



## **Aprovechamiento de lixiviados mediante un sistema de digestión anaerobia**

Marisol Flores Plascencia<sup>a</sup>, Dr. Misael Murillo Murillo, Dra. María Leticia Ramírez

<sup>a</sup>Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, Universidad Politécnica de Puebla, premi168@yahoo.com.mx, Universidad Politécnica de Puebla, letyram@unam.mx

### **RESUMEN**

Para la realización de este proyecto se utilizó la fracción orgánica de los Residuos Sólidos Municipales (RSM), para obtener lixiviados, y someterlos a digestión anaerobia para producir biogás por medio de un reactor cilíndrico de 10 litros. Las dos corridas experimentales revelaron una fuerte dependencia de la temperatura para la conversión de la materia orgánica en biogás, puesto que en la primera, a temperatura ambiente, de 26 a 20°C y un pH sin regulación que disminuyó de 7 a 5, se produjeron 1800 mL de gas, con un consumo de 50% de la DQO y un olor característico de alcohol y ácidos orgánicos. Durante la segunda corrida, con lixiviados inoculados con estiércol vacuno; a temperatura controlada alrededor de 30°C y un pH que se mantuvo sin regulación alrededor de 8; la producción de gas fue de 1300 mL y mostró olor característico de biogás, cuya composición fue aproximada, al observar que el 25% del gas se disolvió en una solución de KOH. Es decir que al menos el porcentaje restante estaba compuesto por metano y otros compuestos propios de la digestión anaeróbica. Se concluyó que la temperatura en el rango mesófilo es fundamental para digerir lixiviados, lo que representa una posibilidad de degradar estos líquidos contaminantes con producción de energía.

### **1. INTRODUCCIÓN**

La generación de desechos sólidos municipales (RSM) es un grave problema de las zonas urbanas y en proceso de urbanización; y, aunque una gran fracción de estos es reciclable o reutilizable, su disposición es aun inadecuada e insuficiente. Por ello, una parte se puede encontrar en la vía pública y en vertederos a cielo abierto, convirtiendo estos sitios en focos de infección por la gran cantidad de la fauna nociva, que puede propagar diversas enfermedades.

Así, aun cuando las fracciones aprovechables inorgánicas (plásticos, metales, papel y cartón), son económicamente valorizables; la fracción orgánica no es considerada en la gestión integral debido a los altos costos que implica su aprovechamiento a través de las tecnologías actuales, una logística de manejo más compleja y disponibilidad de grandes áreas para la aplicación de las diferentes formas de degradación o aprovechamiento energético de la fracción orgánica de los residuos.

Con todo, es posible generar biogás, degradando anaerómicamente los lixiviados producidos a partir de esta fracción orgánica, lo que puede constituir una fuente de energía a utilizar en el lugar en donde se generan o se confinan esos materiales, contribuyendo además con el desarrollo sustentable.

De esta forma, se justifica la investigación y aplicación de tecnologías tendientes a simplificar los procesos de aprovechamiento energético de la fracción orgánica de los RSM, en este caso para la metanización de los lixiviados generados durante su descomposición.



Por consiguiente el objetivo de este proyecto es degradar y metanizar los lixiviados provenientes de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, por medio de un digestor anaerobio a nivel laboratorio, para contribuir a su gestión integral y a reducir el espacio destinado a su confinamiento en los rellenos sanitarios.

## TEORÍA

De acuerdo a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, los lixiviados son: “líquidos que se forman por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contienen en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que pueden dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos”(Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2003).

Este líquido se encuentra comúnmente asociado a rellenos sanitarios, en donde, debido a su filtración a través de los desechos sólidos y de sus reacciones químicas y biológicas, se producen una serie de productos de descomposición disueltos, así como otros compuestos, algunos incluidos en el biogás producido.

Si el relleno sanitario no tiene sistema de recogida de lixiviados, éstos pueden alcanzar las aguas subterráneas y causar, como resultado, problemas medio ambientales o sanitarios (Álvarez, 2006).

Por otra parte, la digestión anaeróbica es el proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o biogás ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ), como componentes mayoritarios, y en un líquido conocido como digestato, que es una mezcla de productos minerales, nitrógeno, fósforo, potasio y calcio, entre otras especies químicas; además de compuestos de difícil degradación.

Las ventajas principales del proceso de digestión anaeróbica son: minimización de emisiones de gases de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y, a su vez, la obtención de un abono orgánico rico en nutrientes y libre de patógenos para el uso directo en la tierra” (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, 2007).

La digestión anaeróbica está caracterizada por la existencia de varias fases consecutivas, diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato, que es un término genérico para designar, en general, al alimento de los microorganismos. En este proceso intervienen cuatro grandes poblaciones de microorganismos”, como se muestra en la Figura 1.

La acción conjunta de los microorganismos anaerobios hace posible la conversión residuos orgánicos en biogás y otros subproductos, dependiendo de la fracción que se someta a tratamiento.

Asimismo, en el proceso interactúan cinco grandes poblaciones bacterianas, catalizando tres procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis (formación de ácidos) y metanogénesis (formación de metano), agrupadas en cuatro etapas (ver Figura 1).



**Hidrólisis**  
cellulomonas

**Ácidogénesis**  
Clostridium  
Ruminococos

**Acetogénesis**  
Acetobacterium  
Eubacterium

**Metanogénesis**  
Metanogénicas  
Hidrogenofilas

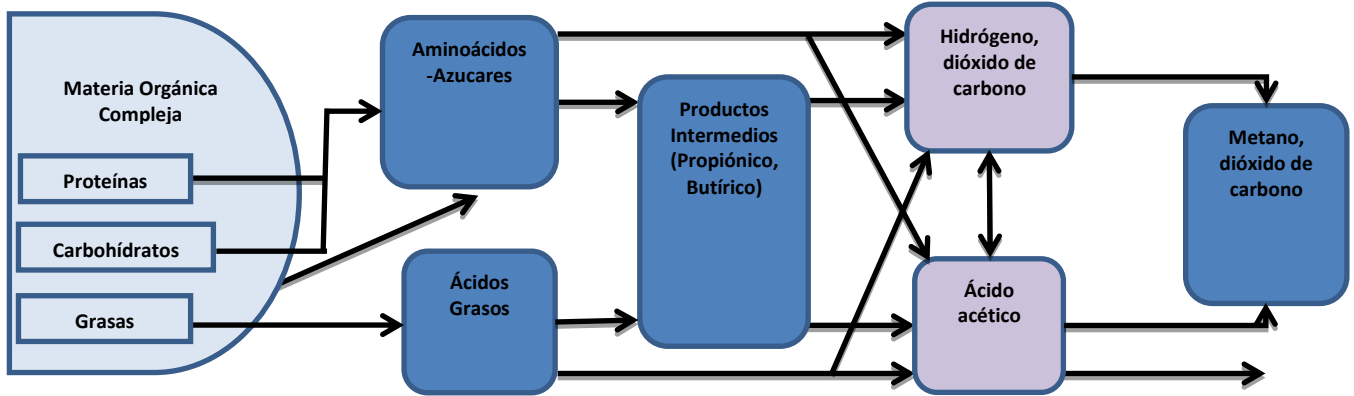
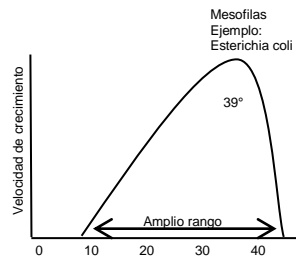


Figura 1 Fases de la digestión anaerobia.  
Fuente: Nakasima *at el.* (2009)

Lo anterior da una idea de la complejidad del proceso de digestión, al depender de muchas especies bacterianas, cada una con sus propios valores óptimos de actividad metabólica. Esta peculiaridad hace que los procesos anaerobios sean muy sensibles a cambios en las condiciones físico-químicas, como se especifica en la Figura 2.



Tipo de microorganismos de acuerdo con su rango óptimo de pH:  
**Acidófilos:** pH <6  
**Acidófilos obligados:** ≥7.  
**Alcalófilos:** pH >9.

Figura 2. Condiciones físicoquímicas óptimas para las especies bacterianas mesófilas. Fuente: Madigan (2003).

De esta manera, los diferentes tipos de tratamientos para los lixiviados provenientes principalmente de rellenos sanitarios muestran variabilidad en cuanto a rendimientos y condiciones de operación (Tabla 1).



Tabla 1. Tratamientos para lixiviados. Fuente: Noeggerath (2010).

Sistemas para tratamiento de lixiviados	Ventajas	Desventajas
Humedales *	Simplicidad en su operación. Sembrado de plantas acuáticas. Proceso natural para tratamiento de agua.	Variaciones de cargas hidráulicas y orgánicas.
Lagunas de evaporación*	Método simple. La remoción de materia orgánica puede ser aerobia o anaerobia.	No se le da importancia a los olores generados. Se concentra la materia orgánica sobre todo la recalcitrante.
Sistemas de Membranas	Disminución de volumen en tanques del reactor biológico. Se logran cantidades significativas en la cantidad de biomasa.	Los módulos son más complicados de operar. Aumento en los costos de energía.
Lagunas mecánicamente aireadas	Se utiliza la materia orgánica como fuente de energía.	Tiene costos elevados. Mayor consumo de energía eléctrica.
Lagunas aerobias	Reducción de contenido en sólidos y materia orgánica.	No se obtiene un efluente de alta calidad.
Lodos activados	La homogenización de caudales, la sedimentación primaria (en la mayoría de los casos), el tratamiento biológico y la sedimentación secundaria pueden lograrse en un tanque reactor único.	Se deben acondicionar las aguas residuales. Mayor costo. Taponamiento potencial de los dispositivos de aireación durante ciclos operativos específicos dependiendo del sistema de aireación utilizado.
Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)	Efectiva separación de biogás, desagüe y lodo. Mayor simplicidad del sistema.	Alto contenido de amoníaco y minerales disueltos. Acumulación de material precipitado. Costo elevado.

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

Este trabajo está dirigido a aplicar la tecnología anaerobia existente; y busca, además, mediante el monitoreo de sistemas a nivel laboratorio, encontrar condiciones que contribuyan a mejorar la metanización de los lixiviados de acuerdo con el objetivo planteado. Las técnicas para el monitoreo del proceso implementado, se enlistan en la Tabla 2.



Tabla 2. Técnicas de recolección de información para el monitoreo del proceso implantado.

DETERMINACIÓN	PRINCIPIO	REFERENCIA
SST, SSV	GRAVIMÉTRICO	NMX-AA-67-SCFI-2001
pH	POTENCIOMETRÍA	NMX-AA-008-SCFI-2000
DQO (demanda química de oxígeno)	DIGESTIÓN Y ESPECTROFOTOMETRÍA	NMX-AA-030-SCFI-2001
DBO (demanda biológica de oxígeno)	CONSUMO DE OXÍGENO POR UNA MICROFLORA EN FRASCOS CERRADOS	NMX-AA-028-SCFI-2001
MEDICIÓN DE PRODUCCIÓN DE BIOGAS	DESPLAZAMIENTO DE VOLUMEN DE AGUA DISOLUCIÓN DE GASES EN SOLUCIONES BÁSICAS	Urieta-Aguado (2010)

Los lixiviados fueron colectados a partir de la fracción orgánica de RSM, colocados en una pecera de acrílico, de tal manera que su descomposición produjera tales líquidos. Se asumió que estos no contenían metales ni sustancias inhibitoras puesto que se produjeron a partir de desechos domésticos, recolectados, después de su separación en una unidad habitacional de la zona metropolitana de Puebla, Pue.

Para el arranque del reactor se colocaron los lixiviados recuperados en un reactor de policarbonato de 10 litros, sellado y con válvulas y ductos para la inyección de material nuevo, salida de gas y toma de muestras digeridas. Para el seguimiento inicial de la digestión de los lixiviados se agitó el contenido del digestor, que se mantuvo a temperatura ambiente y en el que no se ajustó el pH del sustrato. Este reactor se alimentó con 300 mL de lixiviados frescos una vez por semana. Una vez estabilizado, se dejó reposar con el nuevo material y semanalmente se extrajo la misma cantidad de líquido, para realizar las pruebas correspondientes de ST, SSV y DQO (ver Tabla 2).

Las condiciones iniciales de esta corrida experimental se muestran en la Tabla 3.

En la Figura 3 se muestra el acoplamiento de una pecera para la extracción de los lixiviados hacia el digestor y el gasómetro.

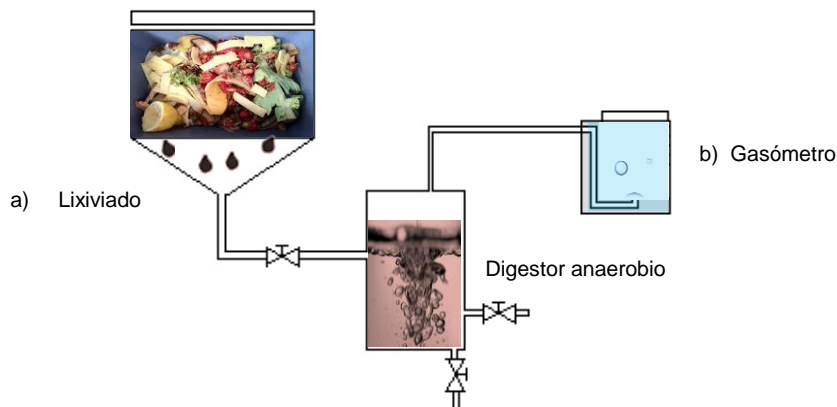


Figura 3. Acoplamiento de la producción con la digestión de los lixiviados. a) Inicio de la recolección de lixiviados, b) detalle del digestor con el gasómetro.

Tabla 3. Datos iniciales para la primera corrida de digestión de lixiviados.

Color	pH	DQO	ST	SSV	T
Amarillo	7.5	20.83 g/L	19.59 g/L	9.67 g/L	26°C

En la Figura 4 se muestra el comparativo de los resultados obtenidos de los SSV y la DQO del reactor analizado inicialmente.

El pH inicial fue de 7-8, posteriormente, al realizar la primera inyección bajó a un valor ubicado entre 6 y 7, aunque con la segunda inyección descendió a 5.5 como se muestra en la Figura 5.

Se presentó una producción acumulada de gas de 1010 mL, considerando el periodo de aclimatación, aunque aún no se tienen evidencias de su composición, es decir se no ha determinado si se llegó a la metanización, por lo que preliminarmente se efectuó la prueba de ignición con el gas almacenado, no obteniendo flama alguna. Esto puede indicar que el porcentaje de metano en el biogás no fue suficiente para inflamarse. Por medio de los valores graficados se puede obtener una relación de producción de 5.23 mL de biogás/gDQO consumido. A este valor habrá que agregarle el 7% que se disuelve en el agua del gasómetro, por lo que en realidad se debe estimar alrededor de 5.59 mL/gDQO consumido.

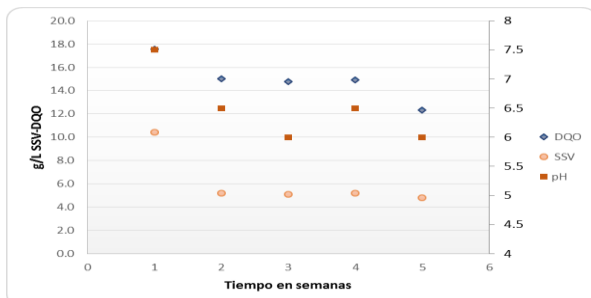


Figura 4. SSV, DQO pH de reactor montado inicialmente

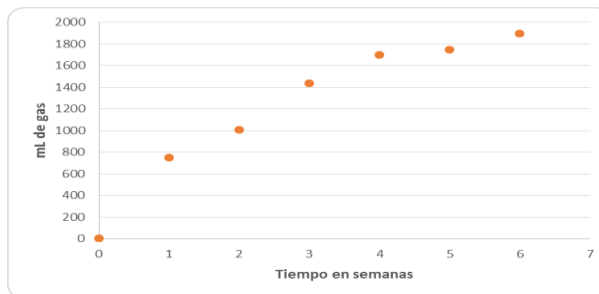


Figura 5. Evolución de gas generado

Posteriormente, se llevó a cabo el montaje de una segunda corrida pero con 10% de inóculo de estiércol, modificando la temperatura de operación. Es decir que el reactor se colocó en una



pecera con agua y se reguló su temperatura. Las nuevas condiciones iniciales del reactor inoculado con estiércol fueron las mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones de operación iniciales para el reactor inoculado y con temperatura controlada.

Color	pH	DQO	ST	SSV	T
Oscuro	8	3.16 g/L	9.2 g/L	4.40 g/L	14°C

Dado que la temperatura osciló entre los 26 y 30°C el pH se mantuvo en 8, y observando la producción de gas y el pH (Figuras 6 y 7), podemos deducir que se dieron las condiciones óptimas para la generación de biogás. En la Figura 6 se puede observar la DQO y los SSV, y en la Figura 7 el comportamiento del pH y la generación de biogás.

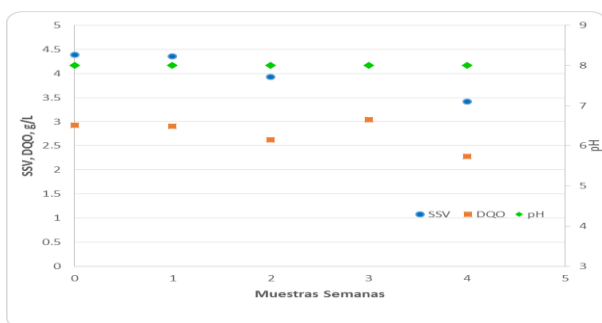


Figura 6. SSV, DQO pH de reactor inoculado

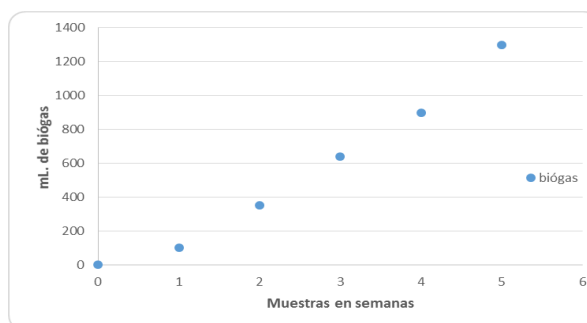


Figura 7. Evolución del Gas generado

Modificando la técnica propuesta por Urieta (2010), se realizó una prueba de dilución de gases utilizando una probeta de 250 mL, llena de una solución de KOH 1 N, para absorber el CO<sub>2</sub> del biogás, burbujeándolo por medio de un difusor de acuario, para obtener el menor tamaño de burbuja posible y por lo tanto mayor contacto con el líquido. Así, se inyectaron con jeringa cinco muestras de 20 ml de gas, obteniéndose un promedio de 16.5 mL de gas recuperado dentro de la probeta, para cada inyección. Esto conduce a suponer una gran concentración de metano y de otros gases producidos durante la digestión, que incluyen al H<sub>2</sub>S, nitrógeno, hidrógeno y algunos compuestos volátiles tales como los ácidos orgánicos no convertidos en biogás y que fueron mencionados en la parte teórica. De hecho, de acuerdo con valor del pH registrado a lo largo de toda la segunda digestión, se puede afirmar que el gas obtenido está compuesto mayoritariamente por CH<sub>4</sub>, basados en la prueba de ignición realizada adicionalmente a la absorción de gases.

Por otra parte, se obtuvo una producción de 0.034 L de biogás por gr de SSV por día, es un indicador favorable ya que Bureau (2003) obtuvo una producción de 0.038 L de biogas por gr de SSV por día.

#### 4. CONCLUSIONES

Se pudo probar que los lixiviados provenientes de la fracción orgánica de los RSM pueden digerirse anaeróbicamente produciendo biogás a tasas consistentes con resultados anteriormente obtenidos. El contenido de metano del gas obtenido es alto de acuerdo con la prueba de disolución de gases efectuada. De aquí se sugiere que para obtener buenos resultados se debe controlar la temperatura del digestor, lo cual implica la elaboración de balances de energía, de manera que se



pueda estimar la viabilidad económica de este tipo de procesos a escala industrial, sobre todo pensando en aplicarlo en rellenos sanitarios.

#### BIBLIOGRAFÍA

Álvarez - Contreras A., Suárez-Gelves J. (2006) Tratamiento biológico de lixiviados generados en un relleno sanitario "El guayabal" de la ciudad San José de Cucuita. Revista Ingeniería y desarrollo, Núm. 20, Julio\_ Diciembre 2006 pp 95 \_105 Universidad del Norte Colombia.

Secretaría de Servicios Parlamentarios

Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos

Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003

TEXTO VIGENTE

Última reforma publicada DOF 07-06-2013

Urieta-Aguado, F. (2010) Diseño y construcción de su sistema Orsat modificado para el análisis de biogás. Proyecto de fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid

Noeggerath-Franco, I. (2011) Análisis comparativo de tecnologías para el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios. Tesina para obtención de título. Universidad Veracruzana.

Bureau, M.(2003) Acoplamiento del compostaje a la producción de gas en invernadero. Reporte de estancia estudiantil de intercambio México-Francia. Instituto Tecnológico de Puebla.

Madigan, M. (2003) Brock, Biología de los microorganismos. Editorial Pearson Educación.