



Inclusión de un inóculo para promover la metanización de residuos sólidos urbanos

L. Márquez Benavides^{1*}, J. M. Sánchez Yáñez², R. Alfaro Cuevas Villanueva², Raúl Cortés Martínez³

¹Laboratorio de Residuos Sólidos y Medio Ambiente, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. ²Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio B-1, B-3; Ciudad Universitaria, Morelia Michoacán, México. ³Division Facultad de Químico Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Tzintzuntzan 173 Col. Matamoros, Morelia, Michoacán, México

PALABRAS CLAVE

Inóculo;
semilla;
metanogénesis;
residuos sólidos
municipales

RESUMEN

La degradación anaerobia de residuos sólidos urbanos (RSU) es resultado de complejas interacciones microbianas, físicas y químicas. El objetivo de este trabajo fue obtener una "semilla" seca y aireada para inocular residuos sólidos urbanos y acelerar el establecimiento de la fase netamente metanogénica. Para tal fin, se montaron 3 diferentes tipos de reactores digestores en sustrato sólido (DASS): JEL, EXL y LODOS. Los ingredientes de los tres tipos de DASS fueron: Para el JEL, suelo de jardín, excreta de ganado vacuno, y sedimentos de lodos activados, para la semilla EXL, excreta vacuna y lodos activados y el LODOS contenía lodos residuales y suelos. Cuando las semillas JEL, EXL y LODOS estuvieron metanogénicamente activas ($\text{CH}_4 \geq 40\%$) se tomó una muestra de cada una de ellas, se dejó secar a temperatura ambiente y se molió. Las diferentes semillas se mezclaron con agua destilada y con la fracción orgánica de los RSU en proporciones de 3 y 6%, para incubarlos a 35 °C, también se montaron Controles (solo RSU) y botellas sólo con la semilla secada y agua destilada.

Los resultados mostraron que la inclusión de la semilla afectó los siguientes aspectos: (1) Cualquiera de las tres semillas probadas aceleró en tiempo y cantidad la producción de metano por RSU, 2) la tasa de producción de metano obtenida estuvo relacionada a la cantidad de semilla adicionada, 3) la dinámica del pH durante el proceso de degradación de RSU fue modificada por la adición de semilla.

ABSTRACT

Municipal solid waste (MSW) anaerobic degradation is the result of complex biological, physical and chemical interactions. The aim of this work was to obtain a dry seed to inoculate MSW and enhance methane production rate. To this end, three different types of solid state anaerobic reactors (DASS) were set up: JEL, EXL and LODOS. The ingredients of them consisted of garden soil, cattle manure and sludge (JEL), cattle manure and sludge (EXL) and sludge and garden soil (LODOS). After reaching the methanogenic phase ($\text{CH}_4 \geq 40\%$), samples were withdrawn from the DASS reactors, bench-dried and milled. Each seed was added to the organic fraction of MSW in proportions of 3 and 6% in distilled water and incubated at 35 °C, Control bottles were also set up consisting of only MSW and others with only the seed.

Obtained results revealed that the inclusion of the seed affected the following aspects: 1) All used seed were capable of enhance the onset and methane production rate, 2) methane production rate was influenced by the amount of added seed, 3) the pH dynamic of the MSW degradation process was modified by the addition of seed.

KEYWORDS

Inoculum;
methanogenesis;
municipal
solid waste;
seed

INTRODUCCIÓN

Investigaciones realizadas en América Latina para tratar los residuos sólidos urbanos (RSU), utilizando métodos físico-químicos, químicos y biológicos han demostrado la idoneidad de los métodos de tratamiento biológico. La aplicación de la tecnología anaerobia es una de las más atractivas para el tratamiento de los RSU, ya que en la mayoría de los países latinoamericanos el contenido de la fracción orgánica representa entre un 40–75% (Sandoval et al 2007).

La biometanización de desperdicios orgánicos, tales como excrementos de animales, otros residuos agropecuarios, lodos residuales y más recientemente residuos sólidos urbanos, ha sido estudiada extensamente (Ghosh y Pohland 1974; Muñoz et al., 1994; Rodríguez-Iglesias, 2000). Varios autores han establecido que la degradación microbiana relacionada con la digestión anaerobia puede acelerarse (en tiempo o en aumento de tasas de producción de biogás) si se suministran condiciones favorables. Dentro de esas condiciones se pueden mencionar la adecuada presencia de nutrientes, en particular la adición de metales como micronutrientes (González-Gil et al. 1999; Pereda-Reyes et al. 2007) o de sales como el cloruro férrico (Torres et al., 2004), condiciones apropiadas de pH y humedad (Barlaz et al., 1990; Chin-Chao et al., 2002; Demir et al., 2004), etc. En el caso particular de la digestión de residuos sólidos urbanos se ha estudiado además el efecto por la reducción del tamaño de partícula, el efecto por la recirculación de lixiviados (naturales o neutralizados), por adición de nutrientes, por adición de carbonato de calcio, el efecto de la humedad y la adición de lodos residuales de plantas tratadoras con sistemas anaerobios o residuos ya digeridos, estas dos últimas modalidades, con el fin de proveerle al sistema un inóculo o “semilla” que promueva el establecimiento de la fase metanogénica.

En general, existen varios métodos para intentar promover el establecimiento de la etapa metanogénica durante la degradación anaerobia:

- Uso de aditivos
- Recirculación de lixiviados (o de lodos digeridos

en el caso de digestión de lodos residuales)

- Pre-tratamiento de los residuos (digestiones ácidas o alcalinas, reducción de tamaño de partícula, etc.)
- Codisposición
- Control de parámetros de operación

El interés de este trabajo se centra en el uso de aditivos, que comúnmente incluyen el uso de material composteado, sin embargo, la mayoría de los trabajos publicados se centran en la degradación anaerobia que se lleva a cabo en reactores, cuyo influente raramente excede el 10% (p/v) en sólidos totales, en contraste con los RSU. Por ejemplo, Yang et al (2009) estudiaron la influencia que diferentes concentraciones de vermicomposta ejercieron sobre la tasa de producción de metano y la actividad metanogénica específica de lodos residuales, atribuyendo a la inclusión de la mayor concentración (sólidos totales) de vermicomposta, como responsable por la máxima producción de metano acumulado en su experimentación.

En el caso de los rellenos sanitarios, el empleo de los aditivos o inóculos puede manejarse a la vez como material de capa intermedia, aquella que se coloca al final de un día de trabajo para evitar que los RSU sean esparcidos por el aire en el sitio de disposición final. Lo más común es que la capa intermedia sea suelo de la región. Márquez y Buenrostro (2006) probaron el efecto de la inclusión de cuatro diferentes tipos de suelo en la degradación de RSU a escala laboratorio. Encontraron que la inclusión de ciertos tipos de suelo, como el calizo o alcalino, inhibe el establecimiento de microorganismos que favorecen la degradación de la materia orgánica, e incluso disminuye la producción de CH₄; sin embargo otros tipos de suelo como la turba de jardín o suelos arenosos influyen favorablemente en el tiempo de establecimiento de las fases de la degradación anaerobia. Sin embargo, al mejor conocimiento de los autores, existe aun un vacío importante en los estudios de inóculos o aditivos para degradación de RSU, por lo que el objetivo de este trabajo es comparar el uso de diferentes mezclas

* Autor para correspondencia:

Laboratorio de Residuos Sólidos y Medio Ambiente.
Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Av San Juanito Itzicuaro
S/N, Col. San Juanito Itzicuaro, Morelia,
Mich. C.p.58302
(443) 3.34.04.75 ext 116.
lmarquez@umich.mx y
lili.marquez@gmail.com

digeridas en reactores digestores en sustrato sólido para usar como aditivos en la degradación anaerobia de RSU, a escala laboratorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de "semilla" metanogénica

Recopilación de Materiales

Se obtuvieron 20 kg de excretas frescas de ganado vacuno de un establo doméstico, 20 l de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales operando con un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA), y finalmente se obtuvieron 5 kg de suelo de jardín del IIAF (UMSNH), excavando con un pico y pala a profundidad de entre 30 y 50 cm. Adicionalmente, se obtuvieron residuos sólidos urbanos frescos del relleno sanitario local, los cuales se llevaron al laboratorio, se separaron los materiales inorgánicos (metal, vidrio, piedras, etc.) y la restante fracción orgánica se desmenuzó manualmente a un tamaño de partícula menor a 1 cm. Todos los materiales se almacenaron a 4 °C hasta su utilización.

Montaje de digestores anaerobios de sustrato sólido

Se dispusieron recipientes de vidrio de 2.5 l para preparar tres tipos diferentes de mezclas (1000 g) para los digestores anaerobios en sustrato sólido (DASS), la composición de los inóculos construidos se muestra en la Tabla 1. Después de incorporar los ingredientes, a cada uno se les adicionaron 3 g de carbonato de sodio y 3 g de sacarosa, se mezclaron manualmente y se taparon con tapones de goma con dos salidas, una para

la toma de muestra de biogás y la otra para un sistema de medición de biogás. Acto seguido, se incubaron a 35 °C, hasta que estuvieron metanogénicamente activos ($\text{CH}_4 \geq 40\%$). Con el fin de lograr esta composición en el biogás, los DASS se alimentaron dos veces por semana con una mezcla seca y molida de papel y residuos alimenticios, bajo flujo de nitrógeno libre de oxígeno (NLO).

Uso de semilla en la degradación de residuos sólidos urbanos

Cuando los digestores estuvieron metanogénicamente activos se extrajo una muestra de 300 g de cada DASS, la cual se secó al aire libre y se molió en mortero de porcelana, se depositó en bolsas de plástico y se guardó, esta muestra se nombro "semilla" o inóculo. Se estudió el efecto de añadir este inóculo en la degradación de RSU, usando proporciones de semilla de 3 y 6% (p/p). Para esto, se emplearon botellas de vidrio (250 ml) con muestras de cada uno de los tres tipos de "semilla" (EXL, JEL, LODOS) más el equivalente a 10 g (base seca) de la fracción orgánica de los RSU, también se montaron botellas con 10 g (base seca) de únicamente semilla (100% de "semilla") y finalmente botellas a las que se les añadió 10 g (base seca) de la fracción orgánica de los RSU (100% de RSU), esta muestra se tomó como control. Después, a cada botella se le añadieron 150 mL de H_2O , se sellaron con tapones Suba-seal® y se sometieron a venteo con NLO para proveer una atmósfera libre de O_2 dentro de la botella de vidrio. Una vez que el espacio aéreo de las botellas se venteó, se incubaron a 35 °C.

Las botellas se analizaron dos veces por semana para determinar la concentración de CH_4 en el biogás por cromatografía de gases (VARIAN CP 3800) y también se monitoreó el valor de pH en cada unidad experimental. El cromatógrafo de gases contaba con un detector de ionización de flama (FID) y una columna de 2m de longitud y 2 mm de DI de acero inoxidable empacada con 5 % de neopentilglicol sebacato + 1 % H_3PO_4 , con temperaturas de operación del inyector de 200 °C, del detector 210 °C, de la columna 80 °C y el gas de arrastre se utilizó a 35 ml/min. La experimentación se llevó a cabo por triplicado.

TABLA 1. Composición de las tres diferentes mezclas para los DASS (proporciones para preparar 1000g)

DASS	Proporción (%)
JEL	33 tierra de Jardín, 33 Excretas vacuna, 33 Lodos residuales
LODOS	80 Lodos residuales, 20 tierra de jardín
EXL	50 Excreta vacuna, 50 Lodos residuales

El análisis de sólidos totales volátiles (STV) se realizó por calcinación a 500 °C.

RESULTADOS

Incubación de residuos sólidos urbanos con inclusión de semilla

El experimento duró 120 días, durante los cuales se monitoreó la producción de metano. Al iniciar el experimento de incubación de RSU con inclusión de semilla o inóculo, se analizaron los contenidos de STV en cada inóculo proveniente de DASS y de los RSU, los cuales se muestra en la Tabla 2, de donde se muestra que el inóculo con la contribución mayor en proporción de STV fue el EXL.

Por otro lado, la Figura 1 muestra la tasa de producción de metano al incubar RSU más distintas inclusiones de las respectivas “semillas”; también muestra la comparación de la producción de metano solo por la incubación de RSU (Control). Los resultados evidencian que existe una mayor tasa de producción de metano al incluir cualquiera de las semillas, ya que el Control no produjo más de 25 $\mu\text{moles CH}_4/\text{kg RSU seco/día}$, incluso al día 120 de la experimentación. Es importante señalar igualmente que la inclusión de las distintas semillas también aceleró el tiempo de establecimiento de la fase metanogénica, ya que en las botellas control, el establecimiento de la fase metanogénica se advierte hasta después del día 70, mientras que en los experimentos con la inclusión de cualquier inóculo, el comienzo de la fase metanogénica fue antes del primer mes de operación.

TABLA 2 Contenido de sólidos totales volátiles en los constituyentes de los distintos inóculos y RSU

Parámetro	EXL	LODOS	JEL	RSU
6 % (g secos)	1	1	1	9.66
3 % (g secos)	0.5	0.5	0.5	9.66
% STV	9.82	3.32	4.52	60.89
g STV _{inóculo} /100g STV _{RSU} en experimentos al 6%	1.67	0.56	0.76	-

Se obtuvieron resultados diferentes al añadir los distintos inóculos a los RSU. En términos generales, la inclusión de inóculo JEL pareció dar los mejores resultados, ya que se lograron tasas de producción de metano de hasta 300 $\mu\text{moles CH}_4/\text{kg RSU seco. día}$ (Figura 1a). Mientras que la inclusión de 6% de inóculo LODOS no presentó efecto alguno sobre la producción de metano (Figura 1b). Además, las distintas proporciones añadidas también produjeron diferencias, en particular el inóculo LODOS y EXL. Mientras que la inclusión de 3% de LODOS potencializó la tasa de producción de CH_4 , la inclusión de 6% del mismo material no produjo ningún efecto

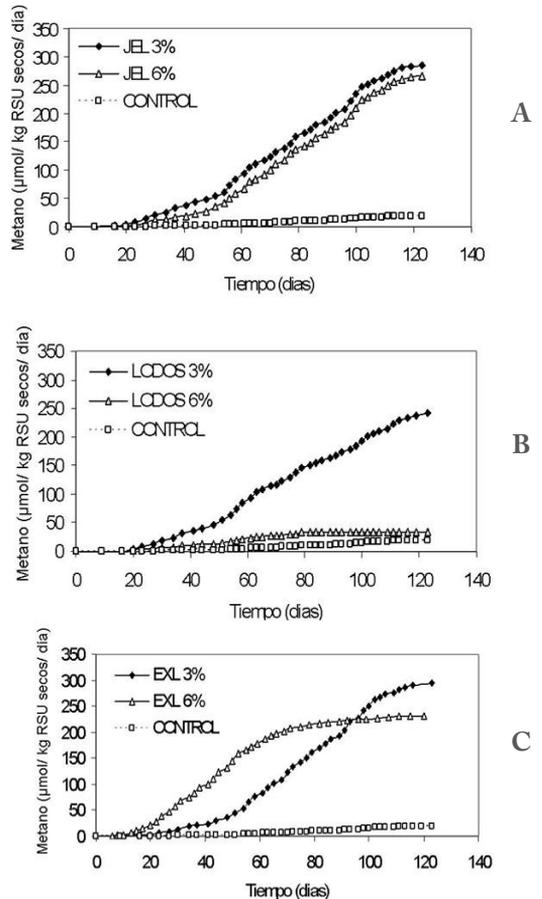


FIGURA 1. Tasa de producción de metano ($\mu\text{mol/Kg RSU seco/día}$) acumulado a partir RSU y los inóculos a) JEL, b) LODOS y c) EXL al 3 y 6%. Cada punto representa el promedio de tres valores

evidente, al menos en el mismo parámetro. Por otro lado, la inclusión de inóculo EXL también presentó una mayor producción de metano al incluir solo 3% de semilla (320 $\mu\text{mol CH}_4/\text{kg RSU seco/día}$), mientras que la introducción de 6% de semilla propició que la fase de producción acelerada de metano terminara hacia el día 60, con una generación de solo 200 $\mu\text{mol CH}_4/\text{kg RSU seco/día}$.

El pH de las botellas con inóculo JEL (Figura 2) muestra el comportamiento de las fases de degradación anaerobia, donde las botellas con RSU+ semilla (3 y 6%), presentaron recuperaciones de pH desde valores ácidos (fase acidogénica) hasta valores de alrededor de 7, en tanto que el CONTROL muestra solo una recuperación parcial para terminar con valores de pH de alrededor de 6. En el experimento JEL, a pesar de que la dinámica de pH fue semejante, es notorio

que la recuperación a pH neutro ocurre primero en el caso JEL 3%. Algo análogo se muestra en el pH de las botellas con 3% de los inóculos LODOS y EXL, ambos muestran recuperación de la acidogénesis en tiempos menores que aquellos mostrados por sus contrapartes de 6%.

Reincubación de semilla para activación anaerobia

Todos los inóculos fueron sometidos a estrés por aireación y se volvieron a incubar en ambiente anaerobio. La Figura 3 muestra los resultados obtenidos en términos de concentración de CH_4 en el biogás. A pesar de que todos los inóculos fueron capaces de volver a producir metano, es claro que la capacidad de recuperación fue distinta entre ellos. El inóculo JEL fue el que mostró la mayor concentración de metano (43.9 $\mu\text{mol CH}_4/\text{kg RSU seco}$) que fue alrededor de 4 veces más que la producida por los inóculos LODOS o JEL. Sin embargo, también debe señalarse que el inicio de la fase metanogénica coincidió con el día 18, en el que también comienza la mencionada fase al incubar RSU con inclusión de inóculo.

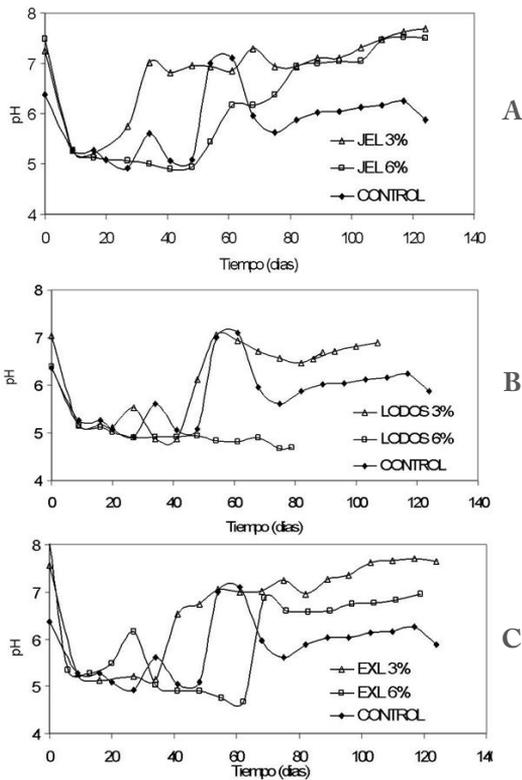


FIGURA 2. Dinámica de pH en la incubación de RSU con a) inóculo JEL, b) inóculo LODOS y c) inóculo EXL al 3% y 6%. Cada punto representa el promedio de tres valores

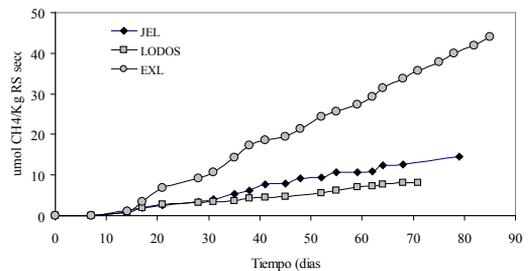


FIGURA 3. Concentración acumulada de CH_4 tras la reincubación de inóculo JEL, LODOS y EXL. Cada punto representa el promedio de tres valores

DISCUSIÓN

La inclusión de material tipo inóculo puede contribuir al establecimiento de la fase metanogénica de la degradación de RSU debido a dos aspectos: (1) contribución por consorcios microbianos y, (2) por material orgánico fácilmente degradable. No obstante, es posible que en este trabajo la contribución haya

sido más importante en el aspecto de introducción de material microbiano, dado que las proporciones añadidas de inóculo fueron relativamente pequeñas (3 y 6% p/p). Los materiales utilizados para construir los 3 tipos de inóculos se consideran de manera natural como fuente de consorcios metanogénicos. Gattinger et al (2007), por ejemplo, han reportado que el uso de excretas de ganado es capaz de promover la presencia de bacterias metanogénicas en suelos arables, a pesar de que sus resultados también parecen sugerir que aplicaciones regulares de excretas vacunas incrementan la biomasa de *Archeas* en suelos, también es posible que estas aplicaciones reduzcan la diversidad de los consorcios ya presentes en el suelo. Los resultados en este trabajo mostraron que la inclusión de los 3 inóculos ocasionó que la tasa de formación de metano fuera hasta 10 veces mayor (Figura 1) que el Control. Es posible que la asociación de los consorcios microbianos de la excreta de vaca y lodos residuales fuera la más fuerte y/o diversa. Conjuntamente es importante señalar que las diferentes proporciones de sólidos totales volátiles dentro de la constitución de las 3 distintas mezclas (Tabla 2) pueden estar relacionadas con el desempeño del inóculo, dado que es sabido que la remoción de STV está directamente relacionada con el rendimiento de biogás. El digestor EXL, el de mayor contribución de STV, estuvo constituido también por la más alta proporción de excretas vacunas (50%), en comparación con los otros dos. De acuerdo a Cecci y col. (2003), el valor típico de STV en RSU es de 45%, con valores máximo de 58% y mínimo de 29%; la parte putrescible contiene alrededor de 78% de STV y otros compuestos como papel, madera y plásticos tienen 7.1, 2.2 y 3.4% respectivamente. Esto significa que la contribución en STV de los inóculos es equiparable a aquella fracción no degradable de los RSU y que la contribución de los inóculos vino por la parte de adición de carga microbiana. La definición de la cantidad de inóculo a utilizar se basó en el siguiente criterio: Se sabe que en el caso de material por arriba del 5 % de sólidos (como es el caso de RSU), las proporciones residuo/semilla son importantes. En términos de sólidos volátiles, Neves y colaboradores (2004) reportaron que haciendo uso de gránulos de lodos para lograr la biometanización de residuos de cocina, es posible que ocurra un acidificación cuando la proporción residuos/

inóculo (sólidos volátiles) es mayor que 1:2. Futuras investigaciones pueden relacionarse al estudio de una proporción mayor de inóculo en los RSU.

El haber sometido a estrés por aireación a los inóculos añadidos también debe considerarse. Es muy posible que el desempeño de los 3 inóculos este conectado a la supervivencia de consorcios microbianos. Wu y Conrad (2001) estudiaron el estrés por aireación de dos cultivos metanógenos enriquecidos, degradadores de celulosa. De acuerdo al reporte publicado, tanto *Methanosaeta* como *Methanosarcina* degradaban celulosa anaerobicamente vía propionato, acetato e hidrógeno a CH_4 , aunque *Methanosarcina* era predominantemente acetoclástica. Al aplicar estrés por aeración a 12, 24, 36 y 76 horas, observaron que mientras mas largo el estrés, mayor la inhibición de la producción de metano. Interesantemente, también reportan que el estrés es más pronunciado a 30 °C pero es menos duradero que aquel presentado a 15 °C. Igualmente, reportaron que el estrés por aireación era específicamente efectivo durante la segunda fase de la fermentación metanogénica, esto es, durante la utilización de los ácidos orgánicos volátiles, donde incluso la duración del estrés aumentaba. Mientras más largo el estrés, menor era el porcentaje detectado de células de *Methanosarcina*, por lo que el estudio concluye que el estrés por aeración afecta más a las bacterias metanogénicas acetotróficas que a las hidrogenotróficas. Este es un resultado relevante a esta investigación puesto que se sabe que el 90% del metano producido en el biogás de un relleno sanitario proviene de la actividad de las bacterias acetoclásticas o acetotróficas.

CONCLUSIONES

La adición de inóculos JEL, LODOS o EXL es capaz de incrementar la tasa de producción de metano y el establecimiento de la fase netamente metanogénica de la degradación de RSU, en régimen mesofílico y bajo las condiciones aquí descritas.

La proporción de inóculo añadido debe ser tomada en cuenta puesto que puede significar una importante contribución al sistema no solo en términos de carga microbiana sino también de material fácilmente

degradable.

El inóculo con el mejor desempeño fue el EXL al incubarlo en proporción de 3% con RSU.

La reincubación de los inóculos aireados y molidos produjo una producción neta de metano, indicando que el inóculo puede considerarse una fuente o inóculo bacteriano.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el excelente apoyo técnico brindado por el Biólogo Francisco Javier Colín Ruiz, de la Facultad de Biología.

REFERENCIAS

- Barlaz; M.A., Ham; R. K., Schaefer, D.M., Isaacson, R. (1990) Methane production from municipal refuse: A review of enhancement techniques and microbial dynamics. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **19**(6):557 – 584.
- Cecci, F., Transverso, P., Pavan, P., Bolzonella, D. and Innocenti, L. (2003) Characteristics of the OFMSW and behaviour of the anaerobic digestion process. In: Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. Ed. J Mata Alvarez. IWA Publishing, UK. 323 pp, ISBN 1 900222 14 0
- Chin-Chao C., Chiu-Lue, L., Ming-Cheng, L.(2002) Acid–base enrichment enhances anaerobic hydrogen production process. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **58**(2):224-228.
- Demir, A. M., Bilgili, S., Ozkaya, B. (2004) Effect of leachate recirculation on refuse decomposition rates at landfill site: a case study. *International Journal of Environment and Pollution* **21**(2):175-187
- Gattinger A. Höfle M.G., Schloter M, Frank Böhme A. E.,Munch J. C. and Labrenz M. (2007) Traditional cattle manure application determines abundance, diversity and activity of methanogenic *Archaea* in arable European soil. *Environmental Microbiology* **9** (3):612-624
- Ghosh, S and Pohland F. G. (1974) Kinetics of Substrate Assimilation and Product Formation in Anaerobic Digestion. *Water Pollution Control Federation*, **46**(4):748-759
- Gonzalez-Gil, G. Robbert Kleerebezem, And Gatzte Lettinga (1999) Effects of Nickel and Cobalt on Kinetics of Methanol Conversion by Methanogenic Sludge as Assessed by On-Line CH₄ Monitoring. *Applied and Environmental Microbiology*, **65**(4):1789–1793
- Márquez-Benavides, L. & Buenrostro-Delgado, O. (2006) Efecto de suelos en la degradación anaerobia de residuos municipales. *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y practica*, **1**(1), Publicación electrónica, ISSN: 0718-378X
- Muñoz, M.Ascensión; Sanchez, Jose M.; Rodriguez-Maroto, Jose M.; Moriñigo, Miguel A.; Borrego, Juan J. (1994) Evaluation of the use of sepiolite to optimize the methanogenesis from anaerobic domestic sludges in laboratory conditions. *Water Research*, **28**(1):195-200.
- Neves L., Oliveira R. and Alve M.M. (2004) Influence of inoculum activity on the bio-methanization of a kitchen waste under different waste/inoculum ratios, *Process Biochemistry*, **39**(12): 2019-2024.
- Pereda Reyes, I., Irusta Mata, R., y Oliva Terencio, D (2007) Uso de los residuos sólidos mineros de la extracción del níquel como estimulantes para la producción de biogás. *Ingeniería Mecánica*, **1**: 57-61.
- Rodriguez Iglesias, J.; Castrillón Pelaez, L.; Marañon Maison, E.; Sastre Andres, H. (2000) Biomethanization of municipal solid waste in a pilot plant. *Water Research*, **34**(2): 447-454.
- Sandoval C. J., Carreño M., Castillo E., Vergara M. M. (2007) Caracterización biológica de los lodos anaerobios utilizados en el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos Scientia et Technica Año XIII, No 35, Universidad Tecnológica de Pereira Colombia.
- Torres P., Cardozo A., Rojas O. (2004) Mejoramiento de la calidad de lodos anaeróbicos. Influencia

- de la adición de cloruro férrico: *Ingeniería y Competitividad*. Universidad del Valle, Colombia. **5**(1):23 – 31.
- Wu X L; Conrad R (2001) Functional and structural response of a cellulose-degrading methanogenic microbial community to multiple aeration stress at two different temperatures. *Environmental microbiology*, **3**(6):355-62.
- Yang, S., Li, J., Zheng, Z., Zhang, Y., Zhang, B. (2009) Vermicompost as an accelerator of methane production. *International Journal of Environmental Engineering*, **1**(1):52-63