

Solubilidad, biodegradabilidad y capacidad de producción de metano de lodos residuales pretratados por pre-hidrólisis térmica, electrooxidación y bioaumentación

López Vargas Patricia Catalina¹, Castañeda Briones María Teresa¹, Espinoza Castañeda Marisol¹,
Meléndez Estrada Jorge^{*2}, Cruz Colín María del Rocío¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Departamento de Ciencias Básicas. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200, México.

²Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación -ESIA UZ IPN, Miguel Bernard 322, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, C.P. 07320, México.

*Autor de correspondencia: jmelendeze@ipn.mx

Recibido:

12/junio/2021

Aceptado:

23/octubre/2021

Palabras clave:

Biosólidos,
pretratamientos,
biogás

Keywords:

Biosolids,
pretreatments,
biogas

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue comparar el efecto de tres pretratamientos en lodos residuales para aumentar el grado de solubilización y la producción específica de metano en una posterior digestión anaerobia. El primer pretratamiento empleado fue la prehidrólisis térmica (PT) del lodo a 90 °C durante 90 minutos. El segundo pretratamiento fue la electrooxidación (PEO) del lodo utilizando electrodos de platino con una intensidad de corriente de 400 mA durante 45 minutos. Y el tercero, el pretratamiento por bioaumentación (PB) fue la adición de 9 mL de cepas específicas de bacterias acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas. Se logró aumentar el grado de solubilización de los lodos en 34.7%, 28.4% y 0.9% con PT, PEO y PB respectivamente. Las eficiencias de metano para PT, PEO y PB fueron de 61.7% CH₄/g, 16.1% CH₄/g SV y 2.3% CH₄/g SV respectivamente.

ABSTRACT

The objective of this research was to compare the effect of three pretreatments in sewage sludge to increase the degree of solubilization and the specific production of methane in a subsequent anaerobic digestion. The first pretreatment used was thermal prehydrolysis (PT) of the mud at 90°C for 90 minutes. The second pretreatment was electrooxidation (PEO) of the mud using platinum electrodes with a current intensity of 400 mA for 45 minutes. And the third, the pretreatment by bioaugmentation (PB) was the addition of 9 mL of specific strains of acidogenic, acetogenic and methanogenic bacteria. The degree of solubilization of the sludge was increased by 34.7%, 28.4% and 0.9% with PT, PEO and PB respectively. The methane efficiencies for PT, PEO, and PB were 61.7% CH₄ / g, 16.1% CH₄/g SV, and 2.3% CH₄/g SV respectively.

Introducción

Para una producción eficiente de metano y una rápida degradabilidad anaerobia de los lodos de desecho procedentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), es importante tener un balance en el grado de reacción de las diferentes etapas involucradas las cuales son hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Appels *et al.*, 2008).

La velocidad del proceso de degradación anaerobia está limitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo. Para residuos en los que la materia orgánica está en forma de partículas, la fase limitante es la hidrólisis, esta limitación hace que los tiempos de proceso sean del orden de semanas (Carrere *et al.*, 2008). Para ayudar a la solubilización de esas partículas y aumentar la velocidad del proceso de digestión anaerobia se pueden utilizar pretratamientos para disminuir el tamaño de las partículas y solubilizarlas.

La digestión anaerobia se ha utilizado no solo para la estabilización de lodos de desecho, sino también para la producción de energía a partir de biogás rico en metano, el cual tiene un potencial de 0.31 m³/kg de sólidos totales (ST), se estima que cada metro cúbico de biogás producido por digestión anaerobia genera 1.6 kilowatt-hora (Mao *et al.*, 2015). Se han realizado numerosas investigaciones para incrementar la producción de metano a través de diferentes procesos de pretratamiento para recuperar la mayor cantidad de energía almacenada en ellos y contribuir a reducir los tiempos y costos de operación de las PTAR (Noyola, 1996). Se han realizado también ensayos sobre el efecto de la adición de cepas específicas de bacterias al lodo que se digiere anaeróbicamente realizando para ello el llamado pie de cuba, el cual consiste en ir replicando volúmenes mayores de aclimatación hasta obtener un inóculo rico en células jóvenes (Bagi *et al.*, 2007; Foladori *et al.*, 2010). La ventaja de emplear un inóculo puro es la eficiencia en la producción de dicho biogás y el evitar la presencia de microorganismos indeseables. Al respecto, se han utilizado diversos tratamientos para eliminar aquellas bacterias que no favorecen la producción de biogás y así mantener en mayor proporción las que sí (Sandoval *et al.*, 2009). Por otro lado, diversos estudios muestran que el pretratamiento del lodo rompe la pared celular de la materia orgánica, que es considerada una estructura rígida formada por cadenas de péptidos, las cuales son resistentes a la ruptura osmótica y a la biodegradación, liberando así material orgánico disponible para su posterior degradación por los microorganismos hidrolíticos y acidogénicos, agilizando el proceso y mejorando las características del lodo previo a su acondicionamiento o digestión anaerobia (Camacho *et al.*, 2002).

La hidrólisis térmica es uno de los pretratamientos con mejores resultados, permite la solubilización parcial de materia orgánica, el saneamiento del lodo y reduce la viscosidad, con un subsecuente mejoramiento en el manejo y aprovechamiento del lodo (Bougrier *et al.*, 2008). En este sentido, la mayoría de las investigaciones se han enfocado en realizar el pretratamiento térmico a altas temperaturas que van desde 120°C a 200°C a diferentes tiempos que van desde 30 a 60 minutos; sin embargo, existen dos desventajas significativas para estas condiciones, la primera son los altos niveles de energía que se requieren y la segunda que a temperaturas superiores a 180°C existe la formación de compuestos refractarios no biodegradables (Ruiz, 2013). Por lo anterior la aplicación del tratamiento térmico a bajas temperaturas (<100°C) es una alternativa que está siendo investigada para superar estos inconvenientes.

Dentro de los pretratamientos químicos oxidativos, se ha reportado el uso de procesos de electrooxidación (PEO), que mejoran las características del lodo previo a su acondicionamiento o digestión anaerobia. Algunas de las ventajas de la EO son: mejoras en la deshidratabilidad de los lodos (Yuan *et al.*, 2010); reducción en los sólidos volátiles (SV) del lodo con tiempos breves de pretratamiento (15 a 30 minutos) en rangos de 0.5 a 2.0 A, una reducción del tiempo de retención del posterior proceso anaerobio de 23.5 a 17.5 días (Song *et al.*, 2010) y reducción de la concentración de materia orgánica en un 27%, así como la modificación de las características físicas del lodo (Barrios *et al.*, 2015).

Este estudio pretende optimizar la degradación anaerobia y la producción de metano para reducir los costos asociados al tratamiento y disposición de lodos residuales y obtener la mayor cantidad de energía renovable a partir de estos subproductos del tratamiento de aguas residuales. Para ello, inicialmente se aplicaron tres pretratamientos, uno químico por electrooxidación, otro térmico con temperaturas medias y uno biológico con la adición de microorganismos aislados y específicos para digerir los lodos generados en una PTAR, así como una combinación de estos pretratamientos para conocer su efectividad en conjunto y con la finalidad de incrementar la eficiencia de eliminación de SV y demanda química de oxígeno (DQO), así como obtener una mayor cantidad de biogás rico en metano en la posterior digestión anaerobia de los mismos.

Metodología

Se realizaron pretratamientos a una muestra de lodo residual proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. La muestra consistió en una mezcla en proporción (1:1) de lodo residual primario y lodo residual secundario para utilizarlos como sustrato en una posterior digestión anaerobia.

El primer pretratamiento denominado pretratamiento térmico (PT) consistió en calentar el lodo mezcla durante 90 minutos a una temperatura de 90°C, para ello se utilizaron matraces Erlenmeyer con capacidad de 500 mL y parrillas eléctricas de calentamiento.

En el segundo pretratamiento denominado pretratamiento electrooxidativo (PEO) se utilizó un tanque electroforético en batch con capacidad de 300 mL, empleando electrodos de platino con área de trabajo de 7.5 cm², a una separación entre ellos de 15 cm. Los electrodos se conectaron a una fuente de poder con capacidad de 400 mA (BIO-RAD Power Pack 3000), que suministró corriente directa durante 45 minutos a 97 V, 400 mA y 39 W, densidad de corriente 53.3 mA/cm².

Para el tercer pretratamiento denominado pretratamiento biológico de bioaumentación (PB) se adicionaron 9 mL de inóculos puros compuestos por bacterias acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas que se obtuvieron al aislar las poblaciones microbianas siguiendo la metodología empleada por Sandoval et al., (2009) para grupos de bacterias fermentadoras de glucosa y el lactato (BFG), para bacterias acetogénicas del propionato, formato y etanol (BAC) y para arqueas metanogénicas (MET).

Con estos tres diferentes pretratamientos y sus combinaciones entre ellos, se realizaron 8 diferentes ensayos, utilizando un blanco sin pretratamiento al lodo (SP), pretratamiento térmico (PT), pretratamiento electrooxidativo (PEO), pretratamiento biológico (PB), pretratamiento térmico seguido de pretratamiento electrooxidativo (PTE), pretratamiento térmico seguido de pretratamiento biológico (PTB), pretratamiento electrooxidativo seguido de pretratamiento biológico (PEB) y finalmente la combinación de pretratamiento térmico más pretratamiento electrooxidativo más la adición de pretratamiento biológico (PTEB).

Al inicio y al término de los ensayos se midió la Demanda química de oxígeno total (DQOt) la cual se obtuvo mediante la técnica de reflujo cerrado utilizando un digestor HACH DRB200, y para su lectura un colorímetro HACH DR/890; así mismo se midió la DQO soluble (DQOs) para ello se realizó previa a la digestión una centrifugación a 6000 rpm/5 min.

El grado de solubilización (GS) de los compuestos orgánicos fue calculado de acuerdo a la ecuación (1) (Vigueras et al., 2013).

$$GS = \frac{DQOs\ tratado - DQOs\ crudo}{DQOt\ crudo - DQOs\ crudo} * 100 \dots \dots \dots (1)$$

Donde: GS = Grado de solubilización expresado en porcentaje, DQOs tratado = mg DQO soluble/L con

pretratamiento, DQOs crudo = mg DQO soluble/L sin pretratamiento, DQOt crudo = mg DQO total/L sin pretratamiento.

Al término de los pretratamientos se llevó a cabo la digestión anaerobia de los lodos. Se realizaron ensayos por triplicado utilizando como sustrato los lodos crudos (SP), y las combinaciones realizadas de los lodos pretratados por PT, PEO y PB. Para ello se utilizaron botellas serológicas con capacidad de 100 mL, se inocularon 80 mL de muestra de lodo por 20 mL de biomasa granular anaerobia, posteriormente se gasearon con N₂ y CO₂ en una proporción 80:20 y se sellaron con tapones de caucho, lo cual permitió el uso de agujas hipodérmicas para medir el exceso de gas y poder tomar muestras. Las botellas se mantuvieron a temperatura ambiente durante un periodo de 30 días. En la Figura 1 se muestra el diseño experimental y la representación gráfica del contenido de cada botella. Los parámetros analizados durante el periodo de digestión anaerobia fueron DQO total por la técnica de reflujo cerrado, pH mediante potenciómetro, sólidos volátiles (SV) por gravimetría, producción de biogás por desplazamiento de columna de agua, estos parámetros se midieron cada tercer día y la composición del biogás al final de la etapa de estabilización únicamente.

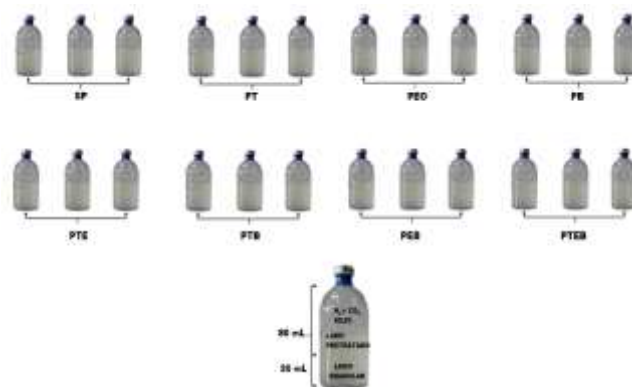


Figura 1. Diseño experimental con las 8 distintas combinaciones de pretratamientos utilizados en esta investigación.

Resultados y discusión

Solubilidad

La comparación de resultados entre los diferentes tratamientos se realizó en términos de la eficiencia de reducción de DQO, eficiencias de reducción de SV y en la producción de biogás y fue complementado con el análisis del comportamiento de las variables pH, solubilidad y composición de biogás. En la Figura 2, se pueden observar los porcentajes de solubilidad una vez realizado el pretratamiento al lodo en cada uno de los ensayos.

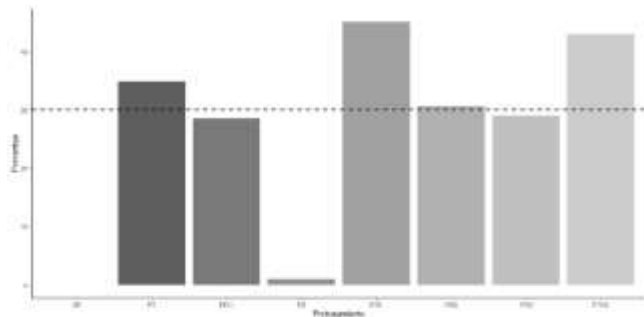


Figura 2. Porcentajes de solubilidad una vez realizados los pretratamientos a los lodos.

Los pretratamientos térmico y electrooxidativo aumentaron la cantidad de DQO soluble en todos los ensayos debido a la ruptura de las células y la liberación del material intracelular. Se puede observar que el mayor grado de solubilidad se obtuvo en el PTE, al aplicar la combinación del pretratamiento térmico seguido del pretratamiento por electrooxidación, con un aumento del 45% en la solubilidad del lodo. El PT y el PEO mostraron también un notable aumento en la solubilidad (34.7% y 28.4% respectivamente. Por otro lado, el PB presentó un muy bajo grado de solubilidad. Sin embargo, los resultados de esta investigación se encuentran por debajo de lo reportado por Arce y Noyola (2009) con el 49 % de solubilización de la DQO a 70°C durante 90 minutos, o Viguera *et al.* (2013) utilizando una autoclave a 120 °C durante 15 minutos obtuvieron un 38% sobre la solubilización de lodos residuales.

DQO

En la figura 3 se representa el comportamiento de la reducción de DQO. Se observa que en todos los tratamientos hubo una disminución de este parámetro; los mejores resultados que presentaron la mayor carga eliminada con una eficiencia de reducción en promedio se obtuvieron con el PTE con un 87.1%. En general, todos los ensayos donde se realizó pretratamiento térmico obtuvieron los más altos porcentajes de reducción (PT 83.5%, PTB 85.1%, PTEB 83.8%), Los ensayos donde se utilizó electrooxidación también presentaron una reducción importante (PEO 65.1%, PEB 71.3%), mientras que el PB mostró una menor reducción en promedio del 59.6% y el lodo crudo SP la reducción más baja del 51.1%,

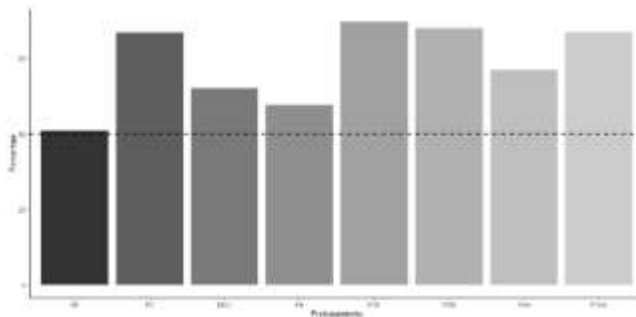
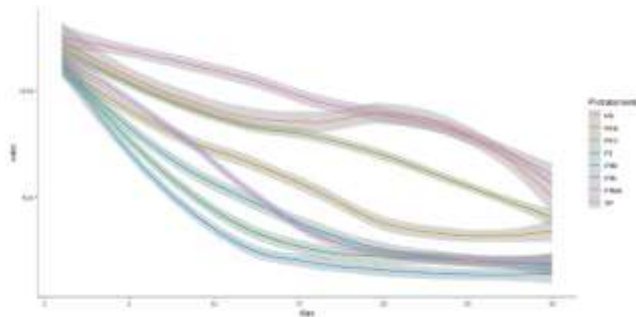


Figura 3. Comportamiento de la DQO evaluada en los tratamientos SP, PT, PEO, PB, PTE, PTB, PEB y PTEB.

Sólidos Volátiles

Los lodos secundarios, por su mayor contenido de sólidos volátiles, permiten remociones mayores que los lodos primarios. La reducción típica de sólidos volátiles en un digestor anaerobio de lodos mezclados (primarios más secundarios) oscila entre 45 y 60%. La figura 4 muestra el comportamiento en la reducción de SV durante los tratamientos SP, PT, PEO, PB, PTE, PTB, PEB y PTEB.

El pretratamiento térmico aplicado a la mezcla de lodo primario y secundario benefició la alta eliminación de sólidos volátiles, esto se puede ver en las eficiencias de remoción alcanzadas en todos los ensayos donde se utilizó el pretratamiento térmico. La mayor reducción se observó en el PTE (79.3%) y PT (79.1%). La menor reducción de SV se mostró en el lodo crudo SP con 45%, El PEO mostró remociones del 60% en promedio y el PB remociones del 49%.

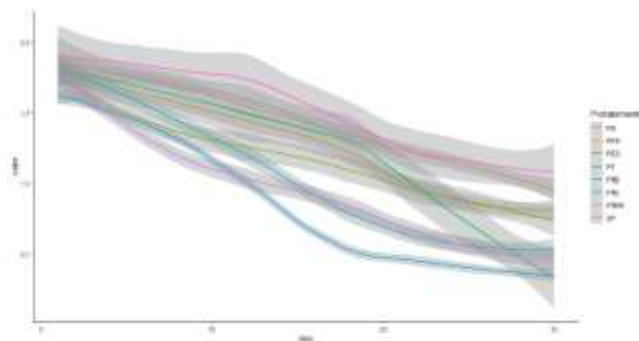


Figura 4. Comportamiento de los sólidos volátiles (SV) evaluados en los tratamientos SP, PT, PEO, PB, PTE, PTB, PEB y PTEB.

Biogás

Una vez que el digestor se estabilizó se procedió a cuantificar el biogás generado en el proceso (volumen y composición de biogás en función de los SV eliminados) con respecto a la carga de alimentación. Los digestores anaerobios municipales producen metano con un rango de 0.75- 1,0 m³/kg de sólidos volátiles degradados en condiciones mesofílicas. En las Figuras 5 y 6 se muestran los resultados de la producción de biogás y la eficiencia del mismo en cuanto a producción de metano.

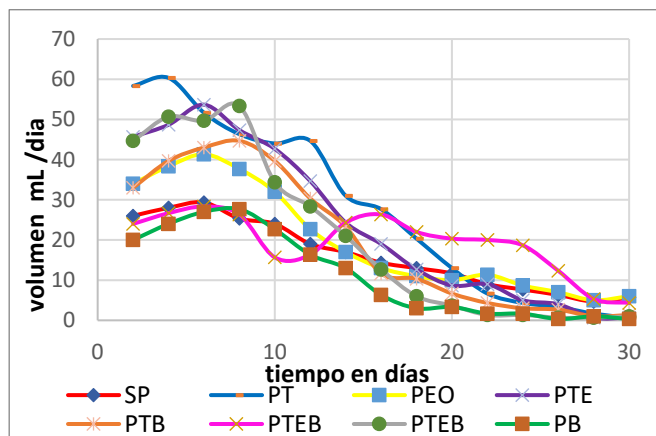


Figura 5. Volumen de biogás generado en los tratamientos SP, PT, PEO, PB, PTE, PTB, PEB y PTEB.

Los resultados de la producción de biogás a partir de los lodos evaluados, muestran que en los ensayos sin pretratamiento hubo una producción significativa de metano de 56.2% con un rendimiento de 28 mL CH₄/gSV_{removido}; en los ensayos con PT la producción fue más alta que para los ensayos sin pretratamiento mostrando un 79% de metano en el biogás y un rendimiento del 61.7 CH₄/gSV_{removido}. En los ensayos con PTE la producción de metano fue muy alta, 84.9% y 60.6 CH₄/gSV_{removido}. Para el PEO, se obtuvo un 60.9% de

metano, pero un rendimiento de 16.1 CH₄/gSV_{removido}. Finalmente, para los ensayos de bioaumentación, se obtuvieron porcentajes de metano muy bajos de 6.4, 10.15, 8.35 y 1.9 % para PB, PTB, PEB Y PTEB respectivamente, lo cual se vio reflejado en bajos rendimientos de biogás. Esto debido a que las condiciones de acidificación que se presentaron inhibieron casi por completo a las bacterias metanogénicas que habitaban en el lodo inóculo, lo cual se vio reflejado en la disminución de producción de metano.

Estos resultados muestran que las producciones de metano a partir de muestras de lodos sin pretratamiento requieren un periodo de digestión mayor para biotransformar la materia orgánica biodegradable hasta metano. Los pretratamientos térmicos demostraron ser los mejores en cuanto a reducción de DQO, SV y también en la producción de biogás rico en metano. Esto como resultado de haber disminuido el tamaño de partícula en un pretratamiento haciendo más soluble la materia orgánica, para obtener una adecuada afinidad del sustrato con la biomasa.

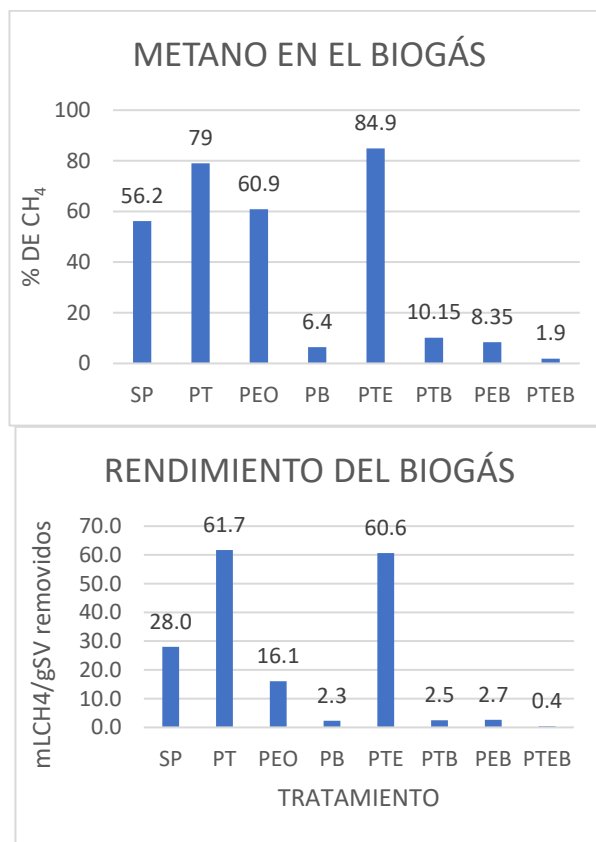


Figura 6. Rendimiento del biogás mediante las eficiencias de metano durante los tratamientos con SP, PT, PEO, PB, PTE, PTB, PEB y PTEB.

Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos en esta investigación se puede concluir que los pretratamientos aplicados a los lodos residuales cumplieron satisfactoriamente mejorando el proceso de digestión anaerobia. El PT aplicado en condiciones de 90°C durante 90 minutos favoreció la hidrólisis de las macromoléculas, hasta obtener un grado de solubilización del 34.7%, con el PEO aplicando 400 mA durante 45 minutos se obtuvo un porcentaje de solubilización del 28.4%. Y con el PB adicionando 9 mL de BAC, BFG y MET el lodo adquirió un 0.9% de solubilización.

Las eficiencias de remoción para DQO fueron 87.1, 85.1, 83.8, 83.5, 71.3, 65.1, 59.6 y 51.1% para PTE> PTEB> PT> PTB> PEB> PEO> PB> SP respectivamente. Las eficiencias de remoción para SV fueron 79.3, 79.1, 75.6, 71.3, 59.8, 55, 49.3 y 45% para PT> PTE> PTEB> PTB> PEO> PEB> PB> SP respectivamente. El porcentaje aumento de producción de biogás con respecto al blanco (SP) fue de 71.4, 47.8, 27.9, 22.3, 21.7, 20.4 y -30% para PT>PTE>PTEB>PEO>PTB>PEB>PB respectivamente. El porcentaje de metano en el biogás fue de 84.9, 79, 60.9, 56.2, 10.1, 8.3,6.4 y 1.9% para PTE>PT>PEO>SP>PTB>PEB>PB>PTEB respectivamente.

En general, todos los ensayos donde se realizó PT obtuvieron los más altos porcentajes de reducción de DQO y SV, así como los más altos niveles de producción de biogás rico en metano. Los ensayos donde se utilizó electrooxidación PEO también presentaron una reducción importante de DQO y SV, mientras que PB mostró una menor reducción con respecto al lodo crudo SP, de igual manera la producción de biogás rico en metano fue muy baja en los ensayos donde se realizó PB.

Las mejores eficiencias obtenidas se presentaron en PT, con un 83.8% en reducción de DQO, 79.3% en SV, 71.4% en el aumento de producción de biogás, un 79% de metano en el biogás y una eficiencia de 61.7 mL CH₄/g SV removidos, siendo que en la digestión convencional SP solo se alcanzó una eficiencia de 28 mL CH₄/g SV removidos.

Este estudio demostró que la combinación de un pretratamiento en la digestión anaerobia de lodos residuales mejora el tiempo de operación, se tiene un bajo requerimiento de químicos y es una alternativa viable para el tratamiento de lodos residuales con alto contenido orgánico.

Se recomienda analizar el efecto que tienen los pretratamientos en la eliminación de microorganismos patógenos, realizar una caracterización de los electrodos en el PEO, la realización de un balance energético del

proceso para saber si es autosustentable, la aplicación de estas estrategias no a la producción de biogás por medio de digestión anaerobia, sino a la generación de hidrógeno. Una vez estudiado a detalle el proceso a escala de laboratorio, realizarlo a escala piloto y optimizarlo.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por CONACYT. Patricia Catalina López Vargas agradece a CONACYT por la beca otorgada con número de becario y CVU 637812. Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Microbiología Ambiental de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco y en el laboratorio OpenLab®.

Referencias

- Appels L., Baeyens J., Degreve J., Dewil R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Prog. Energy Combust.*, 34: 755-781.
- Arce E., Noyola A. (2009) Pretratamiento térmico y digestión anaerobia mesofílica de lodos residuales para la producción de biosólidos de clase A. Memorias del XIII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. Acapulco Guerrero, México, 21 - 26 de junio.
- Bagi Z. Acs N., Balint B., Horvath L., Dobó K., Rákhely G., Kóvacs K., (2007). Biotechnological Intensification of biogas production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 76: 473-482.
- Barrios A., De Leon C., Barrera C., Becerril E., Reyes H. (2015). A coupled ozonation-electrooxidation treatment for removal of bisphenol A, nonylphenol and triclosan from wastewater sludge. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14: 707-716.
- Bougrier C., Delgenes. J; Carrere H. (2008) Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion. *Chem. Eng. J.*, 139: 236-244.
- Callejas C., Fernández A., Passegui M., Wenzel J., Bovio P., Borzzacconi L., Etchebehere C. (2019). Microbiota adaptation after alkaline pH perturbation in a full-scale UASB anaerobic reactor treating dairy wastewater. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 42: 2035-2046.
- Camacho P., Deleris S., Geauguey V., Ginestet P., Paul E. (2002). A comparative study between mechanical, thermal and oxidative desintegration techniques of waste activated sludge. *Water Sci. Technol.*, 46: 79-87.
- Carrere H., Bougrier C., Castets D., Delgenes J. (2008) Impact initial biodegradability on sludge anaerobic digestion enhancement by thermal pretreatment. *J Environ. Sci. Health Pt.*, 43: 1551-1555.

- Foladori P., Bruni L., Tamburini S., Ziglio G. (2010). Direct quantification of bacterial biomass in influent, effluent and activated sludge of wastewater treatment plants by using flow cytometry. *Water Res.*, 44: 3807-3818.
- Lennin L., Yabroudi S., Caárdenas C., Velazquez L., Maldonado H., Vargas L. y del Lago J. (2009). Tratamiento biológico de industria procesadora de cangrejo azul usando lodos activados intercencia, 32 (7).
- Mao C., Feng Y., Wang X., Ren G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 45: 540-555.
- Noyola A. (1996). Anaerobic Technology as a Tool for the Sustainable Environment, the context of Mexico, en biodegradación de compuestos orgánicos. Llangovan K., Briones R. Editores, UNAM, p. 169-172.
- Ruiz E. (2013). Desarrollo de estrategias para el desempeño de alta eficiencia y control del proceso de co-digestión anaerobia mesofílica de lodos residuales-residuo sólidos orgánicos municipales. Tesis de doctorado. UAM- Azcapotzalco. México.
- Sandoval C., Vergara M., Arango M., Castillo E. (2009). Microbiological characterization and specific methanogenic activity of anaerobe sludges used in urban solid waste treatment. *Waste Management* 29 (2009). 704-711.
- Song L., Zhu N., Yuan H., Hong Y., Ding J. (2010). Enhancement of waste activated sludge aerobic digestion by electrochemical pre-treatment. *Water Res.*, 44: 4371-4378.
- Vigueras C., Zafra J., García R., Martínez T., Pérez V. (2013). Efecto del pretratamiento sobre la biodegradabilidad anaerobia y calidad microbiológica de lodos residuales secundarios. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12: 293-301.
- Yuang H. Zhu N. Song L. (2010). Conditioning of sewage sludge with electrolysis: Effectiveness and optimizing study to improve dewaterability. *Bioresour. Technol.*, 101: 4285-4290.