

# Sistemas de digestión anaerobia para el tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Municipales

Gerardo Cuautle Tecanhuey<sup>1</sup>, María Leticia Ramírez Castillo<sup>1</sup>, Misael Murillo Murillo<sup>2</sup>, Luis Felipe Pérez Hidalgo<sup>1</sup>, Lucila Valdez Castro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Puebla  
 Tercer Carril del Ejido “Serrano” s/n  
 San Mateo Cuanalá, Juan C. Bonilla, Puebla, 72640 México.

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Puebla  
 Avenida Tecnológico 420  
 Col. Maravillas, Puebla, 72640 México.

cqmbodgher@hotmail.com, letyram@unam.mx

**Resumen**— La digestión anaerobia es una estrategia utilizada para tratar la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Municipales (FORSM). En este trabajo se probaron digestores anaerobios tipo batch de diferentes capacidades y materiales (0.5, 20 y 500 l) para la degradación y producción de biogás utilizando FORSM provenientes de la zona metropolitana de la Cd. de Puebla. También fueron adicionados estiércol de vaca, lixiviados y aguas residuales de la UP-Puebla, el tiempo de retención fue de 30 días. Se utilizó alta concentración de sólidos totales observándose que la alta concentración disminuye la producción de biogás presentándose una disminución de pH lo que afecta la generación de biogás, este último no combustiona indicando un bajo contenido de metano.

**Palabras Claves**— Digestión anaerobia, biogás, batch, Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Municipales.

## I. INTRODUCCIÓN

La Digestión Anaerobia (DA) hoy en día es una tecnología que se encuentra entre las metodologías rentables para el tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Municipales (FORSM). En países de la Unión Europea (UE) la utilización de FORSM se ha convertido en una actividad que ha dejado frutos en los últimos 20 años. Desde 1990, cerca de 6 millones ton/año de Residuos Sólidos Municipales (RSM) son transformados en biogás mediante la operación de 200 digestores anaerobios a nivel industrial construidos en 17 países de la UE [1]. Considerando que el 0.17% corresponde a la materia orgánica degradable, cerca de 1.02 millones ton/año son destinados a un tratamiento de DA. Lo anterior demuestra que al menos un país de la UE con digestores anaerobios instalados, tiene la capacidad de tratar mediante esta tecnología alrededor de 60 mil ton/año de FORSM. Aunque los países que conforman la UE sufren de una gran generación de RSM, aproximadamente 2.8 billones ton/año [2], el éxito

del aprovechamiento de la FORSM por DA se debe principalmente a fuertes políticas de gestión integral de residuos. En cambio en nuestro país, la aplicación de estas tecnologías de tratamiento de residuos se limita por diversos factores como son: la crisis económica que obliga a reducir gasto público para el sistema de limpia, la limitada continuidad de programas de gestión de residuos, la poca educación sanitaria y la limitada cultura ecológica reflejada en la escasa participación de la población en programas de tratamiento de residuos [3]. Aunado a lo anterior el problema se agudiza al aumentar el crecimiento de la población lo que incide directamente en el incremento gradual de residuos que se generan.

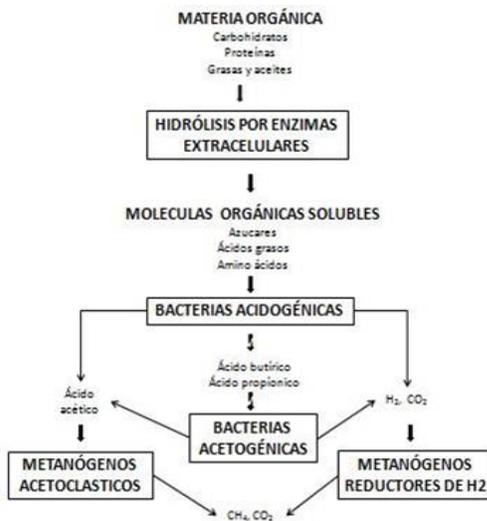
En México la generación de la RSM actual es de 34.6 millones ton/año del cual el 53% corresponde a la FORSM el cual es equivalente a 18.3 millones ton/año. Los métodos convencionales para el tratamiento de los RSM en nuestro país son los rellenos sanitarios, cuya capacidad se limita a la recolección de apenas el 87% de los residuos generados, del cual el 64% se envía a 88 rellenos sanitarios y 21 sitios controlados, el resto se deposita en tiraderos a cielo abierto o sitios sin control [4].

La FORSM contiene una amplia fracción de sólidos suspendidos y materia soluble compleja, de entre sus principales componentes de materia biodegradable (carbohidratos, lípidos y proteínas) [5]. Además presentan una relación C/N alta y se caracterizan por su alto contenido de agua (>80%) [6]. Lo anterior indica que la FORSM son un sustrato con características adecuadas para la generación de “biogás”. Se han reportado experimentos donde se evalúa la obtención de biogás a partir de diferentes sustratos que constituyen la FORSM, como residuos de mercados populares [7], combinación de FORSM con lodos residuales de planta de

tratamiento [8], grasas [9] y estiércol [10]. Este proceso en el que se combinan sustratos se conoce como co-digestión anaerobia.

## II. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La Digestión Anaerobia (DA) es un proceso en el cual compuestos orgánicos son transformados en biogás (principalmente metano, CH<sub>4</sub> entre 65-75 % y dióxido de carbono, CO<sub>2</sub> 35-25%) en ausencia de oxígeno. Esta transformación se lleva a cabo por un consorcio de microorganismos de diferentes géneros, los cuales mantienen una relación simbiótica para la estabilización de los residuos orgánicos utilizados. La DA se divide en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Estas etapas se muestran en la Figura 1, los aspectos de cada etapa se describen en la literatura especializada [11-12]. Durante la hidrólisis se lleva a cabo la reducción de la materia orgánica mediante la acción de enzimas que generalmente son extracelulares, dando lugar a la formación de compuestos solubles que son fácilmente degradables en etapas posteriores. La acidogénesis consiste en la transformación de los compuestos solubles en ácidos orgánicos como los ácidos butírico, propiónico y acético. Durante la acetogénesis se forma ácido acético, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> los cuales son utilizados en la metanogénesis para formar biogás por la acción de diferentes grupos de bacterias metanogénicas.

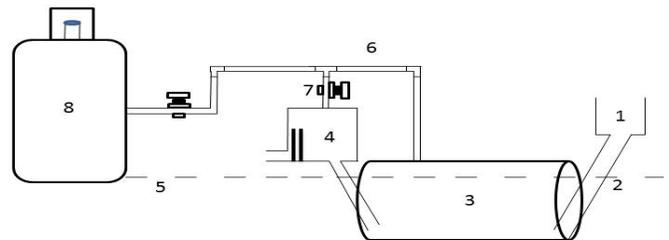


**Figura 1** Etapas de la digestión anaerobia: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

En un proceso de DA, se deben tomar en cuenta parámetros que hacen posible la transformación de la materia orgánica, se sabe que el proceso requiere de condiciones de pH entre 6-8 y de temperatura entre 30-40°C. Para que sea rentable en la producción de energía, se debe generar un biogás que contenga entre 60-80 % de metano y una producción de 1 a 5 litros de biogás por litro de reactor o bien de 0.3 a 0.5 m<sup>3</sup> de biogás por kg de basura orgánica. Existen diferentes diseños de digestores anaerobios, los que se utilizaron en este trabajo fueron el

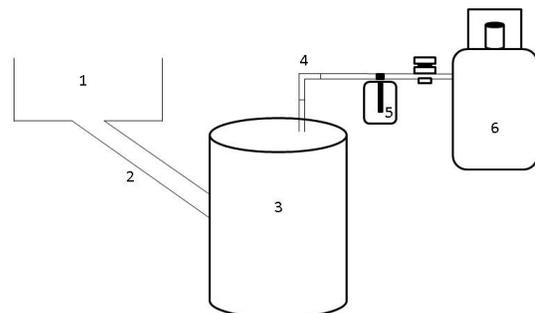
digestor tubular y biorreactores en vidrio y acero inoxidable.

*Digestor Tubular (Tipo Taiwán).* En la Figura 2 se observa un esquema del sistema de DA usando un digestor tubular el cual suele ser económico. Durante el proceso anaerobio, estos digestores son poco eficientes ya que las diferentes fases suceden por secciones a lo largo del digestor.



**Figura 2.** Digestor Tubular de Polietileno: 1 Tanque de mezclado, 2 entrada de alimentación de PVC, 3 digestor tubular bajo tierra, 4 salida de PVC, 5 nivel de la superficie, 6 tubería de recolección de biogás, 7 trampa de agua, 8 unidad de almacenamiento.

*Biorreactor.* En la Figura 3 se observa un esquema similar al anterior pero utilizando un biorreactor en el cual también se llevan a cabo todas las fases.



**Figura 3** Digestor de una fase: 1 Tanque de mezclado, 2 Entrada de alimentación, 3 Digestor, 4 Tubería de recolección de biogás, 5 Trampa de agua, 6 Unidad de Almacenamiento de biogás.

En este trabajo se utilizaron digestores anaerobios tipo batch de diferentes capacidades y materiales para la degradación de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y la potencial producción de biogás utilizando FORSM.

## III. METODOLOGÍA

### Digestores

Se utilizaron tres digestores tipo batch de 0.5, 20 y 500 l. El digestor de 0.5 l es un reactor de vidrio encaquetado, el de 20 l está construido en acero inoxidable, ambos reactores tienen medidas de acuerdo a las relaciones estándar y cuentan con sistemas de recolección de gas y monitoreo de pH. El digestor tubular de 500 l fue construido con un tubular de plástico resistente [13]. El tiempo de retención en todos los casos fue de 30 días.

### Digestor Anaerobio de 0.5 L

La FORSM utilizada para la alimentación del digestor de 0.5L fue tomada de la Central de Abastos de la Cd. de Puebla. La materia orgánica se tritura hasta obtener un tamaño de partícula menor de 1 mm. Se adicionó estiércol de vaca como inóculo en una relación de 1:5 (1 parte de estiércol y 5 partes de materia orgánica) y se completó con agua residual de la Universidad Politécnica de Puebla. El volumen de operación fue de 0.4 l. La concentración de Sólidos Totales (ST) en este experimento fue de 40 g<sub>ST</sub>/l.

### Digestor Anaerobio de 20 L

Para la alimentación del digestor de 20 L, se utilizó la FORMS proveniente de la cafetería del Instituto Tecnológico de Puebla (ITP) y lixiviados provenientes de una pila de composteo instalada en esta institución, el volumen de operación fue de 20 l. Los residuos orgánicos fueron triturados y mezclados en una proporción de 0.25 g de FORMS por 1 ml de lixiviado (1 parte de FORMS y 4 partes de lixiviados) alcanzando una concentración de 30 g<sub>ST</sub>/l. El volumen de operación fue de 15 l.

### Digestor Anaerobio de tubular de 500 l

Las dimensiones del digestor tubular que fue construido con tubular de plástico, fueron de 0.75 m de diámetro y 4 m de largo, llenándose con 250 l de material. La recolección de FORMS para este experimento se llevó a cabo en el tianguis de Huejotzingo, Puebla. El nopal fue el principal constituyente. Los residuos orgánicos fueron triturados y mezclados en una proporción de 0.5 g estiércol por 1 g de FORMS, junto con lixiviados provenientes de una pila de composteo de la Universidad Politécnica de Puebla. La concentración fue de 35 g<sub>ST</sub>/l.

### Monitoreo del Proceso de Digestión Anaerobia.

Para la medición del biogás producido se utilizó una columna de agua que funciona mediante el desplazamiento del líquido por el biogás. El pH y los sólidos totales (ST) durante el proceso se monitorean semanalmente siendo el tiempo de retención de 30 días. Los sólidos totales se determinaron en base a la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 [14].

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 muestra los digestores anaerobios de 0.5 l y de 20 l que fueron utilizados. El digestor de 20 l fue armado y puesto en marcha.

La generación de biogás en estos digestores se presenta en la Figura 5. El digestor de 0.5 l presentó una máxima generación de biogás durante la primera semana, la producción disminuye notablemente a partir de la segunda semana y posteriormente la producción cesa. En el digestor de 20 l la generación de biogás inicio durante la segunda semana de operación y posteriormente disminuye conforme avanza el tiempo de digestión. La producción de biogás fue de 0.006 l/g<sub>ST</sub> para el reactor pequeño y de 0.075 l/g<sub>ST</sub> para el de 20 l, valores muy bajos comparados con la bibliografía de 0.5 l/g<sub>ST</sub> [10].



Figura 4 Digestores anaerobios de 0.5 y 20 l.

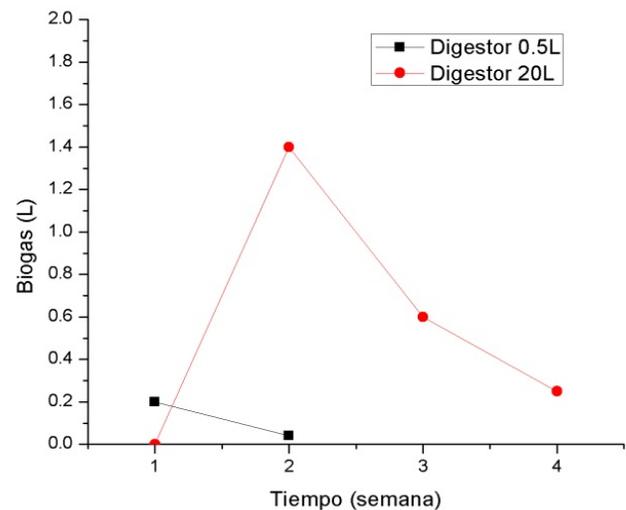


Figura 5. Producción de biogás en digestores de 0.5 l y 20 l.

En la Figura 6 se observa el perfil de pH para el reactor de 0.5 L, el experimento inicio con un pH cercano a 7 y disminuyó hasta 4 durante el proceso de digestión. La bibliografía indica que en esta etapa se generan ácidos orgánicos que hacen posible la inhibición de la generación de biogás ya que los valores de pH bajo promueven el decrecimiento de bacterias metanogénicas. La disminución del pH coincide con disminución de generación de biogás y su completa inhibición durante las primeras dos semanas de haber sido montado el experimento en el digestor de 0.5 l.

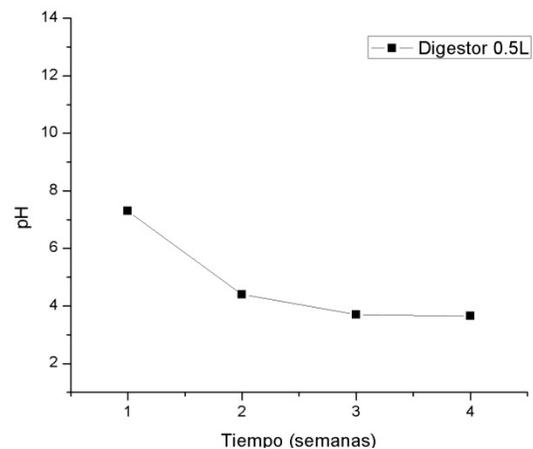
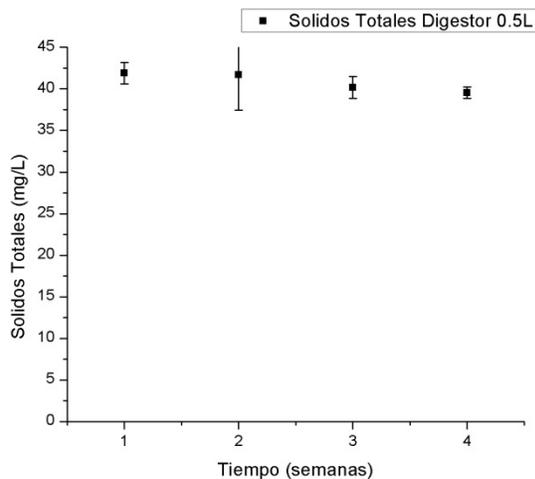


Figura 6 Comportamiento del pH en digestor de 0.5 L.

La concentración de Sólidos Totales (ST) en el digestor de 0.5 l no presentó una disminución considerable respecto al valor inicial, dichos valores se muestran en la Figura 7.

Tomando en cuenta que la concentración de sólidos es un parámetro importante en la DA, el alto contenido no facilitó la degradación de la materia orgánica, provocando una disminución considerable del pH, lo cual fue discutido previamente. Al no haber degradación de al menos el 40% de ST, se lleva a cabo la proliferación de bacteria acidogénicas que confieren las condiciones ácidas en el medio pero inhiben la fase metanogénica. Esto implica que se llega solamente hasta la segunda etapa del proceso.



**Figura 7** Sólidos totales en digestor de 0.5 L.

Un digestor anaerobio tubular fue construido con tubular de plástico, Figura 8, este tipo de digestores son baratos y han sido muy utilizados en países en vías de desarrollo produciendo biogás. Se observa que se produjo biogás al menos en un volumen similar al adicionado de 250 l. Sin embargo es de mencionar que en los tres digestores el biogás fue de baja calidad ya que no hubo combustión al hacer la prueba del fuego.



**Figura 8** Instalación del digestor anaerobio de 500 l.

## V. CONCLUSIONES

Una alta concentración de sólidos totales de FORMS muestra una rápida disminución de pH sin producir grandes

cantidades de biogás, el valor máximo obtenido de biogás fue de 0.075 l/g<sub>ST</sub> en el reactor de 20 l con 30 g<sub>ST</sub>/l. La disminución de pH es indicio de que el proceso de digestión anaerobia puede detenerse en la segunda etapa de acidogénesis. El digestor tubular mostró producción de biogás de al menos el mismo volumen que el adicionado, este tipo de sistema tiene gran potencial de aplicación porque es barato, sin embargo se recomienda que el digestor este cubierto para protegerlo. La calidad del biogás producido es esencial para la aplicación de este biocombustible en sistemas de generación de energía.

## VI. REFERENCIAS

- [1] De Baere L., Mattheeuws B. (2010) *Anaerobic Digestion of MSW in Europe*. Biocycle Energy, 51(2): 24-27.
- [2] Schrör H. *Generation and treatment of waste in Europe 2008, steady Reduction in Waste Going to landfills*. Eurostat, Statistics in focus 44/2011. [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY\\_OFFPUB/KS-SF-11-044/EN/KS-SF-11-044-EN.PDF](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-SF-11-044/EN/KS-SF-11-044-EN.PDF). Consultado en agosto 2012.
- [3] Jaramillo J. (1999) *Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales-GIRSM*, Medellín, Seminario Internacional: Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos Siglo XXI, 1999.
- [4] SEMARNAT. *Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012*. <http://www.semarnat.gob.mx/programas/Documents/PNPGIR.pdf>. Consultado en agosto 2012.
- [5] Buenrostro O., Cram S., Bernache G., Bocco G. (2000) *La Digestión anaerobia como Alternativa de tratamiento a los Residuos Sólidos Orgánicos generados en los Mercados Municipales*. Revista Internacional de Contaminación Industrial, 16 (1): 19-26.
- [6] Lastella G., Testa C., Cornacchia G., Notornicola M., Voltasio F., Vinod Kumar Sharma (2002) *Anaerobic Digestion of Semi-Solid OrganicWaste: Biogas Production and Its Purification*. Energy Conversion and Management, 43: 63-75.
- [7] Ranade D.R., Yeole T.Y., Godbole S.H. (1987) *Production of Biogas from Market Waste*. Biomass, 13 (3): 147-153.
- [8] Nayono S.E., Gallert C., Winter J. (2010) *Co-digestion of Press Water and Food Waste in a Biowaste Digester for Improvement of Biogas Production*. Bioresource Technology, 101 (18): 6998-7004.
- [9] Martín-Gonzalez L., Colturato L.F., Font X., Vicent T. (2010) *Anaerobic co-digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes with FOG waste from a Sewage Treatment Plant: Recovering a Wasted Methane Potential and Enhancing the Biogas Yield*. Waste Management, 30 (10): 1854-1859.
- [10] El-Mashad H.M., Zhang R. (2010) *Biogas Production from Co-digestion of Dairy Manure and Food Waste*. Bioresource Technology. 101 (11): 4021-4028.
- [11] Jingura R.M., Matengaifa R. (2009) *Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (5): 1116-1120.
- [12] Appels L., Baeyens J., Degreve J., Dewil R. (2008) *Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge*. Progress in Energy and Combustion Science, 34 (6): 755-781.
- [13] CNFL (2011) *El Biodigestor*. Compañía Nacional de Fuerza y Luz. Costa Rica.
- [14] NMX-AA-034-SCFI-2001. (2001) *Determinación de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales tratadas*. Diario Oficial de la Federación.