

## **Estudio del proceso de digestión anaerobio de los residuos orgánicos domésticos, como una alternativa de tratamiento para la generación de biogas y energía eléctrica.**

Pompeyo Quechulpa Pérez , Juan Francisco Pérez Robles\*.

CINVESTAV-Unidad Querétaro, Libramiento Norponiente No.2000 Frac. Real de Juriquilla Querétaro, Qro. C.P. 76230 Apdo. Postal 1-798 C.P. 76001.

Tel.: (01-442) 2 11 99 00, Fax: (01-442) 2 11 99 38, [jperez@qro.cinvestav.mx](mailto:jperez@qro.cinvestav.mx)

### **RESUMEN**

Los aspectos clave que la sociedad debe resolver para lograr un crecimiento sustentable son: la estabilidad familiar, alimentación, medio ambiente, energía, medios de comunicación y transporte. Considerando el punto energía y medio ambiente en esta investigación se estudio el proceso de digestión anaerobia para generar biogas a partir de basura orgánica domestica. El análisis y control fue a nivel laboratorio en tres reactores anaerobios tipo bach. Las variables analizadas fueron: tres diferentes cargas respecto al contenido de Agua y materia orgánica húmeda siendo estas 25%, 50% y 75%. Se estudio el tiempo de residencia hidráulica en base a la degradación de materia orgánica y a la generación de biogas, el contenido de sólidos totales y volátiles, materia orgánica, el potencial de hidrogeno y nitrógeno total Kjendahl antes, durante y al finalizar el proceso. Durante el proceso de biodigestion se estudio la generación volumétrica de biogas con la técnica de desplazamiento de fluidos usando una probeta invertida y se determino su composición con cromatografía de gases, durante un TRH de 72 días.

El biogás, aporta el 40% de la energía suministrada a una casa habitación de 5 personas por lo que puede ser usado directamente en la cocción de alimentos y como iluminación, ya que es un gas incoloro e inflamable compuesto aproximadamente por un 62% de gas metano principal componente del biogás, el cual le confiere las características de combustión; un 34% de dióxido de carbono, con pequeñas cantidades de otros gases, tales como nitrógeno, hidrógeno y ácido sulfhídrico.

## **1.- Introducción**

Uno de los usos de la biomasa, que se encuentra en los desechos domésticos, agropecuarios, agrícolas y agroindustriales es la producción de biogás, gas incoloro e inflamable compuesto aproximadamente por un 60% de  $\text{CH}_4$  principal componente del biogás el cual le confiere las características de combustión, un 36% de  $\text{CO}_2$ , con pequeñas cantidades de otros gases, tales como  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  y ácido sulfhídrico  $\text{H}_2\text{S}$ , la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada.

El gas se produce en un recipiente o tanque denominado biodigestor. En el interior del equipo se realiza la fermentación o digestión anaerobia de materia orgánica, la cual es un proceso biológico atractivo para la conversión de residuos domésticos, agrícolas, e industriales [1]; Esta transformación se lleva a cabo por la acción de bacterias en la mezcla, provocando la liberación de su energía química en tres etapas fundamentales: hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis para convertir las sustancias de naturaleza orgánica que son biodegradables [2], a productos intermedios para llegar fácilmente a la mezcla gaseosa llamada biogás, compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono. [3] en algunos casos puede ser sustituto de los combustibles comunes [4]. El uso del gas metano como fuente alterna de energía puede disminuir el uso de productos derivados del petróleo, productos forestales y agrícolas. Por otro lado el residuo que abandona al digestor puede ser utilizado como un abono orgánico con alto contenido en nitrógeno el cual necesitan las plantas para su crecimiento.

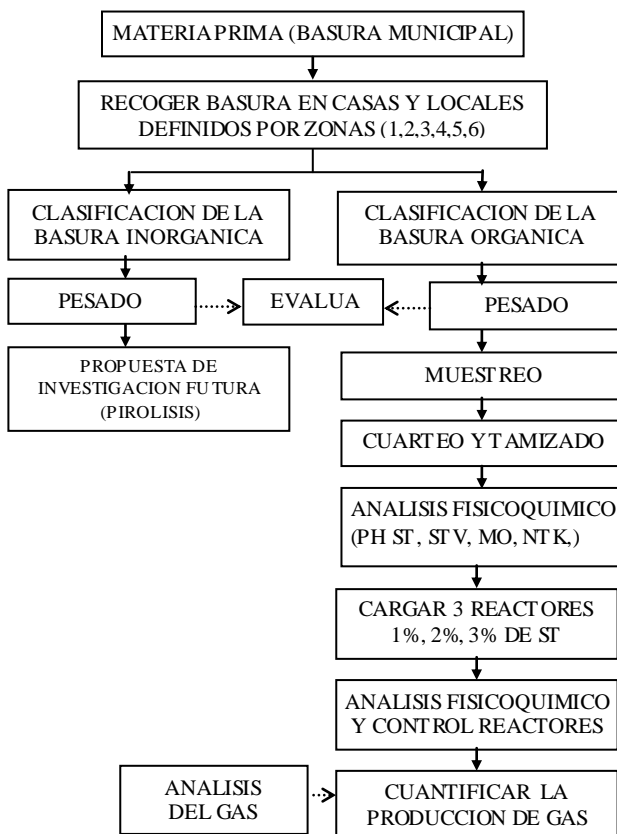
## **2.- Condiciones experimentales**

La metodología empleada se presenta en la figura 1 siguiendo los siguientes pasos.

1. Se presento una metodología que permita recolectar, clasificar, cuantificar y reciclar la basura orgánica e inorgánica de un municipio. Se identificaron y definieron 6 zonas de estudio zona centro con el numero 1, alta (2), baja (3), alrededores (4), montaña (5), y mercado municipal (6), para una muestra total de 30 casas y 4 locales del mercado. El estudio se realizo durante 3 meses analizándolas diariamente y así conocer el promedio de generación de basura y su comportamiento semanal, con la finalidad de dar la solución en primer lugar al problema de la contaminación y en segundo termino

conocer las características fisicoquímicas de la basura orgánica generada en la casa, la que se utilizara para montar tres reactores piloto tipo bach de 400 mL y generar el biogas. Ya clasificada la basura, la investigación se centro en estudiar el proceso de digestión anaerobio de la basura orgánica doméstica

2. Se acondicionaron los residuos orgánicos, obteniendo un substrato homogéneo con un contenido del 4% de sólidos totales como composición base para los reactores
3. Se determino la composición fisicoquímica de la materia orgánica en términos de pH, ST, STV, MO, NTK y densidad con las cuales se caracterizo el substrato de alimentación en los reactores.



**Figura 1. Metodología**

4. Se determinaron las condiciones de operación recomendables para el proceso de digestión anaerobio.

5. Por ultimo se montaron tres reactores a diferentes cargas respecto al contenido de Agua y MO siendo estas: 25%, 50% y 75% de MO.

Los parámetros se obtuvieron mediante las técnicas de los métodos estándar APHA [5], se estudio el TRH en base a la degradación de materia orgánica y a la generación de biogas, el contenido de ST, STV, MO, pH, NTK, antes, durante y al finalizar el proceso, además durante el proceso se estudio la generación volumétrica de

biogas con la técnica de desplazamiento de fluidos usando una probeta invertida y con el

uso de cromatografía de gases se analizo el biogas en términos de su composición CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, y N<sub>2</sub> durante un TRH de 72 días.

### 3.- Resultados y discusión

En la tabla 1 se muestra la generación de basura promedio de 3.03 kg de basura por cada 5.2 personas siendo igual a 582.699 g/persona de las cuales 2.625 kg es orgánica y 404.48 g es inorgánica generada por cada familia, siendo en mayor producción 1,116 g de desperdicio.

*Tabla 1. Basura promedio generada diariamente en una familia de 5.2 personas*

<b>Basura inorgánica</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Basura orgánica</b>	<b>Peso (g)</b>
Plástico rígido	81.568	Cartón o papel	367.195
Plástico película	148.682	Cáscaras	307.664
Metales ferrosos	31.142	Desperdicio	1020.513
Metales no ferrosos	56.837	Huesos	133.709
Vidrio	15.220	Madera	33.990
Hule	2.304	Cuero	0.955
Baterías	3.191	Tierra o polvo	488.982
Ropa, trapo y algodón	38.552		
Equipo electrónico	10.273		
Pinturas, colorantes	3.433		
Material de construcción	14.142		
<b>Total basura inorgánica</b>	<b>405.35</b>	<b>Total basura orgánica</b>	<b>2353.01</b>
<b>Basura total</b>			<b>2758.35</b>

La mayor generación de basura es de 3.3262 kg en los días domingos y de 3.101 kg en los jueves, siendo estos días de plaza, como lo muestra la tabla 2.

*Tabla 2. Basura promedio generada por semana de una familia de 5.2 personas*

<b>Basura</b>	<b>Domingo</b>	<b>Lunes</b>	<b>Martes</b>	<b>Miércoles</b>	<b>Jueves</b>	<b>Viernes</b>	<b>Sábado</b>
<b>Inorgánica (g)</b>	252.78	267.19	511.98	451.54	699.51	324.76	329.66
<b>Orgánica (g)</b>	2949.48	3707.63	2277.54	1752.19	2604.64	1479.00	1685.76
<b>Total (g)</b>	3202.26	3974.83	2789.52	2203.73	3304.14	1803.76	2015.43

Del total de basura generada por zona, se tomaron muestras de basura orgánica para caracterizarla, siendo el sustrato de alimentación a los reactores, los resultados obtenidos se

muestran en la tabla 3, los cuales son equivalentes a todas las muestras: como ejemplo un contenido de 32.2% de ST, 83.39% de MO, un pH ácido igual a 4.8 y un 35.2 % de NTK siendo un material orgánico extremadamente rico en N, el cual ayuda a la actividad metanogénica de las bacterias durante el proceso de digestión anaerobio de materia orgánica [6].

**Tabla 3. Análisis fisicoquímico de la materia orgánica por zona y mezcla determinados a la temperatura ambiente de 22°C.**

Variable	Zona de ubicación							Promedio de las seis zonas
	Centro 1	Alta 2	Baja 3	Alrededor 4	Montaña 5	Mercado 6	Mezcla	
% H (g/g)	65.23	71.54	77.05	62.02	52.38	78.59	65.31	<b>67.80</b>
% CN (g/g)	5.78	7.31	7.56	5.12	2.08	4.24	2.50	<b>5.35</b>
% ST (g/g)	34.77	28.46	22.95	37.98	47.62	21.41	34.69	<b>32.20</b>
% STV (g/g)	28.99	21.15	15.39	32.86	45.55	17.17	32.19	<b>26.85</b>
%MO (g/g)	83.39	74.30	67.04	86.51	95.64	80.20	92.80	<b>83.39</b>
PH	4.612	5.024	4.71	4.808	4.992	4.632	4.688	<b>4.80</b>
% NTK (g/kg ST)	13.91	41.80	39.19	10.22	9.75	96.30	29.90	<b>35.20</b>
% NTK Valoración	Mediamente rico en N	Extremadamente rico en N	Extremadamente rico en N	Medio en N	Medio en N	Extremadamente rico en N	Extremadamente rico en N	<b>Extremadamente rico en N</b>

En la tabla 4 se presenta entre los resultados encontrados y los de la investigación de Pérez y Vicencio [7].

**Tabla 4. Comparación entre dos investigaciones relacionadas con la temperatura y % de STV de materia orgánica**

Muestra	Pérez y Vicencio, (2002)		Esta investigación	
Basura orgánica municipal.	Temperatura °C	% STV m/m	Temperatura °C	% STV m/m
Promedio	24.3	38	24	32.19
Máximo	30.4	65	30	58.15
Mínimo	21.1	14	17	12.46

En la tabla 5 se presenta la comparación entre esta investigación y la investigación realizada por Delfín y Duran [8] en ambos resultados existe relación entre las composiciones de la basura respecto al pasto y la paja.

**Tabla 5. Comparación entre dos investigaciones relacionadas con el peso seco, cenizas, y nitrógeno de materia orgánica**

Investigación	Material	% Peso seco	% Cenizas	% Nitrógeno
<b>Delfín y Duran, (2003)</b>	<b>Algodón</b>	71.32 ± 0.05	3.68 ± 0.01	1.17 ± 0.03
	<b>Paja</b>	84.66 ± 0.40	3.20 ± 0.12	4.30 ± 0.07
	<b>Pasto</b>	89.27 ± 0.20	9.23 ± 0.16	14.43 ± 0.05
	<b>Piña</b>	25.91 ± 0.12	3.43 ± 0.04	4.94 ± 0.03
	<b>Café</b>	80.01 ± 0.06	8.10 ± 0.20	1.32 ± 0.06
	<b>Semilla var. Oscura</b>	38.94 ± 0.00	404.06 ± 0.15	3.04 ± 0.06
	<b>Semilla var. clara.</b>	31.77 ± 0.28	4.94 ± 0.12	2.11 ± 0.05
<b>Esta investigación</b>	<b>Basura orgánica</b>	32.554 ± 3.988	4.9417 ± 1.25	34.4383 ± 1.2

Una vez hecha la caracterización de la basura orgánica por zona y en mezcla se enfoco la caracterización en la mezcla de basura orgánica de las 6 zonas para tener una composición mas uniforme como lo muestra la tabla 6, con el contenido de sólidos totales igual a 13.4527% de ST, se determino la carga orgánica para los tres reactores tipo bach evaluado al 4% de ST. El proceso de digestión anaerobia se realizo en las siguientes condiciones iniciales: Para el reactor a 1% de ST se tiene una carga orgánica de 53.81 g de ST en un

contenido de 300 ml de agua, con una densidad de 0.9632 g/mL. Para el reactor a 2% de ST se tiene una carga de 107.62 g de ST en un contenido de 200 ml de agua, con una densidad de 0.945 g/mL. Para el reactor a 3% de ST una carga de 161.43 g de ST de la MO en un contenido de 100 ml de agua, con una densidad de 0.9311 g/mL

**Tabla 6. Análisis fisicoquímico de las zonas**

Variable	Mezcla
<b>% H ( g/g )</b>	86.5473
<b>%CN ( g/g )</b>	0.9902
<b>% ST ( g/g )</b>	13.4527
<b>% STV ( g/g )</b>	12.4625
<b>% MO ( g/g )</b>	92.6394
<b>PH</b>	4.24
<b>%NTK (g/kgST)</b>	4.8575
<b>Valoración</b>	Pobre en N

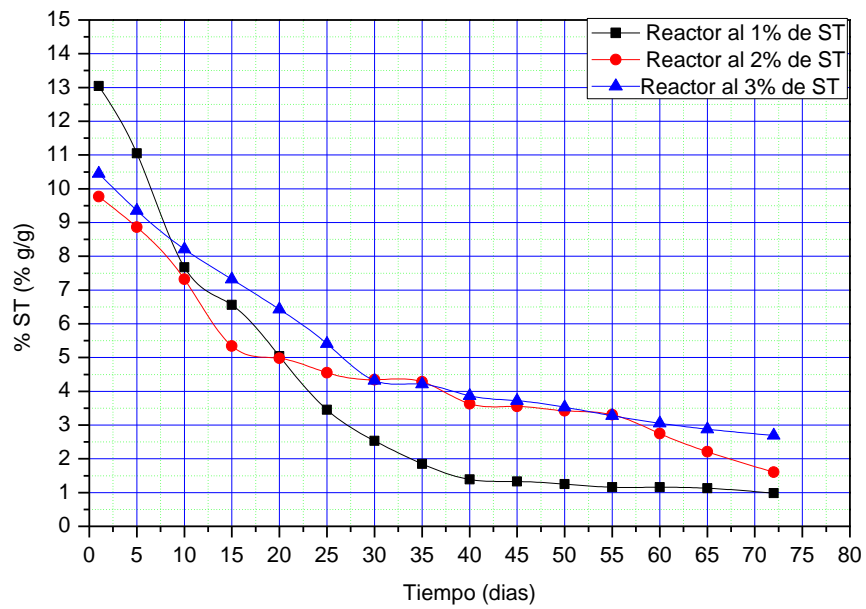
Existen algunos factores a considerar para una digestión óptima, tienen que estar presentes todos los elementos esenciales en forma fácil de asimilar por las bacterias. Se han logrado resultados satisfactorios con concentraciones mayores a 15% de sólidos, sin embargo en la práctica la gama es de 3 a 10% [9]. Otro factor importante es el pH el cual determina la producción total de biogás y la composición del metano. Debajo de un pH de 6 el proceso se llevaría a cabo de forma ácida la cual inhibe la actividad de las bacterias metanogénicas. Por debajo de pH entre 4.5 a 5.0, la inhibición afecta a las bacterias fermentativas y lo mismo ocurre si en el proceso el pH se encuentra por encima de 8 a 8.5. La mezcla de cada reactor usada al iniciar el proceso tuvo un pH ácido, por lo tanto a la mezcla se le agrego una solución de bicarbonato de sodio al 10N para estabilizar el proceso. Se agregaron 10.5 mL de solución para elevar el pH de 5.78 a 7.82 en la mezcla a 1% de ST.

***Tabla7. Composición fisicoquímica de las mezclas al iniciar el proceso de digestión anaerobio***

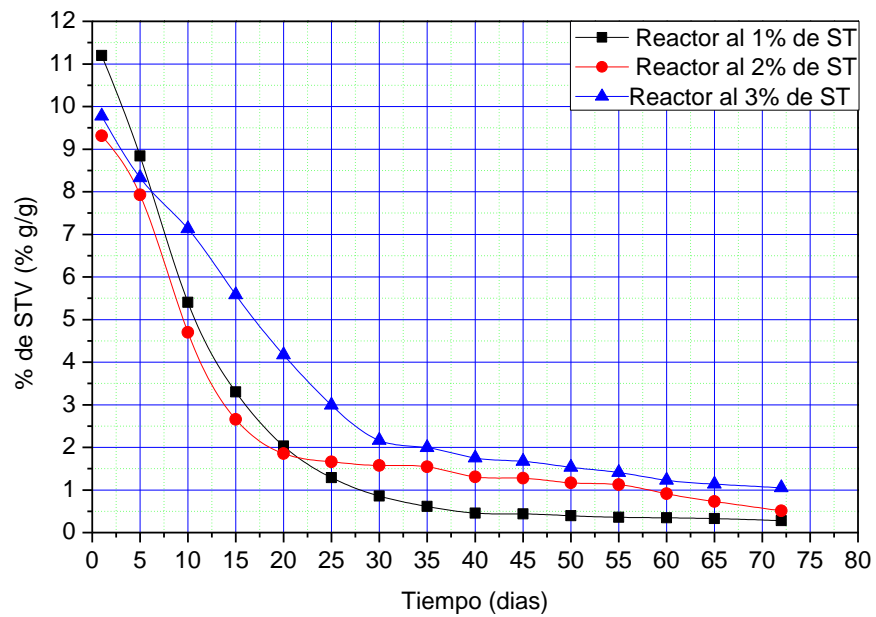
<b>Variable</b>	<b>Mezcla al 1% de ST</b>	<b>Mezcla al 2% de ST</b>	<b>Mezcla al 3% de ST</b>
<b>%H (g/g)</b>	86.96	90.23	89.55
<b>% ST (g/g)</b>	13.0352	9.7713	10.4497
<b>%CN (g/g )</b>	1.84	0.46	0.67
<b>% STV (g/g)</b>	11.1916	9.3140	9.7752
<b>PH</b>	6.82	6.85	6.84
<b>%NTK (g/kgST)</b>	10.7321	3.1464	4.4396
<b>Valoración</b>	Medio en N	Pobre en N	Pobre en N

32.5 mL de solución para elevar el pH de 4.82 a 6.85 en la mezcla a 2% de ST y por ultimo 49 mL de solución para elevar el pH de 4.94 a 6.84 en la mezcla a 3% de ST. En la tabla 7 se presenta la composición fisicoquímica al iniciar el proceso de digestión.

En la figura 2, 3 y 4 se observa claramente una disminución del contenido de ST, STV y un porcentaje de remoción de MO muy elevada en los primeros 20 días, lo que indica que en este tiempo se genero mayor cantidad de biogás y las bacterias metano génicas consumieron los nutrientes presentes en cada composición, después del día 20 la remoción fue muy lenta y por consiguiente la producción de biogás fue menor porque el contenido de nutrientes en la mezcla se estaba agotando y las bacterias metano génicas no tenían suficiente sustrato para degradar, como se indica en la figura 4 .

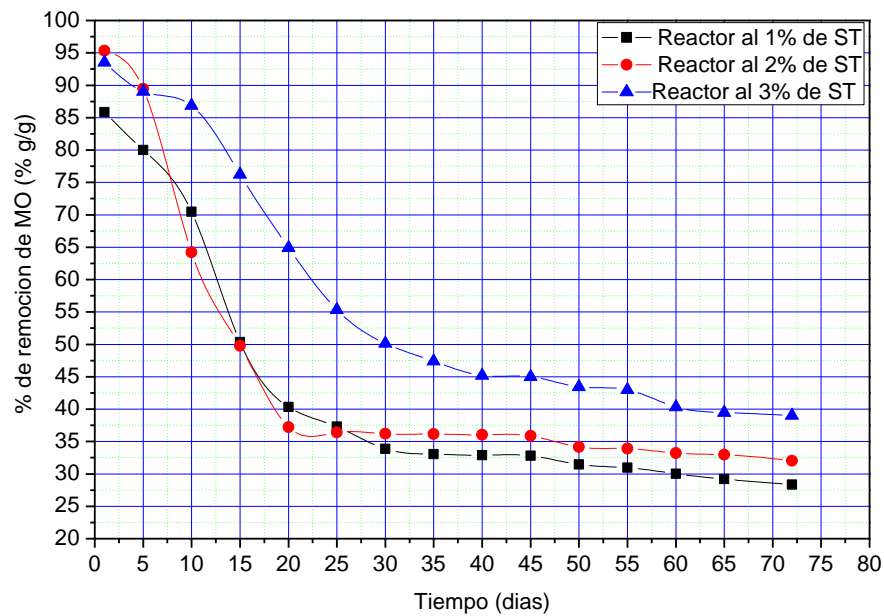


**Figura 2. Porcentaje de Sólidos Totales en el proceso de digestión anaerobio**



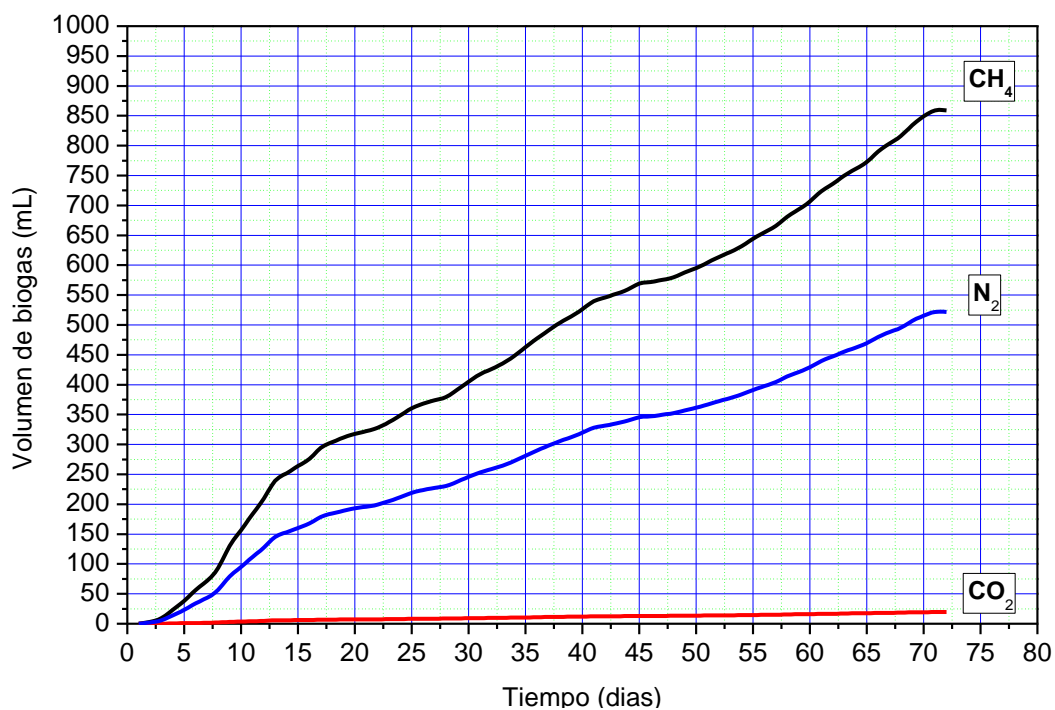
**Figura 3. Porcentaje de Sólidos Totales Volátiles en el proceso de digestión anaerobio**



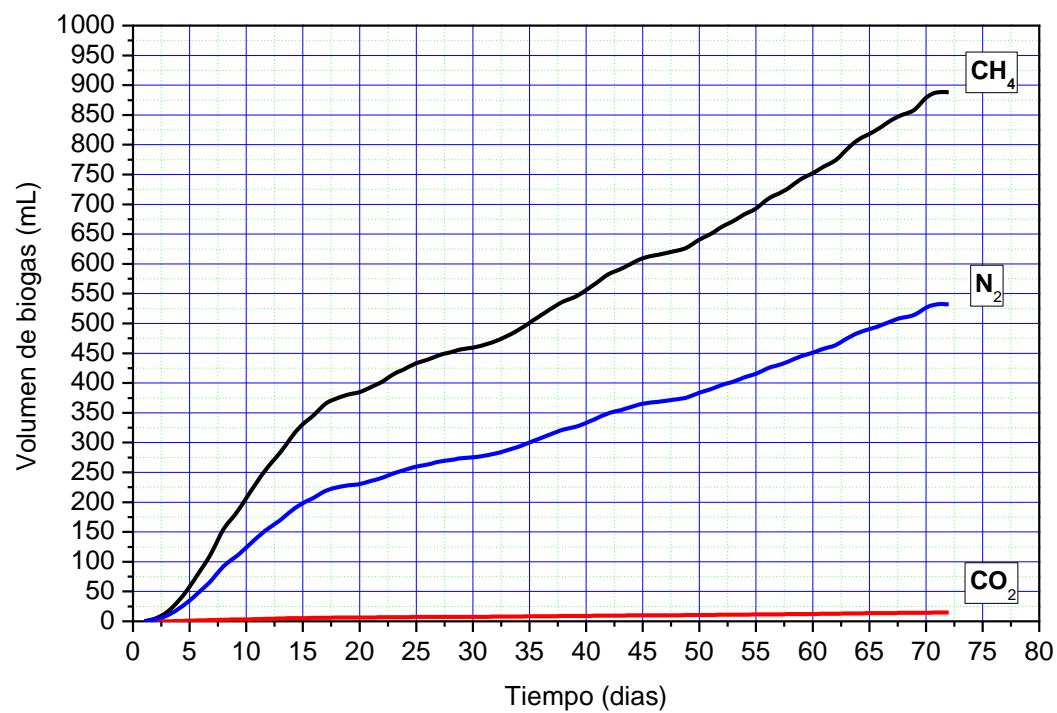


***Figura 4. Porcentaje de remoción de Materia Orgánica en el proceso de digestión anaerobio***

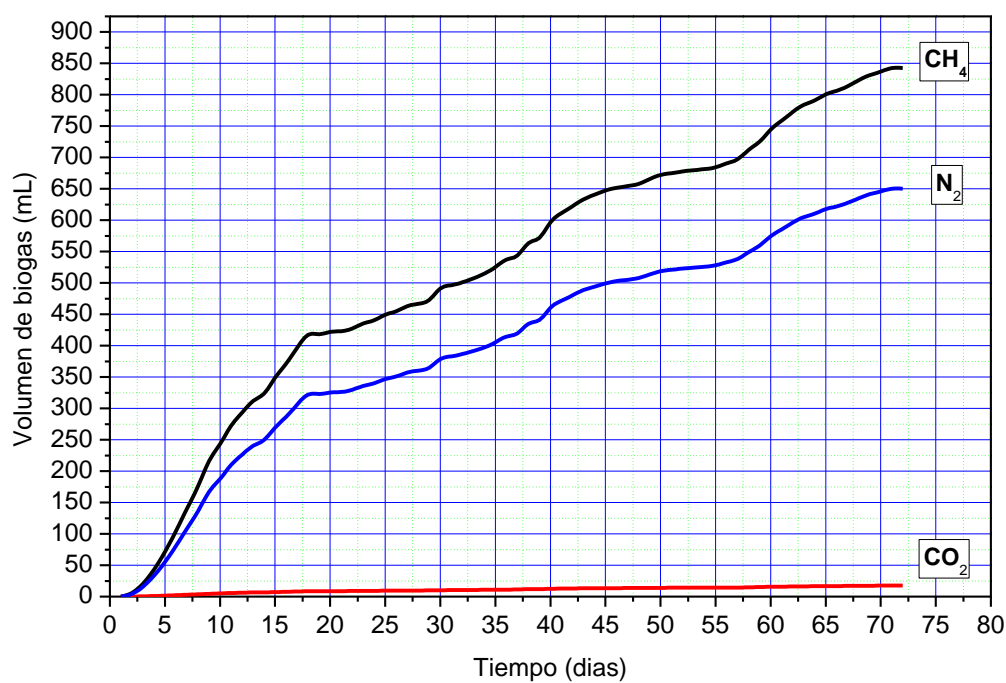
Los estudios de generación de biogas para cada reactor se muestran en la figura 5, 6 y 7, en el reactor a 1 y 2% de ST se da un mayor rendimiento en la producción de gas metano y por consiguiente una mayor remoción de MO, además de que cumplen la norma, NOM-052-SEMARNAT-1993 [10] la cual indica una remoción del 38 % de MO en el proceso de tratamiento y disposición de materia orgánica hacia el ambiente.



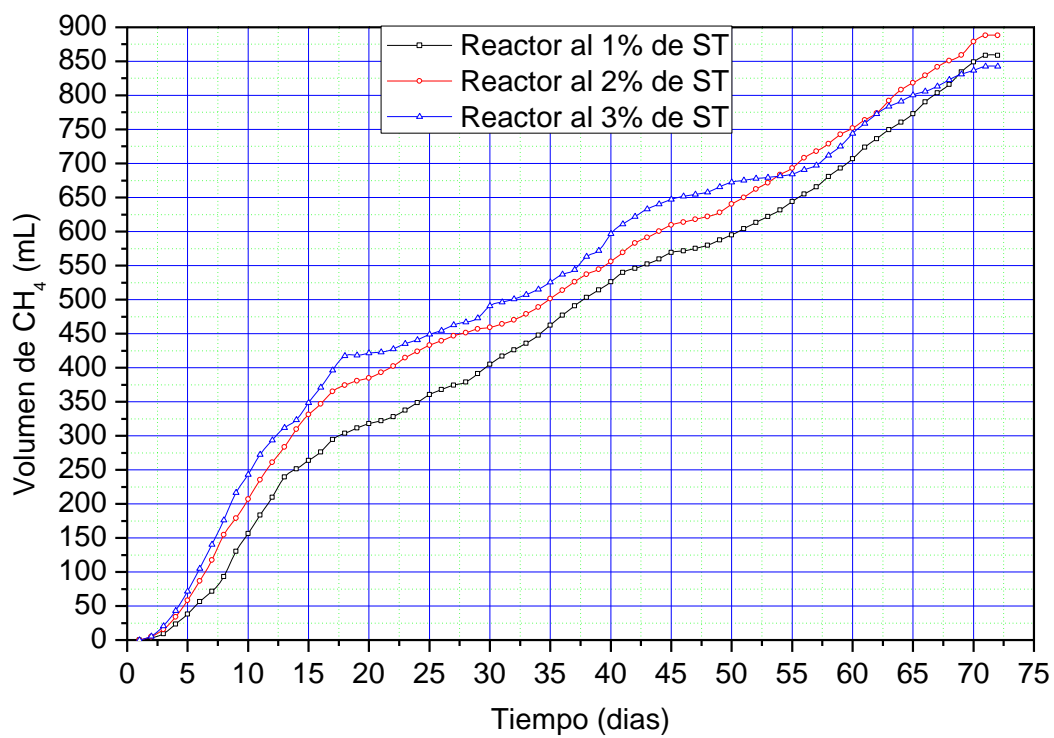
**Figura 5. Volumen de acumulación de biogas en el reactor a 1% de ST**



**Figura 6. Volumen de acumulación de biogas en el reactor a 2% de ST**

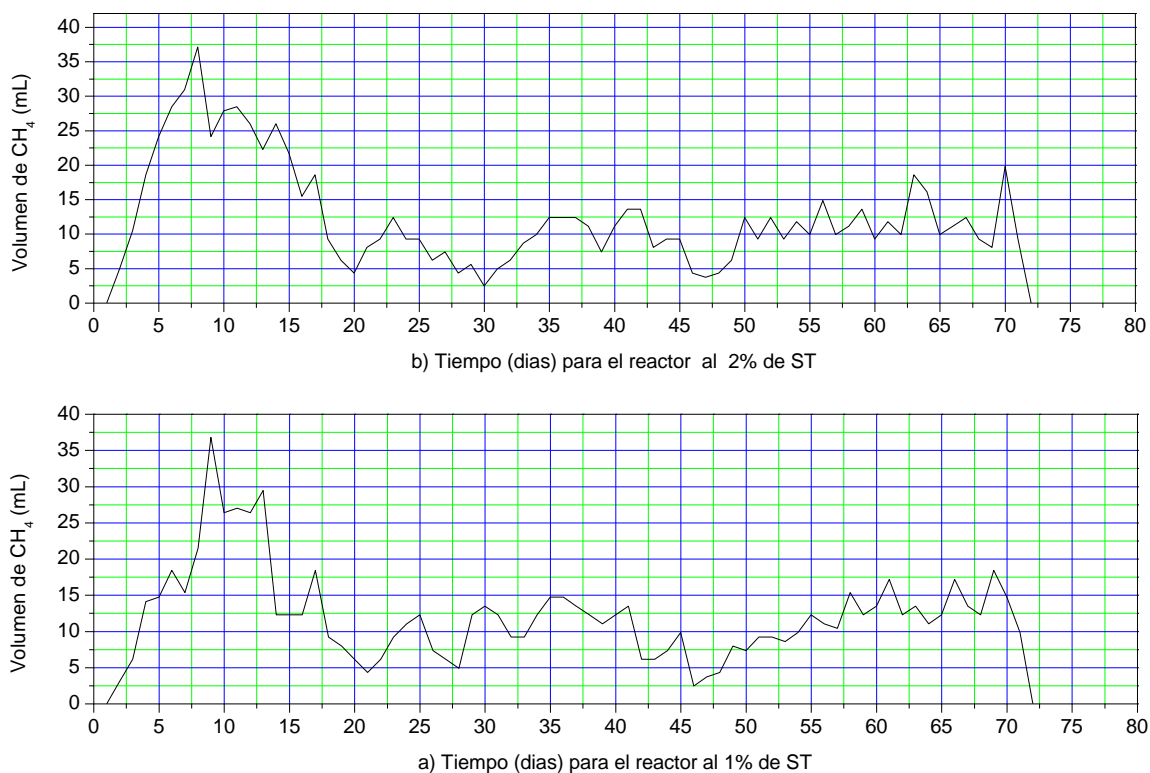


**Figura 7. Volumen de acumulación de biogas en el reactor a 3% de ST**



**Figura 7. Volumen de acumulación de gas en los tres reactores**

En la figura 8a se muestra la generación de gas metano para el reactor a 1% de ST, en el día 9 se genera la mayor cantidad de gas metano y disminuye progresivamente hasta el día 20 a partir del cual se observa una producción irregular. Siendo el reactor que muestra la mayor cantidad de gas durante un tiempo de 21 días.



**Figura 8. Volumen de gas  $\text{CH}_4$  generado por día en el reactor a 1 y 2% de ST**

En la tabla 8 se presenta la composición del biogas, con un promedio de 59.68% de  $\text{CH}_4$ , muy similar a la investigación de Malina quien obtuvo entre el 60%-75% de  $\text{CH}_4$  [11].

**Tabla 8. Porcentaje de composición promedio del biogás**

Biogás		Reactores			Promedio
Nombre	Variable	1% de ST	2% de ST	3% de ST	
Metano	% $\text{CH}_4$	61.35	61.89	55.79	59.68
Dióxido de carbono	% $\text{CO}_2$	1.40	1.02	1.16	1.19
Nitrógeno molecular	% $\text{N}_2$	37.26	37.09	43.05	39.13
Total		100.00	100.00	100.00	100.00

#### 4.- Conclusiones

Para mejorar el proceso de digestión anaerobio, se tienen dos consideraciones, la primera: del total de la basura considerada como orgánica, usar la que fácilmente pueda ser degradada por las bacterias como 0.3672 g de cartón o papel, 0.3076 g de cáscaras, 1.0205 de desperdicio de cocina y 0.03399 kg de madera desperdiciada, dando un total de 1.7292 kg de basura efectiva. La segunda consideración es mantener un pH entre 6.8 y 7.2 en la mezcla del reactor, esto se logra agregando una cantidad de bicarbonato de sodio para elevar el pH cada vez que el pH baje. Con el resto de la basura tanto orgánica como inorgánica, reciclarla. A nivel investigación buscarle alguna aplicación.

Los reactores a 1 y 2% de ST, son los que dan un mejor resultado con un rendimiento de 85.5326 mL de CH<sub>4</sub>/Kg de ST y 34.7792 mL de CH<sub>4</sub>/Kg de ST respectivamente.

Para el reactor a 1% de ST el cual representa, una carga de 0.1793 g de ST en 1 mL de agua, la cual genera 322.07 mL de CH<sub>4</sub> en un tiempo de 21 días, y si esta carga se extrapola para un reactor piloto de 200 L con un 85% en volumen efectivo para la mezcla agua y materia orgánica, generaría 2.607 L diarios de gas metano, para una carga de 30.481 kg de basura orgánica para todo el proceso hasta cumplir los 21 días en donde el sistema se convertiría en continuo. Esta extrapolación sería una alternativa a investigar, que es lo que actualmente se está realizando.

## **5.- Agradecimientos**

Los autores externan su gratitud al CONACYT por el apoyo financiero otorgado para el desarrollo de esta investigación a través del proyecto **P43984-Q**.

## **6.- Referencias**

- [1] Gupta N., Gupta S.K., Ramachandran K.B. *Modelling and simulation of anerobic stratified biofilm for methane production and prediction of multiple steady states*, Bioresource Technology, 65, (1997).
- [2] Rajbhandari S.K. Annachhatre A. P. *Anaerobic ponds treatment of starch wastewater: case study in Thailand*, Biorosource Tecnholog, In press, 25, (2004).

- [3] Winkler M. *Tratamiento biológico de aguas de desecho*, 4ª. Ed., Limusa, México D.F. (1995).
- [4] Murphy J.D., McKeogh E., Kiely G. *Technica Veconomiclenvironmental analysis of biogas utilization*, Applied Energy, 77, 407-427, (2004).
- [5] APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*, 20<sup>th</sup> Edition, Washington, D.C, (1995),
- [6] Guirovich, M. J. *Biosolids Treatment and Management*, Ed Marcel Decker, Inc. Cap. 7 . N. Y., E.U.A., 79 – 85, (1996).
- [7] Pérez L. M. E., Vicencio de la R. M. G. *Influencia del basurero municipal en la calidad del agua de acuífero de la ciudad de Durango, México*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 18 (003): 2 – 7, (2002).
- [8] Delfín, A. I., Duran de B. C. *Biodegradación de residuos urbanos lignocelulosicos por pleurotas*, Revista Internacional de Contaminación Ambienta, UNAM, Mexico, 19(001), 37 – 45:41, (2003).
- [9] Van Buren A. A Chinese *Biogas Manual*. Intermediate Technology Publications, London, (1979).
- [10] INE (Instituto Nacional de Ecología. Norma Oficial Mexicana), NOM – 052 – SEMARNAT – 1993 hasta la NOM – 060 – SEMARNAT – 1993, Diario Oficial de la Federación, México (22 de octubre), (1993).
- [11] Malina, F. J. *Variables Affecting Anaerobic Digestión*, Public Works, 25(8): 113 – 116, (1993).