biogás que el tratamiento convencional sin aumentar el volumen del reactor.

Monlau *et al.*, (2013) reportaron que la digestión anaerobia mesofílica combinada con un pre-tratamiento ácido-térmico 170°C, 1% H₂SO₄ empleando como sustrato residuos sólidos provenientes de la extracción de aceites de los girasoles, en dicho estudio se concluyó que el tratamiento previo con ácido diluido combinado con la temperatura fue beneficioso para la producción de metano, ya que este se incrementó de 195 mL CH₄/g SV a 289 mL CH₄/g SV, ellos aseguran que este hecho puede atribuirse a la accesibilidad mejorada de la celulosa y hemicelulosa al ataque microbiano.

Ruiz-Espinosa (2012) reporta que al realizar pruebas de biodegradabilidad en modo batch lodos fisicoquímicos provenientes de un rastro de aves pre-tratados térmicamente a 90°C y 90 min se obtienen rendimientos de 1 L biogás/g SV rem y 0.81 L CH₄/g SV.

Balseca y Cabrera (2011) Evaluaron el potencial de producción de biogás a partir de estiércol de ganado, pulpa de café, aguas mieles y agua utilizando biodigestores tipo batch que son sistemas anaeróbicos discontinuos. Realizaron estudios con estos tratamientos, T1 = mezcla de 40 % pulpa de café 20 % aguas mieles 40 % estiércol; T2 = mezcla de 40 % pulpa de café 20 % agua 40 % estiércol; T3 = 30 % agua 70 % estiércol. Tiempo de retención: 47 días, con una temperatura promedio de 30°C-40°C y un pH 6-7.

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar el efecto de pre-tratamientos térmicos (50, 70 Y 90 °C durante 1 h) y ácidos (2.5%, 5% y 10% v/v durante 1 h en el proceso de digestión anaerobia de pulpa de café.

Metodología

En el siguiente apartado se describe la metodología que se llevó a cabo para cumplir los objetivos de este trabajo, la cual puede describirse de manera general en tres etapas: 1) Obtención del sustrato. 2) Definición de condiciones de pre-tratamiento y determinación del % de tasa de hidrólisis de materia orgánica. 3) Pruebas de biodegradabilidad en operación batch.

1) *Obtención y caracterización del sustrato*

El residuo agroindustrial se obtuvo habitualmente del beneficio COBISA ubicado en la ciudad de Huatusco, Veracruz, el cual opera mediante un proceso vía húmeda. Se recolectaron alrededor de 8 kilos de pulpa de café la cual se guardó en bolsas negras para su traslado y posteriormente se refrigeró para que no sufriera ningún tipo cambio

2) *Aplicación de pre-tratamientos ácidos y térmicos*

Para el estudio de hidrólisis ácida se evaluaron los factores de concentración de ácido y tiempo de exposición; en este trabajo se utilizó ácido acético (C₂H₄O₂). Se plateó una concentración de 2.5%, 5% y 10 % v/v de ácido acético, durante un tiempo de exposición de 60 minutos. El tratamiento ácido se llevó a cabo en recipientes de 250 mL, con un volumen útil de 200 mL Se utilizó una agitación continua de 150 rpm y a temperatura de 25°C Una vez transcurrido el tiempo de exposición, las muestras se neutralizaron con NaOH al 4 % hasta un pH de 7.0 para detener el efecto del ácido acético.

El estudio de hidrólisis térmica se evaluó los factores de temperatura y tiempo de exposición; se trabajaron temperaturas de 50°, 70° y 90° C durante 60 minutos, el experimento se llevó a cabo en recipientes de 250 mL, con un volumen útil de 200 mL y se utilizó una agitación continua de 150 rpm.

Los análisis de DQO, DQO soluble, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), pH, alcalinidad, fueron realizados de acuerdo al Standard Methods (1998).

El Nitrógeno Total Kjeldhal fue determinado mediante digestión y oxidación para formar el ion amonio y finalmente se cuantifica la cantidad de este ion por titulación. Los carbohidratos fueron analizados de acuerdo con el método de Antrona (Gerhardt *et al.*, 1994) y los lípidos mediante extracción Soxhlet.

La composición de biogás se analizó mediante un cromatógrafo de gases Ultra-Trace Thermo Scientific equipado con una columna Heliflex AT-Mol Sieve (longitud 30 m x 0,53 mm de diámetro), un Heliflex AT-Q (longitud 30 m x 0,53 mm de diámetro) y un detector de conductividad térmica. En la primera columna se analizó O₂, N₂, CH₄ y CO₂ mientras que en la segunda columna CH₄, y CO₂, el gas empleado como acarreador fue helio.

Los análisis de la demanda química de oxígeno (DQO) se realizaron sobre las muestras sin tratar, mientras la DQO soluble se analizó en las muestras filtradas crudas y tratadas. El factor de solubilización representa la relación entre la DQO soluble después del pre-tratamiento y de DQO inicial soluble, las fracciones solubles se obtuvieron después de la centrifugación a 12 000 rpm durante 15 min y posterior filtración con una membrana de 0,2 µm. Los datos obtenidos de DQO se emplearon para la obtención de la tasa de hidrólisis de cada una de las mezclas hidrolizadas y fue calculado mediante la ecuación número 1:

$$T.H. = \frac{\text{Concentración SCTA} - \text{Concentración SSTA}}{\text{Concentración TSTA}} * 100 \quad (1)$$

Donde:

TH= Tasa de hidrólisis (%)

Concentración SCTA= Concentración soluble con tratamiento ácido (mg/L)

Concentración SSTA= Concentración soluble sin tratamiento ácido (mg/L)

Concentración TSTA= Concentración total sin tratamiento ácido (mg/L)

3) Pruebas de biodegradabilidad en operación batch

En esta etapa se evaluó el efecto del pre-tratamiento ácido y térmico en la digestión anaerobia mesofílica mediante un experimento en batch, siendo comparados con un experimento sin pre-tratamiento. Se emplearon reactores a escala laboratorio (matraces Erlenmeyer de 250 ml de volumen total y 200 ml de volumen útil) con dos salidas que se emplearon para el muestreo de biogás y para la alimentación y descarga. Se utilizó inóculo proveniente de un reactor CSTR-1 en operación.

Los reactores se mantuvieron a un mezclador orbital de 110 rpm y una temperatura de 35 ± 2 °C. La cantidad de biogás producido se registró diariamente utilizando el método de desplazamiento de agua. Cada prueba batch se interrumpió después de alcanzar el criterio de eliminación de 38% de SV para cumplimiento de los requisitos de reducción de atracción de vectores indicados por los EE.UU. EPA. 1994

Cada experimento se realizó por triplicado. Posteriormente, fue llevado a operación semi continua en un agitador orbital, bajo condiciones mesofílicas (35°C) y 115 rpm.

Resultados

1) Obtención y caracterización del residuo

Las características fisicoquímicas presentes en el residuo de café se muestran a continuación en la siguiente tabla. El residuo presentó un valor de 91.80 % de sólidos totales volátiles por lo que es muy rico en cuanto a materia orgánica. Por otra parte, el pH del residuo resultó ser ligeramente ácido con un valor de 5.04.

Parámetros.	Valor
Sólidos totales	3.83% m/m
Sólidos volátiles	91.80 % m/m
pH	5.04
DQO total	24.46 g/L
DQO soluble	14.88 g/L

Tabla 1 Caracterización de pulpa de café

En el 2016 Rovira menciona que la pulpa de café es un subproducto ácido, y que este presenta valores menores a 5, encontrando él un valor de 4.21. Por otra parte, Torres Arellano *et al.*, (2017) obtuvo valores de pH 5.4 mientras que la DQO encontrada fue de 149.56 g/L.

Rosa (2015) realizó la caracterización del mismo residuo agroindustrial donde obtuvo el valor de 68.66% de SV, valor similar al que se encontró en este trabajo ya que por otra parte sólidos totales obtenidos en esta investigación presentó un valor de 3.83 interpretando que alrededor del 62% es materia orgánica. Así mismo encontró valores para la DQOT de 21.04 g/L siendo este un resultado ligeramente inferior al encontrado en esta investigación.

2) Definición de condiciones de pre-tratamiento y determinación del % de tasa de hidrólisis de materia orgánica

En la figura 1 se muestran los porcentajes de tasa de hidrólisis obtenidos posteriormente a los pre-tratamientos ácidos donde se aprecia que, conforme la dosis de ácido acético fue mayor, el porcentaje de tasa de hidrólisis se incrementó. Se obtuvieron valores de 2.6 % con una dosis del 2.5 %, 4.54 % con dosis del 5% y 18.86 % con una dosis del 10 %. Respecto a la última dosis (10%) se puede apreciar en la gráfica que se incrementó de manera drástica la tasa de hidrólisis.

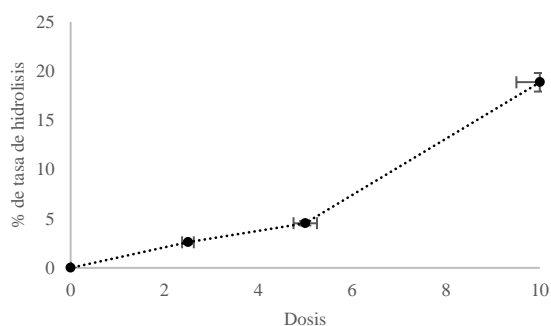


Gráfico 1 % de tasa de hidrólisis pre-tratamiento ácido

Zhao *et al.*, (2014) sometieron forraje de maíz a un pre-tratamiento con ácido acético diluido (0.25%) a 191°C durante 7.74 minutos que fue la condición óptima para la producción de AGV's y así evitar la inhibición en la fermentación ácida de dicho residuo.

En el gráfico 2 se muestran los porcentajes de tasa de hidrólisis obtenidos posteriormente a los pre-tratamientos térmicos, donde se puede observar que, conforme se fue incrementando la temperatura, la tasa de hidrólisis fue mayor. Teniendo valores de 0.92 para el pre-tratamiento a 50°C, 2.68 para 70°C y 4.98 para el pre-tratamiento a 90°C.

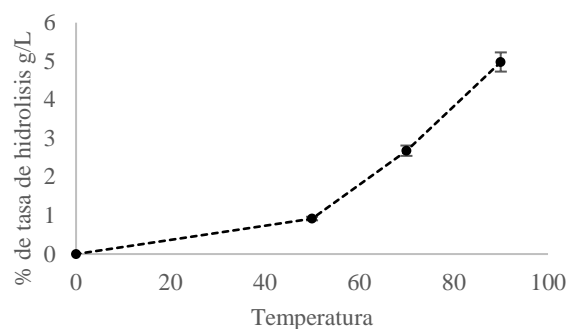


Gráfico 2 % tasa de hidrólisis pre-tratamiento térmico

Vergine (2014) realizó un estudio en el cual implementó pre-tratamientos térmicos a nivel laboratorio a temperaturas bajas (menos de 100°C) en lodos primarios y activados obteniendo como resultado un aumento en la DQO soluble de 14% en los lodos activados y un 3% en lodos primarios.

En otros estudios se encontraron porcentajes de 17.81% de grado de solubilización al aplicar un pre-tratamiento térmico de 90°C durante 60 minutos en lodos activados (Appels *et al.*, 2010).

Con los datos obtenidos en este estudio se puede observar que con el pre-tratamiento ácido hay una mayor tasa de hidrólisis en el residuo que con los que fueron tratados térmicamente, principalmente con el tratamiento al 10 % y una hora de exposición el cual obtuvo una tasa de hidrólisis de 18.86 %.

De acuerdo a los estudios citados, el pre-tratamiento ácido se aplica ampliamente debido a su bajo costo y alta eficiencia para hidrolizar la hemicelulosa en azúcares monoméricos sin disolver la lignina (Ferreira *et al.*, 2013).

3) Pruebas de biodegradabilidad operación batch

Durante los 40 días de operación se alcanzó un porcentaje de remoción de SV de 20%, 23.9%, 27% y 29.2% para el blanco, 2.5%, 5% y 10% respectivamente, el efecto del pre-tratamiento ácido radica en la solubilización de la materia orgánica disponible para el consorcio bacteriano involucrado en el proceso de digestión anaerobia, acelerando la degradación de la misma.

La producción de biogás obtenida del pre-tratamiento ácido a una dosis del 2.5 % fue menor que la muestra control produciendo un total de 1.4 L contra un 1.9 L respectivamente como se muestra en la figura 3. Durante el proceso de digestión anaerobia operación batch se notó que al incrementar la dosis de ácido acético la producción de biogás era menor obteniendo valores de 0.67 L para una dosis de 5% y 0.77 para una dosis del 10%.

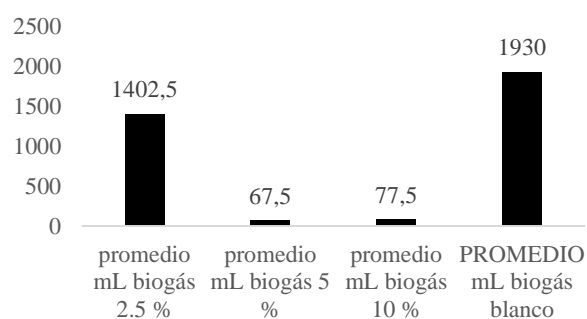


Gráfico 3 Producción de biogás acumulada pre-tratamiento ácido

El pre-tratamiento ácido se aplica ampliamente debido a su bajo costo y alta eficiencia para hidrolizar la hemicelulosa en azúcares monoméricos sin disolver la lignina (Ferreira *et al.*, 2013). El pre-tratamiento ácido como tal, hidroliza la pared celular y la membrana celular. En consecuencia, se incrementa la solubilidad de la materia orgánica contenida dentro de las células (Appels *et al.*, 2008). Hecho que justifica los altos porcentajes de tasa de hidrólisis y la baja productividad de biogás.

En la prueba de biodegradabilidad del pre-tratamiento térmico, la disminución del porcentaje de materia orgánica (SV) para el pre-tratamiento térmico 70°C, 1 hora fue el que obtuvo mayor porcentaje de remoción de materia orgánica llegando a un 27.6 %, con un TRH de 40 días comparándolo con los pre-tratamientos a 50°C y 90°C.

En cambio la muestra blanca (control) solo removió el 17 % de materia orgánica con un tiempo igual al pre-tratamiento térmico, debido a lo anterior se comprueba que el pre-tratamiento térmico previo a la digestión anaerobia favorece la remoción de compuestos orgánicos por lo cual puede disminuir el TRH ya que al solubilizarse parcialmente la materia orgánica se ingresa al proceso moléculas en formas más simples que pueden ser aprovechadas más rápidamente como sustrato por otras bacterias presentes en la digestión anaerobia.

Pérez-Elvira en el 2008 obtuvo TRH de 9-17 días a partir de la operación en una planta piloto que combina unidades de hidrólisis térmica de lodo secundario, la digestión anaeróbica de lodo secundario hidrolizado, juntamente con lodo primario fresco. A diferencia de este trabajo, solo se utilizó un solo sustrato y no fue un lodo residual como tal.

Medina (2010) realizó un estudio con residuos de rastro con inóculo (lodo granular) en donde evaluó 4 temperaturas 50, 60, 70 y 80°C en las que hubo mayor solubilización y remoción de materia orgánica con los pretratamientos a 60 y 70 °C por lo que tomando en cuenta el gasto energético la mejor temperatura es 60°C. Por otra parte Hiraoka *et al* (1989) llevó a cabo un estudio donde aplicó un pretratamiento térmico en condiciones de 40°C-100°C utilizando como sustrato lodo activado, donde obtuvo una reducción máxima de SV del 10% lo cual resulta ser poco bueno, ya que si lo comparamos con este trabajo, la máxima temperatura empleada fue 90°C y se obtuvo valores mayores.

Con base a los resultados obtenidos durante el proceso operando en modo batch en la figura 4 se muestra se la producción de biogás con la muestra térmica (70°C) que con el pasar de los días su producción fue aumentando de manera favorable, a partir del día 5 al día 26 de operación se obtuvo una producción de 3,275 ml de biogás, después del día 26 la producción empezó a decrecer, teniendo una producción acumulada al día 40 de 3.95 L de biogás.

El pre-tratamiento térmico superó por más del 50 % al muestra control la cual solo obtuvo 1.9 L, los tratamientos 50°C y 90°C obtuvieron 3.7 y 3.77 respectivamente. Cabe mencionar que cada tratamiento se hizo por duplicado.



Gráfico 4 Producción de biogás acumulada pre-tratamiento térmico

Troche Domínguez (2012) llevó a cabo una hidrólisis térmica con residuo lignocelulósico, posteriormente se llevó a digestión anaerobia a un tiempo de retención de 35 días, teniendo un total de biogás acumulado de 2000 ml.

Por otra parte, Dipam Patowar *et al.*, (2018) realizaron un estudio con material lignocelulósico donde evaluaron 3 temperaturas y 3 tiempos de exposición donde la mayor producción de biogás se obtuvo con una temperatura a 90° C y un tiempo de exposición 10 horas, el acumulado de biogás fue de 8.29 L durante un tiempo de 50 días. En otros estudios Li Y *et al.*, (1992) trabajaron con lodos activados los cuales fueron sometidos a un pretratamiento térmico con temperaturas de 62°C-175°C con tiempos de exposición de 30 min y 60 min, donde lograron maximizar la producción de biogás en un 100% con una temperatura óptima de 170°C y 60 min de tiempo de exposición, por otra parte constataron que a tiempos mayores de exposición ya no hay una mejora en el proceso.

Conclusiones

Se puede determinar que ambos pretratamientos son buenos para solubilizar el sustrato empleado (pulpa de café) ya que se logró apreciar que el porcentaje de tasa de hidrólisis aumento conforme se aumentó la dosis de ácido o la temperatura de exposición

Utilizando un pretratamiento ácido no hubo una producción de biogás significativa, hecho que se atribuye a la utilización de dosis elevadas de ácido.

Utilizando un pretratamiento térmico la producción de biogás aumentó conforme se aumentó la temperatura de pre-tratamiento, siendo la muestra 70°C la más significativa con un total de 3.950 L.

Mejorar la viabilidad de la digestión anaerobia mediante el uso de un pre-tratamiento aumenta la capacidad del proceso, la eficacia del tratamiento, la conversión de biogás y reduce la cantidad de desechos.

Referencias

- Abelleira, J., Pérez-Elvira, S. I., Sánchez-Oneto, J., Portela, J. R., & Nebot, E. 2012. Advanced thermal hydrolysis of secondary sewage sludge: a novel process combining thermal hydrolysis and hydrogen peroxide addition. *Resources, Conservation and Recycling*, 59, 52-57.
- Agard, D. A., Hiraoka, Y., Shaw, P., & Sedat, J. W. (1989). Fluorescence microscopy in three dimensions. In *Methods in cell biology* (Vol. 30, pp. 353-377). Academic Press.
- Aguilar N. R. 2010. Kinetic model of hydrolysis of sugarcane waste. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Vol. 20-2, pp. 5-18. Bogotá, Diciembre de 2010.
- Antonopoulou, G., Gavala, H. N., Skiadas, I. V., Angelopoulos, K., & Lyberatos, G. 2008. Biofuels generation from sweet sorghum: fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass. *Bioresource Technology*, 99(1), 110-119.
- Balance Nacional de Energía; Secretaría de energía, primera edición 2015 México, DF Editado en México
- Cabrera, J. C., & Balseca, D.A. (2011). Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café (Bachelor's thesis, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2012.).
- Calle, V. H. (1977). Subproductos del café. *Cenicafé* (1977) Boletín Técnico, (6). Cenicafé.
- Cheng K., Cai B., Zhang J., 2008. Sugarcane bagasse hemicelluloses hydrolysate for ethanol production by acid recovery process. *Biochemical Engineering Journal*, 38(5):105-109.

- Donoso-Bravo A.; Pérez-Elvira S.; Aymerich E.; Fdz-Polanco F. 2011. Assessment of the influence of thermal pre-treatment time on the macromolecular composition and anaerobic biodegradability of sewage sludge. *Bioresour. Technol.*, 102(2), 660–666.
- Jones, J. L., & Semrau, K. T. 1984. Wood hydrolysis for ethanol production—previous experience and the economics of selected processes. *Biomass*, 5(2), 109-135.
- Karakashev, D., Thomsen, A. B., & Angelidaki, I. 2007. Anaerobic biotechnological approaches for production of liquid energy carriers from biomass. *Biotechnology letters*, 29(7), 1005-1012.
- Kamm, B., Gruber, P. R., & Kamm, M. 2006. *Biorefineries—industrial processes and products*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Marshall, W., Reyes, R., Uña, F., Corchado, A. & Delgado, A. 1998. Ceba ovina sobre la base de heno, miel-urea y suplementación con gallinaza. *Digestibilidad y balance de nitrógeno*. *Rev. Prod. Anim.* 10:33
- Martin, S.A., McCann, M.A. & Waltman II, W.D. 1998. Microbiological survey of Georgia poultry litter. *J. Appl. Poult. Research* 7:90
- Menert A.; Vaalu T.; Michelis M.; Blonskaja V.; Rikmann, E.; Mets A.; Vilu R. 2008 In Influence of Thermal Pre-Treatment on Mesophilic Anaerobic Digestion of Sludges. *Proceedings of the 7th International Conference. Environmental Engineering. Faculty of Environmental Engineering Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania* , 625–635.
- Moguel, Y., Cantón, J.G., Sauri, E. & Castellanos, A.F. 1995. Contenido de algunos macro y micro minerales en las deyecciones avícolas en Yucatán. *Téc. Pec. Méx.* 33:100
- Monlau F, Barakat A, Trably E, Dumas C, Steyer J-P, Carrere H. 2012. Lignocellulosic materials into biohydrogen and biomethane: impact of structural features and pretreatment. *Crit Rev Environ Sci Technol*.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. *Diario Oficial de la Federación*.
- Pacheco, A.J., Rosciano, G.J., Villegas, C.W., Alcocer, V.V. & Castellanos, R.A. 2003. Cuantificación del contenido de cobre y otros minerales en pollinazas producidas en el estado de Yucatán. *Téc. Pecu. Méx.*, 41:197
- Pérez-Elvira S.I.; Fernández-Polanco F.; Fernández-Polanco M.; Rodríguez P.; Rouge P. 2008. Hydrothermal multivariable approach. Full-scale feasibility study. *Elec. J. Biotechnol.*, 11, 7–8.
- Pérez, N., Márquez, M. F., & Autié, P. M. (2002). Obtención del carbón activado a partir del residual sólido generado en el beneficio húmedo del café (Doctoral dissertation, Tesis de Maestría. Cuba: Universidad de Pinar del Río).
- Patowary, D., & Baruah, D. C. (2018). Effect of combined chemical and thermal pretreatments on biogas production from lignocellulosic biomasses. *Industrial crops and products*, 124, 735-746.
- Ruiz-Espinoza, J.E.; Méndez-Contreras, J.M.; Alvarado-Lassman, A.; Martínez-Delgadillo, S.A. 2012. Effect of low temperature thermal pre-treatment on the solubilization of organic matter, pathogen inactivation and mesophilic anaerobic digestion of poultry sludge, *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and environmental Engineering.*, 47(12), 1795–1802.
- Sacramento-Rivero, J.C., Romero G., Cortés-Rodríguez, E., Pech, E. y Blanco-Rosete, S. 2010 Diagnostico del desarrollo de bio-refinerías en México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química.* 9(3) 261-283.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. 2011. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262-2289.
- Sun, Y., and Cheng, J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource technology*, 83(1), 1-11.
- Stevens, C. 2011. *Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power*. R. C. Brown (Ed.). John Wiley & Sons
- UNFCCC (2012) clean development mechanism (CMD). United Nations Framework. Convention on climate Change (UNFCCC)

U.S. EPA. A Plain English Guide to the EPA, Part 503 Biosolids Rule. US PA/832/R-93-003. September, 1994.

Valo, A., Carrère, H. and Delgenés, J.P. 2004. Thermal, chemical and thermochemical pre-treatment of waste activated sludge for anaerobic digestion. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. Vol 79. p 1197-1203

Vergine P.; Záborská J.; and Canziani R.; 2014. Low temperature microwave and conventional heating pre-treatments to improve sludge anaerobic biodegradability. *Water Science & Technology*. 69(3), 518-524.

Wilson C.A.; Novak J.T. 2009. Hydrolysis of macromolecular components of primary and secondary wastewater sludge by thermal hydrolytic pretreatment. *Water Research*., 43, 4489–4498.

Wyman, C. E., Decker, S. R., Himmel, M. E., Brady, J. W., Skopec, C. E., & Viikari, L. 2005. Hydrolysis of cellulose and hemicellulose. Polysaccharides: structural diversity and functional versatility, 1, 1023-1062.

Whitely, N., Ozao, R., Cao, Y., & Pan, W. P. 2006. Multi-utilization of chicken litter as a biomass source. Part II. Pyrolysis. *Energy & fuels*, 20(6), 2666-2671.

Xiao, W., & Clarkson, W. W. 1997. Acid solubilization of lignin and bioconversion of treated newsprint to methane. *Biodegradation*, 8(1), 61-66.

Yang X.; Wang X.; Wang L. 2010. Transferring of components and energy output in industrial sewage sludge disposal by thermal pretreatment and two-phase anaerobic process. *Bioresour Technol.*, 101 (8), 2580–2584.