

## Co-digestión anaerobia termofílica de sustrato enriquecido para producción de biogás

Araceli Turincio Estrada <sup>1</sup>, Alejandro Torres Aldaco <sup>1,\*</sup>, Raúl Lugo Leyte <sup>1</sup>, Helen Denise Lugo Méndez <sup>2</sup>, Judith Cervantes Ruiz <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186 Iztapalapa, 09310, CDMX, México

<sup>2</sup> Departamento de Procesos y Tecnología, Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa, Av. Vasco de Quiroga No. 4871, Colonia Santa Fé, 05348, Cuajimalpa, CDMX, México.

<sup>3</sup> División de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico s/n Col. Valle de Anáhuac, C.P. 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México

\* Autor de correspondencia: [ata@xanum.uam.mx](mailto:ata@xanum.uam.mx)

**Energías Renovables (Biocombustibles). Ponencia Presencial.**

Recibido: 17 de junio de 2023

Aceptado: 18 de septiembre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

**Resumen:** La co-digestión es una alternativa para incrementar la producción de biogás, al mezclar dos o más sustratos, se obtiene un sustrato enriquecido que genera altos rendimientos y permite la estabilización de la producción de biogás. En este trabajo se estudia la composición de codigestión de tres residuos: bovino, equino y porcino; bajo condiciones de operación de modo termofílico, en el intervalo de temperatura de 54 a 56°C. El sustrato enriquecido se formó con la siguiente proporción en peso 35.71% bovino, 35.71 porcino y 28.57% equino. Para la formación de la mezcla se consideró los siguientes parámetros: contenido nutrimental y el contenido de bacterias hidrolíticas y fermentativas de cada sustrato para obtener una mezcla rica en carbohidratos, que favorezcan la ruta de producción de metano. Los resultados obtenidos en la co-digestión son, tiempo de retención hidráulico de 15 días, se triplicó la producción de biogás respecto a la operación mesofílica, la concentración de metano obtenida es de 8730 PPM y 232 PPM de dióxido de carbono en la etapa metanogénica.

**Palabras clave:** Anaerobia, Co-digestión, Termofílico

## Thermophilic anaerobic co-digestion of enriched substrate for biogas production

**Abstract:** Co-digestion is an alternative to increase biogas production, by mixing two or more substrates, an enriched substrate is obtained that generates high yields and allows the stabilization of biogas production. In this work, the co-digestion composition of three residues is studied: bovine, equine and porcine; under thermophilic operating conditions, in the temperature range of 54 to 56°C. The enriched substrate was formed with the following proportion by weight: 35.71% bovine, 35.71 porcine and 28.57% equine. For the formation of the mixture, the following parameters were considered: nutritional content and the content of hydrolytic and fermentative bacteria of each substrate to obtain a mixture rich in carbohydrates, which favor the methane production route. The results obtained in the co-digestion are, hydraulic retention time of 15 days, biogas production tripled compared to the mesophilic operation, the methane concentration obtained is 8730 PPM and 232 PPM of carbon dioxide in the methanogenic stage.

**Keywords:** Anaerobic, Co-digestion, Thermophilic

### Introducción

La digestión anaerobia (DA) se utiliza para la degradación de residuos de manera controlada, por fermentación microbiana en ausencia de oxígeno, que produce una mezcla de gases de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y otros gases en cantidades despreciables. El proceso de descomposición de los nutrientes de la materia orgánica del sustrato depende de la composición de la materia orgánica donde participan los ácidos grasos volátiles, la relación de carbono nitrógeno (C/N), la temperatura y pH, FAO (2019). La deficiencia de nutrientes y la presencia de agentes tóxicos en el sustrato tienen un efecto adverso en el proceso de producción a biogás, porque afectan las funciones y crecimiento de las bacterias metanogénicas que determinan la producción de biogás en el proceso.

En diversos estudios se ha demostrado que la digestión anaerobia es una tecnología apropiada para el tratamiento de los residuos orgánicos, permite lograr una importante reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero y en la producción de olores en la disposición a cielo abierto de los residuos. Además, permite la recuperación de energía renovable a partir de la biomasa, se obtienen nutrientes del residuos de la digestión y reduce costos de gestión de residuos orgánicos.

La digestión anaerobia se ha establecido con éxito como tecnología para tratar desechos orgánicos, actualmente el objetivo es convertirla en un proceso de transformación de los residuos, de bajo costo en biogás, como una fuente de energía renovable rentable. Esta tecnología, aun requiere de mejorar el rendimiento debido a la variabilidad de la materia orgánica, así como, la eficiencia del proceso.

El objetivo del presente trabajo, es estudiar el comportamiento de los sustratos orgánicos típicamente empleados como monosustratos, en una mezcla de co-sustratos co-digeridos para explotar sus características complementarias, bajo la premisa que cada uno aporta a la mezcla, sus nutrientes y bacterias que favorecen la producción de biogás. Se busca que la combinación idónea de diferentes residuos orgánicos, que resulte en un sustrato, mejor balanceado y variado en términos de nutrientes.

La co-digestión anaerobia consiste en la digestión de una mezcla de dos o más sustratos con características complementarias, ofrece varias ventajas, tales como la mejora del contenido de nutrientes y la relación C/N, reduce los efectos de inhibición por sustancias tóxicas y mejora la producción de metano, en comparación con la monodigestión.

El estiércol de equino es un desecho con un alto contenido de nitrógeno y materia orgánica; el amoníaco liberado por la descomposición de las proteínas puede alcanzar altas concentraciones en la digestión, que inhibe el crecimiento de la población de los microorganismos metanógenos. Con el uso de la co-digestión la relación C/N de residuos orgánicos de animales, González (2022), puede ser regulada en la mezcla reduciendo los efectos de inhibición de los microorganismos metanogénicos por una producción excesiva de amoníaco.

Otro objetivo, de este trabajo es estudiar el efecto de la temperatura en el proceso en la producción de biogás a partir de la co-digestión anaerobia del sustrato enriquecido de estiércol de bovino, cerdo y caballo con proporciones diferenciadas en la mezcla, para establecer las mejores características del sustrato en relación C/N, concentración de proteínas, carbohidratos, lípidos, bacterias fermentativas y bacterias hidrolíticas y se estudió el efecto de la temperatura del proceso en condiciones termofílicas a 55°C.

La digestión anaerobia termofílica presenta ventajas frente a sus contrapartes debido a que, permite un incremento en las cargas orgánicas, reduce el tiempo de retención hidráulico, aumenta la velocidad de arranque del sistema, evita la formación de espumas e incrementa la destrucción de patógenos. Por otra parte, reduce el volumen requerido en el reactor, es menor el requerimiento de agua para la disolución, se obtiene mayor generación de biogás y facilita la disposición del digestato. Sin embargo, también puede presentar algunos inconvenientes, debido a su elevada biodegradación que puede generar problemas de inestabilidad en altas concentraciones de sólidos.

En la implementación de la co-digestión, es importante elegir las mejores proporciones de la mezcla, basadas en las interacciones positivas, por ejemplo, sinergismos y nutrientes y el balance de humedad, para evitar la inhibición de AGV, amoníaco y productos de la degradación de lípidos.

Los intentos para mejorar la producción de metano a partir de la co-digestión se justifican por el aumento de la carga de compuestos orgánicos fáciles de degradar, el equilibrio entre los nutrientes, la relación C/N en la materia orgánica y baja concentración de sustancias tóxicas. El estiércol de residuos de animales no es un residuo orgánico muy eficiente como sustrato en la digestión anaerobia en modo termofílico, debido a su alto contenido de nitrógeno que a menudo conduce a la inhibición de la etapa metanogénesis por la acumulación de amoníaco. Sin embargo, empleando los residuos animales como co-sustrato, es ideal para digestión de los residuos animales, esto se debe a sus altas concentraciones de C/N, su elevado contenido orgánico y su gran disponibilidad, Ghanimeh (2018) y Ryue, (2019).

El carbón y el nitrógeno son las principales fuentes de alimento de las bacterias metanogénicas, el carbón produce energía y el nitrógeno permite la formación de nuevas células. Las bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, se considera que la relación óptima de estos elementos, en la materia orgánica, está entre las proporciones 20:1 y 30:1. Para los sustratos con alto contenido de carbón superior a 35:1, la descomposición ocurre más lenta, debido al bajo crecimiento y desarrollo bacteriano por insuficiencia de nitrógeno, por lo anterior, el ciclo de producción de biogás ocurre en un periodo mayor. Para una relación C/N inferior a 8:1, la actividad de las bacterias se inhibe debido a la formación en exceso de amoníaco, que es un inhibidor del proceso de digestión anaerobia, FAO (2019).

El contenido de bacterias en la materia orgánica es un factor importante, debido a la función que tienen en la digestión anaerobia. En la Tabla 1 se presenta la relación C/N, concentración de bacterias fermentativas y concentración de bacterias hidrolíticas en los residuos de bovino, equino y porcino empleados para formar el co-sustrato enriquecido. Se observa que las bacterias fermentativas se encuentran en concentraciones mayores al 50%, los residuos con mayor concentración corresponden a los residuos de porcino y equino; mientras que la concentración de bacterias hidrolíticas de mayor proporción corresponde para los residuos de bovinos y porcinos, Roca (2008) y Lara-Durán (2019).

Otro factor importante en el proceso de degradación de la materia orgánica es la temperatura, que ésta relacionada con la velocidad de reacción de los procesos biológicos y la velocidad de crecimiento de los microorganismos presentes. La ventaja de emplear el modo de operación termófilico es la reducción de 50% o más en el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) que incrementa la producción de biogás.

Tabla 1. Bacterias presentes en el residuo orgánico por animal, Roca (2008) y Lara-Durán y col. (2019).

| Materia prima | Relación C/N | Concentración de bacterias Fermentativas (%) | Concentración de bacterias Hidrolíticas (%) |
|---------------|--------------|--|---|
| Bovino        | 25           | 56.1   | 8.51  |
| Porcino       | 16           | 66.4   | 12.3  |
| Equino        | 50           | 59   | 2   |

## Materiales y Métodos

Para el enriquecimiento de la materia orgánica con porcino, bovino y equino se consideró ajustar la relación C/N al valor de 25, tener una mezcla con la proporción de bacterias hidrolíticas y fermentativas más alta posible. Al analizar la composición de los residuos orgánicos, esto adquiere particular importancia, debido a los componentes que se degradan durante las etapas de hidrólisis y acidogénesis. La Tabla 2 presenta la composición de los nutrientes tales como, proteínas, carbohidratos y lípidos de los residuos, basada en la composición promedio.

Tabla 2. Composición química de los residuos de bovinos, porcinos y equinos, Gutiérrez (2018).

| Materia prima | Lípidos % | Proteínas % | Carbohidratos % |
|---------------|-----------|-------------|-----------------|
| Bovino        | 3.23      | 9.05        | 21.49           |
| Porcino       | 11.5      | 10.95       | 35.57           |
| Equino        | 2.7       | 5           | 35              |

Se observa que los residuos de porcino triplican la concentración de lípidos con respecto a los residuos de bovino y equino, esto es un factor que considerar, en la formación del co-sustrato, debido a que los lípidos retardan el proceso de digestión, concentraciones elevadas de lípidos incrementan el tiempo de retención hidráulico.

La magnitud del pH, indica el grado de inhibición o toxicidad de las bacterias, así como, el crecimiento de cada grupo microbiano, en cada etapa de la digestión anaerobia. Se debe considerar, que los microorganismos metanogénicos son más sensibles a los cambios de pH. Para una digestión anaerobia eficiente, el pH debe mantenerse en valores promedio cercanos a 7. Las bacterias que participan en la fase acidogénica operaran de manera óptima en el rango de 5.5 a 6.5; mientras que las bacterias metanogénicas operan en valores de 7.8 a 8.2. Para mezclas mixtas, el pH varía entre 6.8 y 7.4. El biodigestor empleado en la biodigestión tiene un volumen de 20 L de capacidad.

La experimentación considero tres aspectos: co-digestión de un sustrato compuesto por estiércol de bovino, porcino y equino. El biodigestor se utilizó al 70% de su capacidad con mezcla de agua-estiércol y el biogás ocupe un volumen de 6 L. El volumen de la mezcla se consideró con base al volumen ocupado en el biodigestor, que corresponde a un volumen de 14 L. La mezcla agua sustrato se preparó al 8% en peso. Con lo anterior se observa que se requiere 1.12 kg

de estiércol; para satisfacer uno de los parámetros fundamentales como la relación C/N, en el caso de la co-digestión que no se tiene un valor de la relación C/N, se realiza una proporción, utilizando la Ecuación 1.

$$K = \frac{C_1Q_1 + C_2Q_2 + \dots + C_nQ_n}{N_1Q_1 + N_2Q_2 + \dots + N_nQ_n} \quad (1)$$

K es la relación C/N del sustrato de la mezcla es 25:1, determinada a partir de los valores que se presentan en las Tablas 3 y 4, C es el contenido de carbón, N es el contenido de nitrógeno, Q es el peso de cada residuo animal.

Tabla 3. Porcentaje de carbón y nitrógeno de sustratos animales, FAO (2019)

| Materia prima | C<br>% | N<br>% | Q<br>(kg) |
|---------------|--------|--------|-----------|
| Bovino        | 30     | 1.3    | 0.4       |
| Porcino       | 25     | 1.5    | 0.4       |
| Equino        | 40     | 0.8    | 0.32      |

La Tabla 4 presenta los parámetros considerados para elaborar el co-sustrato enriquecido con los diferentes sustratos. En las Tablas 1 y 3, se presentan los contenidos de nutrientes de cada sustrato y la cantidad de materia orgánica empleada de cada residuo animal para formar la mezcla enriquecida.

Tabla 4. Parámetros de los distintos sustratos empleados en la co-digestión.

| Sustrato | Q<br>(kg) | Carbohidratos<br>% | Lípidos<br>% | Proteínas<br>% | Bacterias.<br>Fermentativas<br>% | Bacterias.<br>Hidrolíticas<br>% |
|----------|-----------|--------------------|--------------|----------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Bovino   | 0.4       | 8.336              | 1.253        | 3.510          | 21.760                           | 3.301                           |
| Porcino  | 0.4       | 13.797             | 4.461        | 4.247          | 25.755                           | 4.771                           |
| Equino   | 0.32      | 10.182             | 0.785        | 1.455          | 17.164                           | 0.582                           |
| Total    | 1.12      | 32.314             | 6.499        | 9.212          | 64.679                           | 8.654                           |

El co-sustrato para la co-digestión se formó con la siguiente composición en peso: estiércol de bovino con 38.71%, porcino 38.71% y equino con 28.57% en peso; relación C/N de 25, 32.31% de concentración en peso de carbohidratos, 9.21% de proteínas y 6.49% de concentración de lípidos, 64.67% de concentración de bacterias fermentativas y 8.65% de concentración de bacterias hidrolíticas. Se estableció tener el mayor porcentaje de carbohidratos, proteínas y bacterias fermentativas e hidrolíticas, debido, a que estos componentes incrementan la producción de acetato durante la digestión y con ello la producción de metano. La cantidad de lípidos se podría haber disminuido si no se emplea el residuo de porcino, pero este inconveniente se acepta debido a la gran contribución de nutrientes y bacterias que proporciona.

### Materiales

El sistema experimental con los diferentes sistemas auxiliares de medición y control se muestran en la Figura 1. Para el control de la temperatura se desarrolló un código en el ambiente de programación Arduino. Se empleó una resistencia eléctrica de calentamiento para mantener la temperatura, en el intervalo de 54 a 56°C. Se instalaron en el biodigestor un sensor de concentración de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, tipo MQ compuestos por un sensor electroquímico que varía su resistencia al estar en contacto con las sustancias, sensor de presión de la serie XDB401 de acero inoxidable, con voltaje de alimentación de 0 a 5 volts y sensor de pH 014 con electrodo 201 BNC con alimentación de 0 a 5 volts. El seguimiento a la digestión fue en tiempo real durante todo el TRH. El biodigestor se instaló en la cabina con elementos de aislamiento, para reducir pérdidas de calor con el medio ambiente. En la Figura 1, se muestra el circuito de conexión

de la tarjeta adquisidora Arduino y la interconexión de los componentes utilizados para medir y seguir la tendencia de las condiciones de operación en tiempo real.

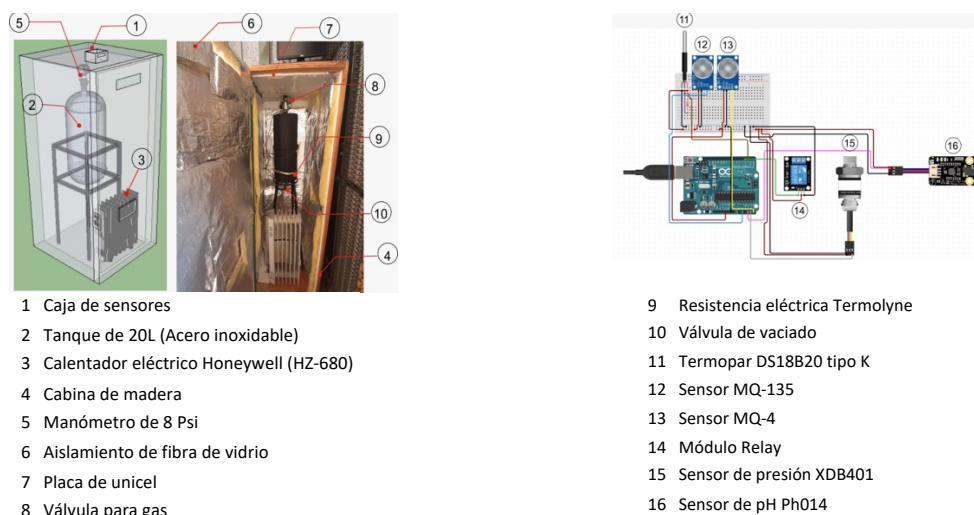


Figura 1. Descripción del sistema experimental de biodigestión anaerobia.

### Experimentación

La rutina de experimentación se inició con la recolección del estiércol de vacuno, porcino y equino, se pesaron las proporciones requeridas de cada residuo en la balanza digital OHAUS Scout. El sustrato se preparó con una disolución 14:1, con la finalidad de que la mezcla estiércol/agua destilada no se solidifique dentro del tanque. Se realizó un pretratamiento, diluyendo la materia orgánica en agua caliente a 70°C, esto para eliminar los agentes patógenos. El tanque de digestión se mantiene caliente a 55°C. Después de mezclar la materia orgánica con el agua, se homogeniza la mezcla con un caframo modelo BDC 6015, durante 15 min a 240 rpm. Con la mezcla homogénea se vacía al biodigestor, se extrae el excedente de aire que ingresó durante el proceso de vaciado, utilizando una bomba de vacío. Se colocan los sensores dentro del biodigestor, se revisa que todas las entradas se encuentren cerradas y que no se presenten fugas. Se colocó un calentador eléctrico dentro de la cabina, a su capacidad máxima de calentamiento y el biodigestor se envuelve con una resistencia eléctrica conectada a un controlador de temperatura, posteriormente se cierra la cabina y cada 20 min los parámetros temperatura, pH, presión, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> se registran durante un periodo de 20 días.

### Resultados y Discusión

La co-digestión anaerobia con un sustrato compuesto de excretas de bovino, porcino y equino, con una proporción de excretas/agua de 1:14, en modo termofílico a una temperatura de 55°C, bajo las condiciones mencionadas, el proceso de digestión culminó con un TRH de 15 días, considerando el punto de termino cuando la variación en la presión y el pH, en el tiempo, fueron de 0.1 atm y 1% en el pH, respectivamente. Se alcanzó un estado de estabilidad de la temperatura del sistema. La Figura 1 muestra que la temperatura se mantuvo en el intervalo de 54 a 56 °C, que corresponden al encendido y apagado de la resistencia eléctrica; así mismo, se establece el número de ciclos de encendido y apagado de la resistencia eléctrica realizados durante la experimentación, durante los quince días de experimentación, cada ciclo de calentamiento fue de 2 horas para evitar las fluctuaciones de temperaturas que pudieran inhibir el proceso de degradación de la materia orgánica.

La variación del pH durante la digestión permite identificar las diferentes etapas involucradas en la digestión anaerobia. En la Figura 3, se muestra la evolución de la digestión anaerobia a través de los cambios definidos del pH. Para el caso de este estudio, la etapa de hidrólisis tuvo una duración de 72 horas, el tiempo de esta etapa fue 50% menor, que el tiempo en modo mesofílico, se alcanzó un valor máximo de pH de 8.8, en un periodo de 24 horas, posteriormente se

redujo debido al crecimiento de la población de bacterias hidrolíticas, el contenido alto de carbohidratos en el sustrato y la temperatura de operación de 55°C del modo termofílico.

La etapa acidogénica inició en el tercer día, se identifica por el incremento sostenido del pH durante 48 horas. La etapa de acidogénesis corresponde a la segunda etapa de la digestión anaerobia. En esta etapa, se alcanza un valor máximo en el pH de 8, debido a la intervención de bacterias fermentativas, que actúan sobre los productos intermedios, fermentando estos de manera acelerada, se presenta un incremento en el pH de 1.6. La acidogénesis tuvo una duración de 120 horas, que corresponde a un tiempo 45% menor que el modo mesofílico.

La etapa de acetogénesis, se inició a partir del octavo día, alcanzó un valor máximo de pH de 8.6, el pH tuvo un incremento de 2.5, provocado por el aumento de la población de bacterias acetogénicas. Estas bacterias tienen la capacidad de convertir los productos de la acidogénesis en compuestos tales como, acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.

Esta etapa tuvo una duración de 48 horas, el tiempo es 82% menor que la operación mesofílica. En esta etapa no solo la temperatura es un factor que aceleró el proceso, la participación de los sustratos con un contenido balanceado de nutrientes contribuyó en forma importante en acelerar la degradación. En el décimo día, inicio la etapa metanogénica, que alcanzó un valor máximo de pH 8.8, durante la etapa se incrementó el pH en 1.9 y se mantuvo por más de 12 horas. Con lo anterior se establece que el sustrato ha alcanzado la estabilidad y con esto la finalización del proceso de degradación.

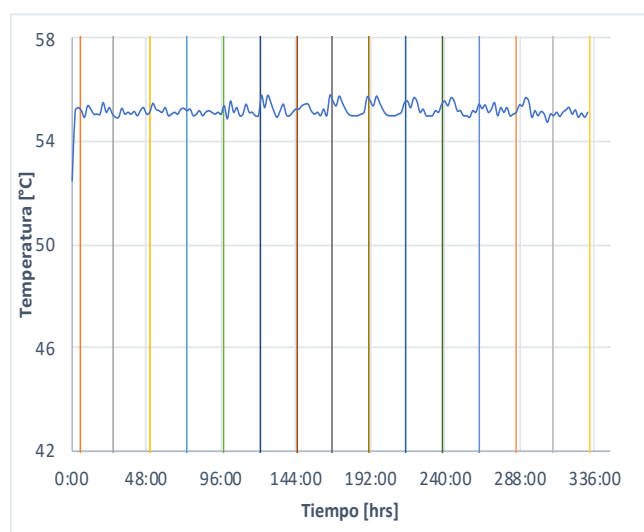


Figura 2. Temperatura con respecto al tiempo de digestión.

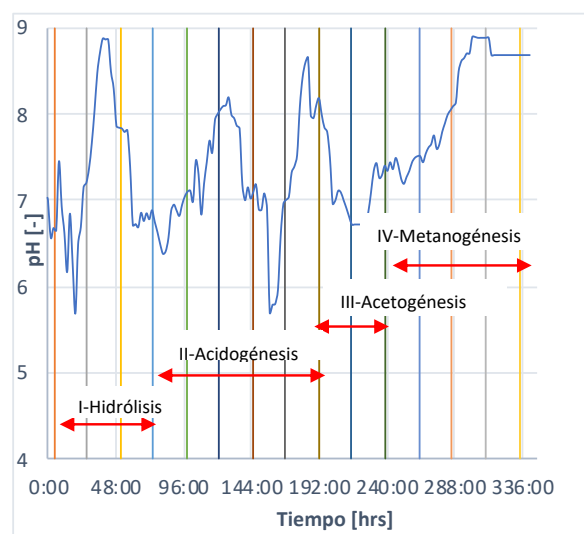


Figura 3. El pH durante el proceso de digestión.

En la Figura 4, se muestra el perfil de presiones generado, debido a la producción de biogás durante el proceso de digestión, en modo termofílico. El incremento de la presión durante las etapas de hidrólisis y acidogénesis es nulo. En la etapa de acidogénesis se inicia la producción de biogás provocando un incremento máximo en la presión de 0.72 atm., la presión se mantiene hasta alcanzar la etapa de acetogénesis.

En la etapa de acetogénesis se produce un incremento de presión hasta alcanzar 4.1 atm., que se produce en dos periodos: el primero cuando se alcanza el pH máximo en el día 9 de la digestión, donde incrementa hasta 2.1 atm., posteriormente, se alcanza la presión de 4.1 atm., al inicio de la etapa metanogénica. Este aumento durante la etapa acetogénica se debe a la producción de acetato que posteriormente, en contacto con las bacterias metanogénicas activan la producción de metano. En la etapa metanogénica, el acetato producido en la acetogénesis y los subproductos se transforman para incrementar la producción de metano y dióxido de carbono, debido a las diferentes rutas metabólicas que siguen en la degradación del sustrato, que permitió alcanzar la presión de 7.3 atm., después de 15 días el biodigestor se encuentra en el estado de estabilización.

Las concentraciones de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, alcanzadas en la digestión anaerobia son indicadores de la eficiencia del proceso, las condiciones de operación tales como, temperatura, pH, relación C/N del sustrato, concentración de bacterias hidrolíticas y fermentativas, influyen en forma determinante de la concentración de metano que se puede obtener en la digestión.

La Figura 5, muestra los perfiles de producción a CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> durante el proceso de digestión, durante los primeros días la concentración de metano y dióxido de carbono fue menor a 1PPM, estableciendo que durante las etapas de hidrólisis y acidogénesis no hay una producción de estos compuestos, ésta se alcanza hasta el séptimo día donde se detectan trazas de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>.

Durante la etapa acetogénesis, solo incrementó 1327 PPM a partir de este punto, la tendencia de producción de metano es exponencial. Una vez alcanzada la etapa de metanogénesis, se incrementa la concentración de metano en 7402 PPM. En la Figura 5, también se presenta la tendencia de generación de dióxido de carbono, este incrementa 81 PPM su concentración durante la acetogénesis. La máxima concentración de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en la etapa metanogénica fue de 8730 PPM y 232 PPM, respectivamente.

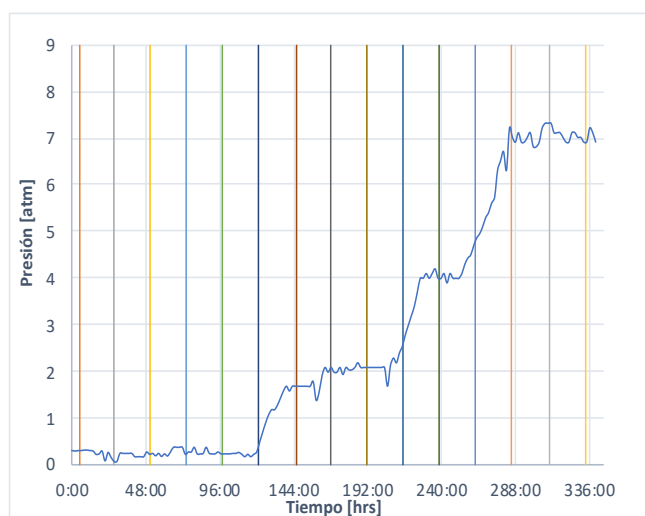


Figura 4. La presión durante el proceso de co-digestión anaerobia termofílica.

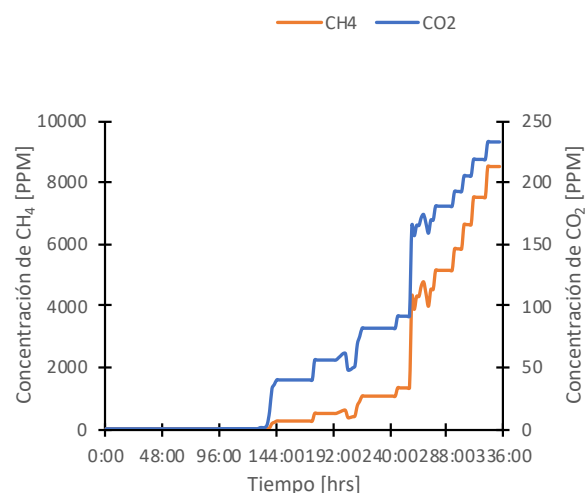


Figura 5. Concentración de metano en la producción de biogás.

En la Figura 6, se presenta la evolución del pH en función del cambio de presión y la temperatura, durante el proceso de digestión anaerobia, las variaciones de temperatura producen una reducción del pH, produciendo variaciones menores de 0.3 de pH. Se observa que el incremento de presión está ampliamente relacionado con el comportamiento del pH, a su vez, relacionado con las distintas etapas de la digestión anaerobia, donde las etapas de hidrólisis y acidogénesis se ocurren a una presión menor a 1 atm y valores de pH de 8 a 8.4, respectivamente.

Con la disminución consecuente del pH, se reduce exponencialmente la población de bacterias de la etapa acidogénica, posteriormente durante la etapa de acetogénesis las bacterias productoras de acetato, dióxido de carbono y metano provocan el incremento de la presión entre las etapas, consiguiendo un valor máximo local de pH de 8.6 para una presión de 2.4 atm, dando paso a la formación de bacterias metanogénicas que se encargan de producir mayores cantidades de metano y dióxido de carbono, obteniendo una presión de 4.1 atm, donde inicia de manera exponencial el crecimiento de la presión, así como, del pH hasta alcanzar un estado de estabilidad, al llegar a una presión de 7.2 atm con un pH de 8.8. La Figura 7, muestra la dependencia de la concentración de metano producido con el pH y la presión en el biodigestor, se observa que en el intervalo de pH de 8 a 8.5 y una presión de 7.2 atm se produjo la mayor concentración de metano de 8730 PPM que corresponde al día 14 del TRH.

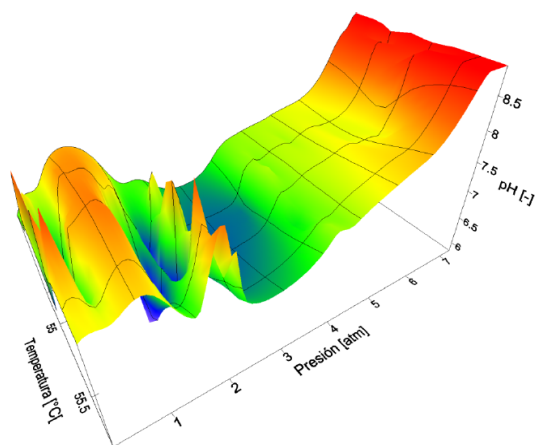


Figura 6. Relación de la presión, pH y temperatura en la digestión anaerobia.

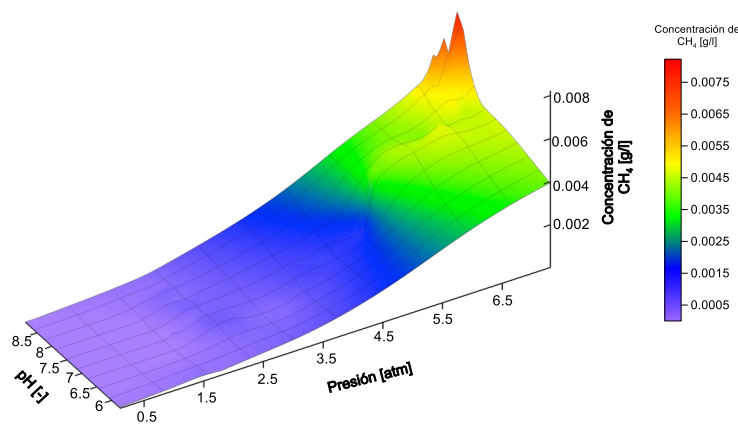


Figura 7. Influencia de la presión y pH en la concentración de metano.

## Conclusiones

La co-digestión con un sustrato formado de estiércol de bovino con 38.71%, porcino 38.71% y equino con 28.57% en peso, bajo una operación en modo termofílico a 55°C. La mezcla enriquecida de las distintas especies animales con la relación C/N en un valor óptimo de 25, 32.31% de concentración en peso de carbohidratos, 9.21% de proteínas y 6.49% de concentración de lípidos, 64.67% de concentración de bacterias fermentativas y 8.65% de concentración de bacterias hidrolíticas; estableció condiciones ideales para la producción de biogás logrando triplicar la producción con respecto a la digestión en modo mesofílico a temperatura ambiente.

El residuo de porcino compensó ampliamente la desventaja de elevar la concentración de lípidos de la mezcla contribuyendo con un mayor porcentaje de proteínas, carbohidratos y bacterias hidrolíticas y fermentativas. La digestión anaerobia en modo termofílico, se estableció con un tiempo de retención hidráulico de 15 días, la digestión bajo este régimen no presentó inestabilidades en el sistema, cada etapa de la digestión se presentó de forma muy definida, a diferencia de como ocurre en la digestión con lodos activados donde se presentan variaciones grandes en el pH. La concentración de oxígeno disuelto en el sustrato no fue un factor en la digestión anaeróbica, por efecto de la temperatura fue menor a 5 PPM. En la etapa de metanogénesis el pH alcanzó a un punto de equilibrio de 8.8.

El rango óptimo para la producción de biogás se estableció en el intervalo del pH de 7.4 a 8.8. La producción máxima de biogás ocurrió en los días 12 a 14 del TRH. La etapa hidrolítica se alcanzó en un periodo de 24 horas con un valor máximo de pH de 8.8. La etapa acidogénica se inició a las 72 horas. La etapa metanogénica se alcanzó en 11 días. El biogás producido por co-digestión en modo termofílico tiene una composición de 97.3% CH<sub>4</sub> y 2.7% de CO<sub>2</sub>.

## Bibliografía

- Carrillo-Reyes, J., Buitrón, G., Arcila, J. S., & López-Gómez, M. O. (2021). Thermophilic biogas production from microalgae- bacteria aggregates: biogas yield, community variation and energy balance. *Chemosphere*.275. <https://doi:10.1016/j.chemosphere.2021.129898>.
- De la Rubia, M A., Riau, V., Raposo, F., Borja, R., (2013) Thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge: focus on the influence of the start-up. A review. *Dec*;33(4):448-60. <https://doi.org/10.3109/07388551.2012.726962>.
- FAO (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores.
- Ghanimeh, S., El-Fadel, M., & Saikaly, P. E. (2018). Performance of thermophilic anaerobic digesters using inoculum mixes with enhanced methanogenic diversity. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93(1), 207-214. <https://doi.org/10.1002/jctb.5341>.
- González, R., Carrillo, D. C., Gómez, X. (2022). Anaerobic Co-Digestion of Wastes: reviewing current status and approaches for enhancing biogas production. *Applied Sciences*, 12(17), 8884. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app12178884>.
- Gutiérrez, J.P. (2018). Situación actual y escenarios para el desarrollo del biogás en México hacia 2024 y 2030.
- INTA (2014). Curso Nutrición Animal. Aplicada. Grupo de Nutrición Animal, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Universidad Católica del Mar del Plata, Argentina.
- Lara-Duran JA, Silva-Vega M, Bañuelos-Valenzuela R, Delgadillo-Ruiz L, Delgadillo-Ruiz O., 2019 Incidencia de Escherichia coli O157:H7 en heces de rumiantes lactantes con síndrome diarreico. *Rev MVZ Cordoba Argentina.* ; 24(3), pp.7339-7345. DOI: <https://doi.org/10.21897/rmvz.1232>.

- 
- Ryue, J., Lin, L., Laqa F., Elbeshbishy, E. Al-Mamun, A., (2019). A critical review of conventional and emerging methods, for improving process stability in thermophilic anaerobic digestion. 54, 72-84. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.11.001>.
- Roca Canudas, M. (2008). Estudio del ecosistema bacteriano del tracto digestivo del cerdo mediante técnicas moleculares. Tesis Doctoral, Facultat de Veterinària, Universidad Autònoma de Barcelona.