



## **Co-digestión anaerobia de lodos residuales y estiércol porcino para mejorar la producción de biogás.**

Jorge Emmanuel Dominguez-Villanueva<sup>1</sup>, Félix Alonso Alcázar-Medina<sup>1</sup>, María Dolores Josefina-Rodríguez Rosales<sup>1</sup>, Luis Armando de la Peña-Arellano<sup>1</sup>, Roberto Valencia-Vázquez<sup>1,2,\*</sup>.

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/I.T. Durango, Blvd. Felipe Pescador 1830 ote., Col. Nueva Vizcaya, Durango, Durango, México.

<sup>2</sup>CONACYT-TECNM / Instituto Tecnológico de Durango. Blvd. Felipe Pescador 1830 ote., Col. Nueva Vizcaya, Durango, Durango, México.

\* Autor de correspondencia: Dr. Roberto Valencia Vázquez, [roberto.valenciav@gmail.com](mailto:roberto.valenciav@gmail.com),  
[rvalenciava@conacyt.mx](mailto:rvalenciava@conacyt.mx).

Recibido 15 de agosto de 2020; aceptado 28 de septiembre de 2020

### **RESUMEN.**

La necesidad de satisfacer los requerimientos de comodidad de la civilización humana ha provocado un aumento escalonado en la contaminación mundial. Las plantas tratadoras de aguas residuales (PTARs) que usan la metodología de lodos activados, generan una gran cantidad de lodos activados gastados al día, haciendo de su manejo una de las operaciones más costosas del proceso. Estos lodos tienen que ser tratados adecuadamente antes de salir de la PTAR; estos lodos aún contienen materia orgánica que puede ser aprovechada mediante la digestión anaeróbica para la generación de biogás y consecuentemente en energía eléctrica. Sin embargo, el contenido de materia orgánica en estos lodos es bajo, por lo que se recomienda adicionar otro sustrato (Co-Digestión) que cubra las deficiencias, causando

una sinergia del proceso. Por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar la co-digestión de lodos residuales, usando como co-substrato estiércol porcino como una alternativa para elevar las productividades de biogás y metano de los lodos generados por la PTAR. Un beneficio adicional es que el digestato puede ser considerado como un material estabilizado con las características de un bioabono. Se realizaron análisis del potencial bioquímico de metano (BMP) durante un periodo de 45 días para evaluar las proporciones de las mezclas de lodos residuales y estiércol porcino (90:10, 70:30 y 50:50) por triplicado. Los resultados indicaron que la mezcla 70:30 fue la que presentó una mayor producción de biogás (300 mL de biogás/ g de SV destruido) así como la mayor productividad de metano (150 mL de metano/ g de SV destruido). Con una producción diaria de 1000 m<sup>3</sup> de lodos, la co-digestión anaeróbica de lodos para generar energía se convierte en una metodología que tendría un aporte económico para la PTAR disminuyendo los gastos en el consumo eléctrico y generando un bioabono al que se le podría dar un valor de venta.

**PALABRAS CLAVE:** Co-digestión, Potencial Bioquímico de Metano (BMP), PTARs, Lodos Activados, Estiércol Porcino.

### **ABSTRACT.**

The need of satisfy the comfort requirements of the human civilization has triggered a staggered increase in the global pollution. Wastewater treatment plants (WWTPs) that use the activated sludge method generate large amounts of wasted activated sludge; increasing the management costs of the entire operation. These sludges need to be treated adequately before the WWTP discharge them; these sludges still contain organic matter that can be converted throughout the anaerobic digestion method in biogas and subsequently in electrical energy. However, organic matter content of these sludges is low; therefore, it is recommended to add another substrate (Co-Digestion) that cover substrate deficiencies, causing a process synergy. Therefore, the main objective of this research is to evaluate the co-digestion of the sludge, adding pig manure as co-substrate, as an alternative to increase biogas and methane yields generated of the WWTP wasted activated sludges. An additional benefit is that the digestate can be considered as a

stabilized material with the characteristics of a bio-fertilizer. Biochemical Methane Potential (BMP) analyses were performed during 45 days to evaluate mixtures of wasted activated sludges and pig manure (90:10, 70:30, and 50:50) by triplicate. Results indicated that the mixture 70:30 (wasted activated sludge: pig manure) was the one with highest biogas and methane productivity, 300 mL de biogas/ g SV<sub>destroyed</sub> and 150 mL de methane/ g SV<sub>destroyed</sub>, respectively. With a daily production of 1000 m<sup>3</sup> of wasted activated sludge, the anaerobic co-digestion of this sludge could generate sufficient energy to cover the entire WWTP operation, reducing the costs of electricity consumption and generating a bio-fertilizer as a by-product with adding value.

**KEYWORDS:** Co-digestion, Biochemical Methane Potential (BMP), WWTP, Activated sludge, Pig Manure.

## INTRODUCCIÓN.

El acelerado crecimiento demográfico, la continua industrialización, urbanización y el uso de motores de todo tipo han inducido al incremento de necesidades energéticas; las cuales satisfacen los requerimientos de comodidad y civilización del ser humano, provocando un aumento escalonado a la contaminación ambiental al contribuir en la generación de residuos (Campos Pozuledo, 2001). Ante las altas demandas energéticas (fuente de calor, electricidad o combustible para sistemas de transporte) y la excesiva generación de residuos orgánicos, se ha difundido el proceso de la digestión anaeróbica como una metodología que permite el tratamiento de los residuos para la producción de biogás y su aprovechamiento en forma de energía.

El proceso de la digestión anaeróbica cubre tres necesidades básicas: 1) mejoramiento de las condiciones sanitarias mediante el control de residuos; 2) generar energías renovables para las actividades domésticas y/o industriales; 3) suministrar materiales estabilizados (bioabono) como un fertilizante orgánico para los cultivos; y en algunos países desarrollados

aplica también como un aporte económico a la sociedad y al gobierno (Martinez Arce, 2013).

Weber et al. (2012) menciona que existen varias clasificaciones para los residuos, siendo una de ellas según su origen; diferenciando si son procedentes del sector primario (residuos agrícolas, ganaderos y forestales), del sector secundario (residuos industriales) y finalmente del sector terciario (residuos sólidos urbanos y lodos de estaciones de depuración de aguas residuales). Los lodos generados por las plantas tratadoras de aguas residuales (PTARs) son de gran interés ambiental debido a los grandes volúmenes en los que son producidos. Bermudez Saturnino (2016) menciona que los lodos no son inofensivos al medio ambiente ya que poseen cantidades de materia orgánica (sólidos volátiles) que, aunque es baja deben ser sometidos a otro tratamiento para poder ser estabilizados antes de ser dispuestos de manera definitiva.

Reportes de la planta tratadora de aguas residuales sur del municipio de Durango, Durango, México indican una producción de 1000 m<sup>3</sup> diarios de lodos activados, los cuales tienen que ser tratados para su disposición definitiva. Es por eso que el objetivo de este trabajo de

investigación es evaluar el potencial bioquímico de metano (BMP) de la co-digestión de lodos residuales y un co-sustrato (estiércol porcino) que ayude a llevar una digestión anaeróbica de manera eficiente y rentable. Aportando así un tratamiento a los lodos residuales que pudiera generar un beneficio económico para la planta, disminuyendo sus gastos por consumo eléctrico y generando un biofertilizante el cual podría generar un aporte económico extra.

### **METODOLOGÍA.**

La capacidad de producir biogás de los sustratos ya sea de manera independientes, así como sus mezclas en distintas relaciones se evaluó mediante dos ensayos de BMP cuyos constituyentes fueron: reactor (batch), sistema de desplazamiento de líquido, sustratos y medio enriquecido.

Debido a la alta generación que se tiene de lodos residuales es considerado como el sustrato principal en el proceso de la co-digestión anaeróbica. Las muestras de lodos residuales se recolectaron del sistema de recirculación de lodos (lodos activados) y del tanque de digestión de lodos (lodos floculados) de la planta tratadora de aguas residuales (PTAR), unidad sur, del municipio de Durango.

Para la obtención de los residuos de estiércol porcino, se muestrearon y recolectaron los residuos en una granja porcícola de la ciudad de Durango. Los residuos provenían del proceso de lavado de los corrales de manejo; el cual es una mezcla de excretas sólidas, líquidas (orina) y agua de lavado. El ganado porcino en los corrales de engorda es un ganado de raza Yorkshire Americano, de un peso promedio de 100 kg por animal. Todas las muestras fueron colectadas fueron recolectada de una fosa séptica de dimensiones de 30 m de largo, 1 m de ancho y 1.5 m de altura; la fosa tiene un volumen de operación de 30m<sup>3</sup> de capacidad. Las muestras fueron recolectadas en recipientes de plástico comercial de 10 L de capacidad con tapas roscables, puestos en hielo y transportados al laboratorio para su posterior análisis. Una vez en el laboratorio, las muestras fueron mantenidas en un cuarto frío a -4°C, estas prácticas se realizaron según el manual de las pruebas de diagnóstico y de las vacunas para los animales terrestres (mamíferos, aves y abejas) 2016.

Para cada uno de los experimentos de BMP se tomó muestra fresca de la fosa séptica, presentando variaciones en la cantidad de sólidos totales y sólidos volátiles, pero con valores muy similares entre sí de los

parámetros de potencial oxido reducción (ORP) y pH. Las tres mezclas para las pruebas de BMP fueron elaboradas en relación volumen-volumen 50:50, 70:30, 90:10, en un volumen de 400 mL, manteniendo siempre al lodo residual como sustrato principal y por tanto, él que presentaba en mayor proporción en la mezcla.

Holliger et al. (2016), establece que para que un ensayo de BMP sea válido se debe:

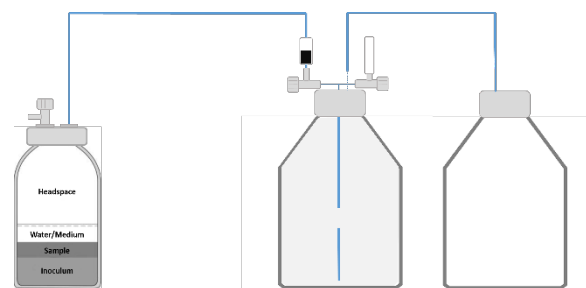
- Todas las pruebas deberán ser al menos por triplicado.
- Además de las mezclas se deberán montar los blancos de los sustratos de manera independiente.
- El BMP se debe expresar como el volumen de gas metano seco a condiciones estándar (273.15 K y 101.33 kPa) por masa de solidos volátiles.

Ambos ensayos de BMP se llevaron a cabo en una temperatura mesofílica (37°C) y se buscó controlar el pH inicial a un valor de 7.0. Gracias a que los sustratos tenían valores de pH cercanos a la neutralidad, las mezclas por si solos presentaron un pH de 7.0.

En la Figura 1 se muestran los reactores y el sistema de desplazamiento usados, los cuales son descritos por Galván-Arzola (2018); los cuales, son reactores de cristal transparente (frascos para envasado

comerciales) de 500 mililitros con tapa metálica y sello plástico adherido a la misma como mecanismo hermético.

El sistema de desplazamiento de líquido para la medición de volumen de biogás producido estuvo constituido por dos recipientes comerciales de poliuretano transparente de alta densidad de un litro. El primero, hermético, con la función de contener el agua acidificada a pH<2 (para evitar la disolución del CO<sub>2</sub> del biogás en el agua) y, el segundo, con la función de almacenar el agua acidificada desplazada para su cuantificación.



Fuente: Galván-Arzola, 2018

Figura 1 Sistema completo empleado en los ensayos de potencial bioquímico de metano

El volumen del biogás generado fue cuantificado cada dos días por desplazamiento de líquido desplazado, usando los dos contenedores plásticos transparentes: uno hermético para contener el líquido y otro para contener el líquido desplazado (1 L) tal y como se encuentra explícitamente en la Figura 1. El líquido desplazado se

cuantifico usando probetas graduadas de 20, 100 y 500 ml marca Pyrex.

La concentración de metano, dióxido de carbono, y oxígeno en el biogás de cada reactor fue determinada cada dos días usando un analizador portátil de biogás (marca Landtec, modelo Biogas-Check5000) mediante las conexiones y el sistema de muestreo a base de mangueras de alta presión conectadas a un filtro unidireccional de agua de 0.20 µm Midisart 2000 y un filtro químico empacado (carbón activado) para retener humedad.

El diseño de los reactores empleados para las pruebas de BMP, en modo batch, no permite la toma de muestras durante el proceso, sólo permite la toma de muestras en la entrada y la salida del proceso, por lo que solo se midió de manera constante la cantidad y la calidad del biogás producido. En la Tabla 1 se muestran los análisis o determinaciones realizadas durante la experimentación.

Tabla 1 Análisis o Determinaciones realizadas

Determinación o Análisis	BMP
Sólidos Totales	I/F
Sólidos Volátiles Totales	I/F
Volumen de biogás	C

Calidad (análisis de proporciones) del biogás (CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S)	C
Potencial óxido-reducción (ORP)	I/F
pH	I/F
Alcalinidad Total	N/A
Alcalinidad Parcial	N/A

Nota: C: continuo; I: inicial; F: final; N/A: no se realizó.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### Ensayo 1 de BMP.

El primer ensayo BMP fue realizado con lodos residuales de recirculación, los cuales contenían una baja cantidad de materia orgánica (ST 6150 mg / L y 4350 mg / L de SV). Estos fueron mezclados con un estiércol porcino, recolectados de la fosa séptica y contenían una cantidad de materia orgánica de 128680 mg / L de ST y 95270 mg / L de SV. Es importante mencionar que el estiércol porcino se recolectaba en estado líquido, debido a que estos provienen del proceso de lavado de los corrales; donde se usa agua para poder limpiar las excretas solidas (heces) y liquidas (orina) de los animales.

En la Tabla 2 se muestran los valores de entrada de ST, SV y pH para los sustratos y las mezclas del ensayo 1 de BMP. Donde se puede observar una de las ventajas de la co-digestión anaeróbica descritas por Campos Pozuledo (2001), que consiste mejorar las cualidades

de un sustrato y poder enriquecer la cantidad de materia orgánica del sustrato principal (lodos residuales).

Tabla 2 Valores de entrada ensayo 1 BMP

Ensayo	Sólidos Totales mg/L	Sólidos Volátiles mg/L	pH
Blanco estiércol de cerdo	128680	95270	7.3
Mezcla 50:50	49593	37893	7.2
Mezcla 70:30	30226	22933	7.2
Mezcla 90:10	18090	13436	7.1
Blanco Lodos	6150	4350	6.8

En la Tabla 3 se pueden observar los valores de salida del ensayo 1 de BMP. Donde se puede observar una reducción de materia orgánica, esto debido al proceso de la co-digestión.

En la Figura 1 se muestran las producciones de biogás del ensayo 1 de BMP, donde se muestra que la mayor producción de biogás en mL a los 45 días fue dada por la mezcla 70:30. Según J. Jiménez et al (2015) la producción de biogás y de metano se ve favorecida en una co-digestión en comparación con una mono-digestión, esto se puede comprobar tanto en la Figura 2 (producción de biogás) como en la Figura 3 (producción de metano), donde se puede observar que

las producciones de biogás y metano son superiores en la co-digestión de las mezclas, a comparación de la digestión de los sustratos de forma independiente.

Tabla 3 Valores de salida del ensayo 1 de BMP

Ensayo	Sólidos totales mg/L	Sólidos volátiles mg/L	pH
Blanco estiércol de cerdo	86750	66720	7.6
Mezcla 50:50	33723	24563	7.15
Mezcla 70:30	18710	13163	7.15
Mezcla 90:10	8060	5163	7.0
Blanco lodos	4050	2010	6.9

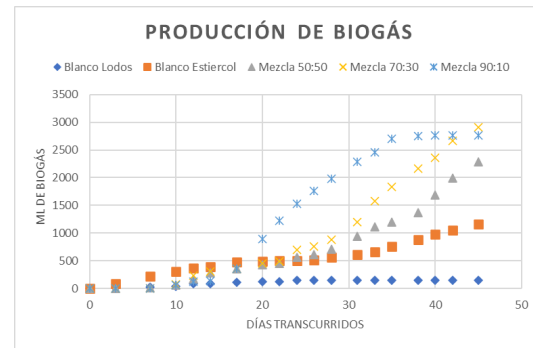


Figura 2 Producción de Biogás del ensayo 1 del BMP.



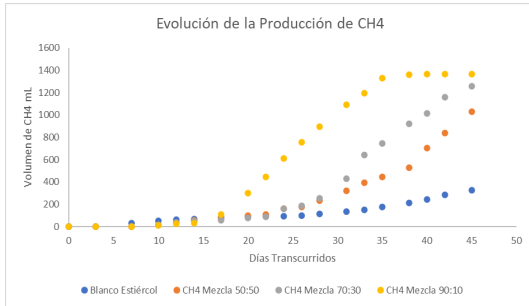


Figura 3 Evolución de la Producción de metano en el ensayo 1 de BMP.

En la Tabla 4 se observan las producciones y rendimientos obtenidos del ensayo 1 de BMP. Donde se puede apreciar que la mezcla 70:30 fue la que mejor producción y rendimiento dio. Los resultados obtenidos por Xinyuan Liu et al (2018), de una co-digestión de lodos y estiércol, con una concentración de SV del 4% obtuvo una producción de metano de 120.0 L/ Kg-ST; dejando a nuestras mezclas 90:10 y 70:30 por encima de sus valores.

Dentro de las determinaciones de calidad del biogás producido, se realizó la medición de las PPM de H<sub>2</sub>S; donde la mayor cantidad de H<sub>2</sub>S de presente en el blanco de estiércol y la menor cantidad fue por el blanco de lodos. En la Figura 4 se muestran las producciones de H<sub>2</sub>S y se observa que a una mayor cantidad de estiércol porcino se tiene una mayor cantidad del H<sub>2</sub>S. Peu (2012), describe que el azufre ingerido por la dieta del porcino se elimina en un 55% por la orina y 20% por las heces, siendo los sulfatos el

90% de la forma de excreción del azufre. Estos elementos azufrados son usados como aceptor final de electrones de las bacterias sulfato-reductoras. Por lo que una mezcla con menos cantidad de estiércol nos daría una menor producción de H<sub>2</sub>S y por tanto una mejor calidad del biogás.

Tabla 4 Producciones y Rendimientos del ensayo 1 de BMP.

Ensayo	Producción	Rendimiento
Blanco Estiércol	52.02 mL de Biogás/ g de SV destruido.	21.59 mL de Metano/ g de SV destruido.
Mezcla 50:50	191.7 mL de Biogás/ g de SV destruido.	70.44 mL de Metano/ g de SV destruido.
Mezcla 70:30	429.65 mL de Biogás/ g de SV destruido.	156.0 mL de Metano/ g de SV destruido.
Mezcla 90:10	327.65 mL de Biogás/ g de SV destruido.	134.8 mL de Metano/ g de SV destruido.
Blanco Lodos	72.6 mL de Biogás/ g de SV destruido.	20.08 mL de Metano/ g de SV destruido.

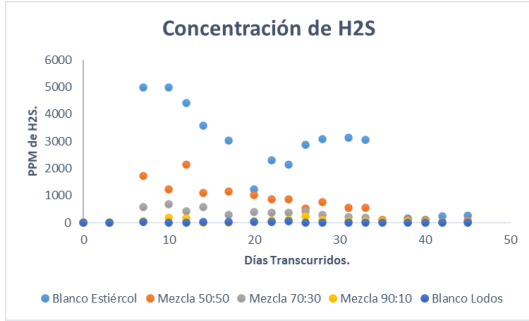


Figura 4 Concentración de H<sub>2</sub>S en el ensayo 1 de BMP.

### Ensayo 2 de BMP.

El ensayo 2 de BMP se llevo a cabo con lodo residual floculado, el cual contenía una mayor cantidad de materia orgánica, en comparación con el lodo residual de recirculación. Aunque el estiércol fue recolectado de la misma fosa séptica, la cantidad de materia orgánica fue menor en comparación con el utilizado en el ensayo 1. Esto se debe a que las muestras pueden sufrir un efecto de lavado dependiendo de la cantidad de agua utilizada para el aseo de los corrales de manejo.

En la Tabla 5 se muestran los valores de entrada de los sustratos y las mezclas utilizadas en el ensayo 2, donde se demuestra de nuevo las ventajas descritas por Campos Pozuledo (2001) y J. Jiménez (2015), en cuanto al enriquecimiento de los sustratos al realizar una co-digestión anaeróbica en lugar de una mono-digestión. Mientras que en la Tabla 6 se muestran los valores de salida del ensayo 2 del BMP, donde se

observa una reducción de la materia orgánica en comparación a los valores de entrada.

Tabla 5 Valores de entrada del ensayo 2 de BMP

Ensayo	Sólidos Totales	Sólidos Volátiles	pH
<b>Blanco Estiércol</b>	76910 mg/L	58060 mg/L	7.1
<b>Mezcla 50:50</b>	24110 mg/L	15730 mg/L	7.0
<b>Mezcla 70:30</b>	18140 mg/L	12000 mg/L	7.1
<b>Mezcla 90:10</b>	15350 mg/L	10230 mg/L	7.1
<b>Blanco Lodos</b>	10840 mg/L	7720 mg/L	6.9

Tabla 6 Valores de salida del ensayo 2 de BMP.

Ensayo	Sólidos Totales	Sólidos Volátiles	pH
<b>Blanco Estiércol</b>	31650 mg/L	20070 mg/L	7.4
<b>50:50</b>	14380 mg/L	8200 mg/L	7.15
<b>70:30</b>	12650 mg/L	6540 mg/L	7.15
<b>90:10</b>	10180 mg/L	5580 mg/L	7.0
<b>Blanco Lodos</b>	9560 mg/L	5340 mg/L	7.0

En la Figura 5 se muestran la evolución de la producción de biogás y en la Figura 6 la producción de metano. En ambos gráficos se observa que la producción de biogás y metano fue superior en las mezclas a comparación de los sustratos de manera independiente. Md.N.I. Siddique, Z.Ab. Wahid (2018), menciona las ventajas de la co-digestión y como las el

uso del estiércol porcino favorece a una mayor producción de metano y una estabilización del pH de la mezcla por la capacidad buffer del estiércol.

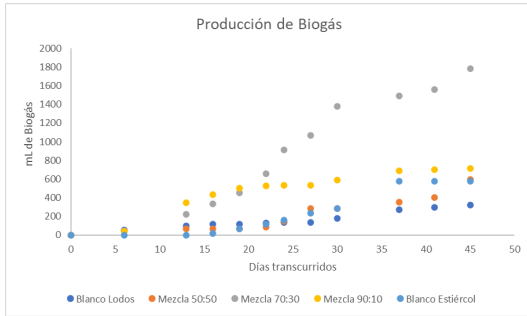


Figura 5 Producción de Biogás del ensayo 2 de BMP.

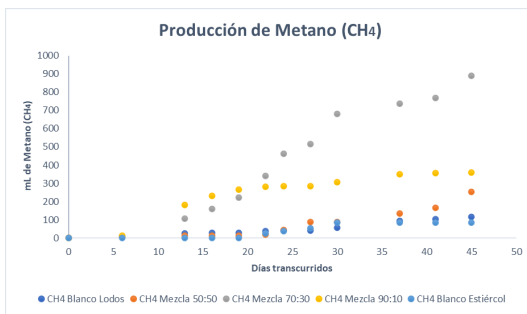


Figura 6 Producción de metano del ensayo 2 de BMP

En la Tabla 7 se muestran las producciones y rendimientos del ensayo 2 de BMP. Donde comparando de nuevo con Xinyuan Liu et al (2018), la producción de nuestra mezcla 70:30 se encuentra por encima de sus resultados, ya que ellos reportan 120.0 L/ Kg-ST con una carga inicial de 4% de SV, y la mezcla 70:30 obtuvo una producción de 150.1 mL de Metano/ g de SV destruido, con una carga inicial de 12000 mg / L de SV.

Al igual que en el ensayo 1, en el ensayo 2 se realizó la medición de la concentración de H<sub>2</sub>S. Donde se observó el mismo comportamiento que en el ensayo 1, las mezclas con una mayor cantidad de estiércol porcino presentaron una mayor concentración de H<sub>2</sub>S. En la Figura 7 se muestra la evolución de la concentración de H<sub>2</sub>S, las cuales fueron menores en comparación a las del ensayo 1; esto se puede deber al mismo efecto de lavado que afectó la carga orgánica inicial del estiércol porcino.

Tabla 7 Producción de biogás y metano del ensayo 2 de BMP.

Ensayo	Producción	Rendimiento
Blanco Estiércol	20.2 mL de Biogás/ g de SV destruido.	6.85 mL de Metano/ g de SV destruido.
Mezcla 50:50	52.4 mL de Biogás/ g de SV destruido.	22.2 mL de Metano/ g de SV destruido.
Mezcla 70:30	300.08 mL de Biogás/ g de SV destruido.	150.1 mL de Metano/ g de SV destruido.
Mezcla 90:10	142.8 mL de Biogás/ g de SV destruido.	71.9 mL de Metano/ g de SV destruido.

Blanco Lodos	175.2 mL de Biogás/ g de SV destruido.	63.15 mL de Metano/ g de SV destruido.
--------------	--	--

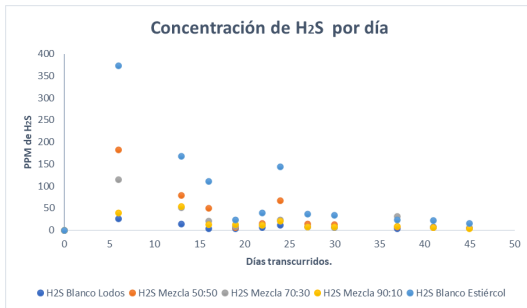


Figura 7 Concentración de H<sub>2</sub>S en el ensayo 2 de BMP

### CONCLUSIONES.

- La co-digestión anaeróbica genera mayores producciones de biogás y mejores rendimientos de metano, en comparación con la mono-digestión de sustratos.
- La mezcla 70:30 es la que mejores resultados presenta en ambos ensayos, presentando en promedio una producción de 153 mL de Metano/ g de SV destruido y siendo este superior a lo reportado en la revisión bibliográfica.
- El efecto de lavado en los corrales de manejo de los animales, genera una variación en la carga orgánica del estiércol. Aun con la variación de la carga orgánica, el usar el estiércol porcino como co-

sustrato genera mejores resultados en la co-digestión.

- A mayor cantidad de estiércol en la mezcla, mayor concentración de H<sub>2</sub>S en el biogás. Esto se debe a los elementos azufrados presentes en las excretas porcinas, los cuales son aprovechados por bacterias sulfato reductoras como aceptor final de electrones produciendo H<sub>2</sub>S.

### BIBLIOGRAFÍA.

- Islam Siddique, M., & Wahid, Z. (2018). Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. *Journal of Cleaner Production*.
- Alonso Estrada, D., Lorenzo Acosta, Y., Díaz Capdesuñer, Y., Sosa Cáceres, R., & Angulo Zamora, Y. (2014). Tratamiento de residuales porcinos para la producción de biogás. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*.
- Bermudez Saturnino, G. (2016). Tratamiento de aguas residuales 4° Encuentro de Jóvenes Investigadores. *CONACYT 11° Coloquio de Jóvenes Talentos en la Investigación*

- septiembre 2016. Obtenido de <http://tlamati.uagro.mx/t7e2/112.pdf>
- Campos Pozuelo, A. E. (2001). Optimización De La Digestión Anaerobia De Purines De Cerdo Mediante Co-digestión Con Residuos Orgánicos De La Industria Agroalimentaria. *Tesis Doctoral, Universidad de Lleida*. Obtenido de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8229/Tecp1de1.pdf>
- Castro, M., Escalante, H., Lambis, B., & Marín, y. (2018). Synergistic effects in anaerobic codigestion of chicken manure with industrial wastes. *DYNA*, 85(206), 135-141.
- Deublein, D. (2011). *Biogas from Waste and Renewable Resources*.
- Galván Arzola, U. (2018). Co-digestión de lodos activados y residuos agropecuarios en fermentadores anaerobios.
- Holliger, C. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science & Technology*.
- Jiménez, J., Guardia-Puebla, Y., Cisneros-Ortiz, M., Morgan-Sagastume, J., Guerra, G., & Noyola, A. (2015). Optimization of the specific methanogenic activity during the anaerobic co-digestion of pig manure and rice straw, using industrial clay residues as inorganic additive. *Chemical Engineering Journal*.
- Martinez Arce, A. (2013). Optimización De La Producción De Metano A Partir De La Codigestión Anaerobia De Residuos Orgánicos. *Tesis De Maestría, Universidad Nacional Autónoma De México*. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/h>
- Martinez, B. H. (2010). APROVECHAMIENTO DE LEVADURAS PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO: SUSTRATO UNICO Y EN CODIGESTIÓN CON LODOS ACTIVADOS.
- Weber, B., Rojas Oropeza, M., Torres Bernal, M., & Pampillon Gonzalez, L. (2012). *Producción de Biogas en México*. Red Mexicana de Bioenergía.

Xinyuan Liu\*, Z. H. (2018). Review of enhanced processes for anaerobic digestion. *Earth and Environmental Science*.