

Tratamiento Anaerobio de Residuos de Frutas y Hortalizas en Dos Etapas

Mtra. María Monserrat Montes García*



Resumen

En este artículo, revisaremos algunos de los factores que afectan a la digestión anaerobia como tecnología para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos (RSO). Se destaca la opción de llevar a cabo el proceso de digestión en dos etapas, con el objetivo de optimizar la descomposición de sustratos complejos y maximizar la producción de biogás. Los sistemas anaerobios en dos etapas, han demostrado resultados positivos

Acerca de la autora

*Académica de la Unidad de Estudios Superiores Tultitlán, Universidad Mexiquense del Bicentenario, Estado de México.

al emplearse en el tratamiento de aguas residuales con altas cargas, así como en el procesamiento de residuos sólidos orgánicos. Además, se documenta el trabajo realizado en el Laboratorio de Tecnología Anaerobia del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, donde se propuso un sistema en dos etapas para el tratamiento anaerobio de residuos de frutas y hortalizas. En este sistema, se utilizaron dos reactores: en la primera etapa, un reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con los residuos de frutas y hortalizas, y en la segunda, un reactor anaerobio de flujo ascendente de lechos de lodos.

Palabras Clave: Digestión Anaerobia, Acidificación, Metanogénesis, UASB.

Abstract

In this article, we will review some of the factors that affect anaerobic digestion as a technology for treating organic solid waste (OSW). The option of carrying out the digestion process in two stages is highlighted with the aim of optimizing the decomposition of complex substrates and maximizing biogas production. This alternative has demonstrated positive results when used in the treatment of wastewater with high loads, as well as in the treatment of organic solid waste. Additionally, the work carried out at the Anaerobic Technology Laboratory of the Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec is documented, where a two-stage system was proposed for the anaerobic treatment of fruit and vegetable waste. In this system, two reactors were used: The first stage in an upflow anaerobic reactor packed with fruit and vegetable waste, and the second stage in an upflow anaerobic reactor with sludge beds.

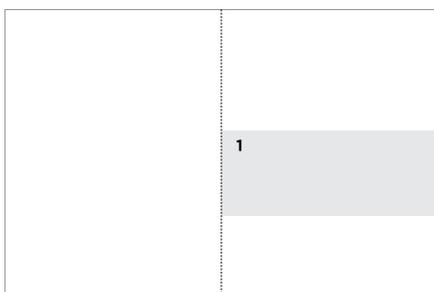
Keywords: Anaerobic Digestion, Acidification, Methanogenesis, UASB.

Introducción

Los problemas ambientales y de salud pública en las ciudades, se derivan principalmente de una gestión deficiente de los residuos sólidos urbanos (RSU). En México, se producen diariamente 120,000 toneladas de RSU, de las cuales aproximadamente el 45% son de residuos orgánicos (SEMARNAT 2020). Esta disposición inadecuada conlleva la propagación de enfermedades, la contaminación del medio ambiente y la emisión de gases de efecto invernadero. Por consiguiente, es crucial implementar estrategias de gestión de RSU que abarquen no solo la recolección, transporte y eliminación final, sino también la reducción, valorización y tratamiento, para generar beneficios ambientales, energéticos y económicos.

La tendencia mundial en el tratamiento y eliminación de RSU se inclina hacia tecnologías sostenibles con balances energéticos positivos (SEMARNAT 2020). Entre ellas, se destacan la digestión anaerobia para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos, la cual ofrece ventajas frente a otras tecnologías, como menores costos de mantenimiento y una mayor aceptación social debido a su naturaleza biológica. La principal ventaja de la digestión anaerobia radica en su capacidad para convertir en metano la materia orgánica; el metano puede entonces ser utilizado para la producción de energía eléctrica y térmica, que se puede suministrar en el mismo proceso o transferirse a la red eléctrica. Además, se obtienen productos secundarios como el digestato sólido y líquido, ambos pueden usarse como abono y mejoradores de suelos agrícolas, silvícolas y de recreación.

El proceso anaerobio, que implica la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular como aceptor final de electrones, se utiliza



<https://es.linkedin.com/pulse/la-importancia-de-gesti%C3%B3n-residuos-org%C3%A1nicos-oldevideconsulting-ynwdc/>

PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE

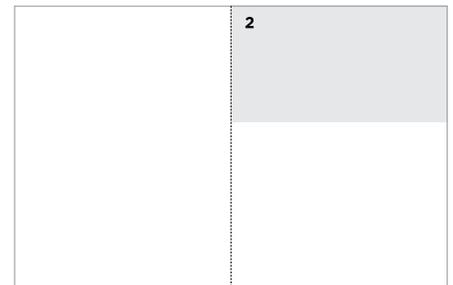


ampliamente en el tratamiento de residuos sólidos o líquidos. Para llevar a cabo este proceso, se deben considerar varios factores, con el objetivo de maximizar la eficiencia y la producción de biogás.

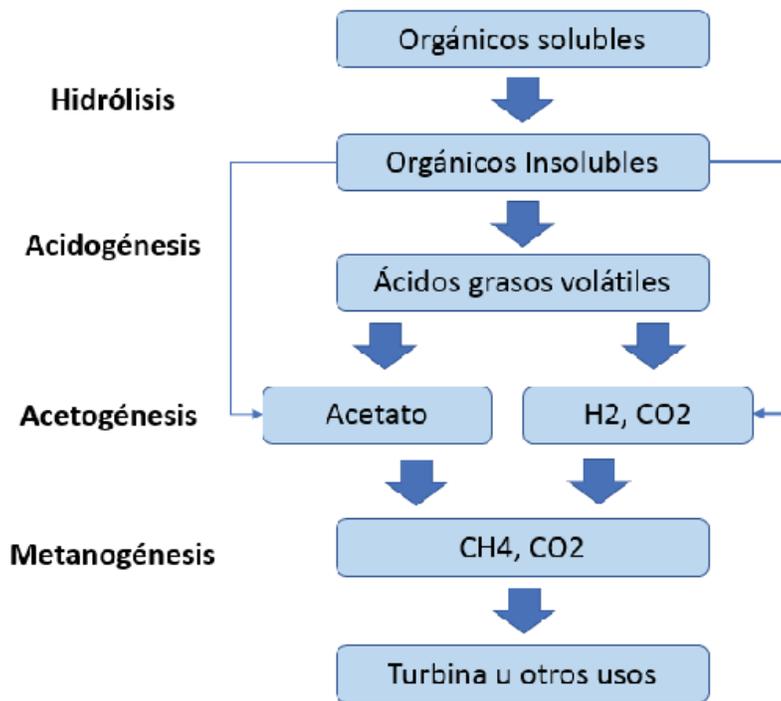
En este sentido, un factor que ha ayudado, es la utilización exclusiva de residuos sólidos orgánicos (RSO), que suele resultar en un mejor control y rendimiento del proceso, por lo que la separación de los residuos desde la fuente ha favorecido que se puedan implementar sistemas en pequeña y gran escala. Otro de los factores clave, es la composición del sustrato utilizado en el proceso. Como señalan Speece y McCarty (2011), la naturaleza y la concentración de los sustratos orgánicos influyen en la tasa y la cantidad de producción de biogás.

La temperatura es otro factor crítico en este proceso. Según Angelidaki y Sanders (2004), la actividad microbiana responsable es altamente sensible a la temperatura. La mayoría de los sistemas de digestión anaerobia operan en dos temperaturas específicas: 35 °C y 55 °C, dependiendo de los microorganismos presentes y del tipo de sustrato utilizado. El pH del sistema es un factor determinante también; un pH óptimo es el que está entre 6.5 y 7.5, lo cual es decisivo para mantener la actividad microbiana adecuada y prevenir la proliferación de microorganismos no deseados. Según McCarty *et al.* (2011), los cambios significativos en el pH, pueden afectar negativamente la actividad de los microorganismos y reducir la producción de biogás.

La presencia de inhibidores, como metales pesados, compuestos tóxicos o productos químicos residuales, de igual forma puede afectar significativamente



https://www.researchgate.net/figure/Etapas-de-la-Digestion-Anaerobia-18_fig1_382544403



el proceso de digestión anaerobia. Como sugieren Hansen *et al.* (1998), es importante identificar y controlar la presencia de inhibidores en el sustrato para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema.

Estos factores deben ser cuidadosamente considerados en el proceso de digestión anaerobia para maximizar la eficiencia y la producción de biogás, y existen múltiples estrategias para poder optimizarlos, como son los pretratamientos, estrategias de operación, entre otras.

Etapas de la digestión anaerobia

Tradicionalmente, el estudio de la digestión anaerobia se ha dividido en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En la primera etapa, las partículas complejas se descomponen en compuestos solubles más simples por acción de enzimas hidrolíticas, factores como temperatura, pH y tamaño de partículas influyen en la velocidad de este

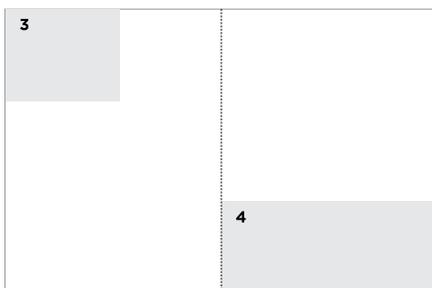
proceso. Su etapa limitante suele ser la hidrólisis, especialmente en materiales de difícil biodegradabilidad (polisacáridos, grasas, proteínas, entre otros), aunque en residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU) la metanogénesis puede también ser limitante, debido a la rápida generación de ácidos grasos volátiles que inhiben la producción de metano.

En la acidogénesis, los productos de la hidrólisis son convertidos en alcoholes y ácidos grasos volátiles por bacterias acidogénicas, con algunos compuestos utilizados directamente por arqueas metanogénicas. La acetogénesis produce ácido acético a partir de ácidos grasos de cadena corta o alcoholes, con bacterias acidogénicas, transformando los primeros en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

La metanogénesis, llevada a cabo por arqueas metanogénicas, produce metano a partir de ácido acético, H₂ y CO₂, siendo un porcentaje alto el metano creado a partir de la descarboxilación de ácido acético.

La digestión anaerobia, con sus múltiples etapas y grupos microbianos involucrados, es un proceso altamente eficiente en la producción de metano, pero también complejo, debido a la interacción de las reacciones bioquímicas y la simultaneidad de muchas de ellas. La comprensión de estos procesos es fundamental para maximizar la eficiencia y el rendimiento de la digestión anaerobia en el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de biogás. A pesar de su amplia utilización, su complejidad sigue siendo objeto de estudio, para optimizarla desde una perspectiva bioquímica (Montalvo y Guerrero, 2003).

El objetivo principal del ingeniero, es optimizar las condiciones para cada grupo microbiano y lograr los mejores rendimientos en los digestores anaerobios, lo que requiere un entendimiento más profundo de la cinética de las reacciones y los microorganismos involucrados en el proceso de digestión



https://www.researchgate.net/figure/Etapas-de-la-Digestion-Anaerobia-18_fig1_382544403

anaerobia. Como se puede notar, la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos es un proceso biológico complejo que puede ser influenciado por diversos factores, los cuales afectan significativamente al proceso, provocando bajos porcentajes de conversión.

Factores que afectan a la digestión anaerobia y alternativas de optimización

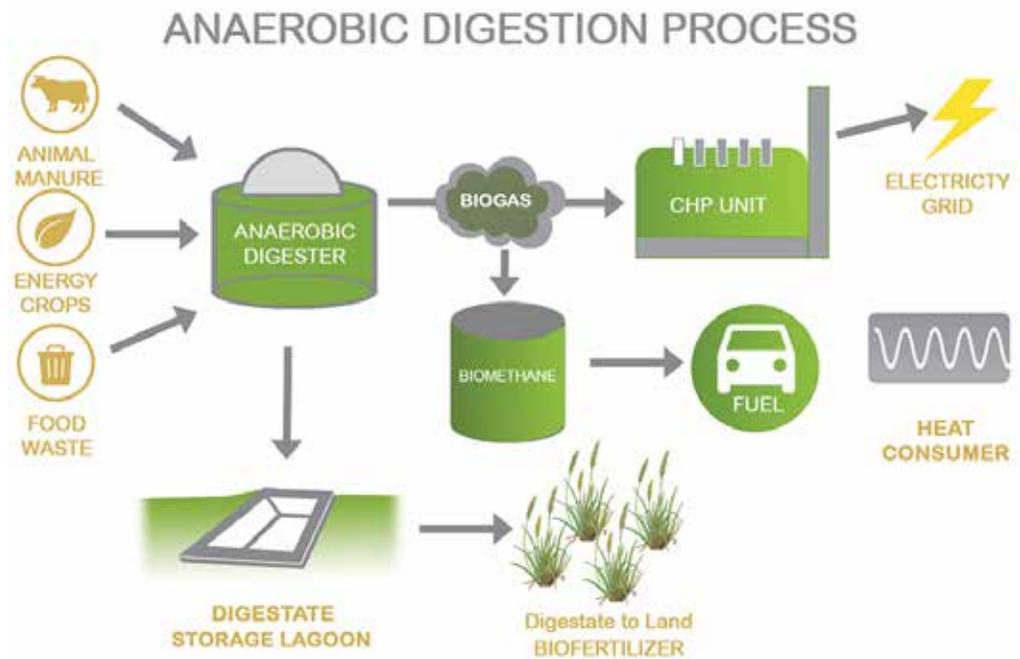
La digestión anaerobia es un proceso biológico vital en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos, y su eficacia está determinada por una serie de condiciones ambientales y químicas. La temperatura, el pH, la carga orgánica y la presencia de tóxicos, son factores clave que influyen en este proceso (Smith, 2010). La temperatura óptima para la digestión anaerobia se sitúa alrededor de los 35 °C, mientras que un pH entre 6.6 y 7.6 es crucial para mantener la acidez dentro de un intervalo adecuado (Johnson *et al.*, 2015). Se recomienda operar con menos del 10% de sólidos en el residuo, para favorecer que el sustrato tenga un alto contenido de humedad (González *et al.*, 2018).

La presencia de tóxicos, como amoníaco, sales minerales y metales pesados, así como altas concentraciones de ácidos grasos volátiles, puede inhibir el proceso de digestión anaerobia (Chen *et al.*, 2017). Por lo tanto, es esencial optimizar los procesos, la operación y el control de los reactores para mejorar su rendimiento (Brown & Li, 2014). Factores como el tiempo de retención hidráulica, el pH, el tiempo de retención de lodos, la temperatura y el reciclaje, deben ajustarse cuidadosamente para maximizar la eficiencia del proceso (Wang & Zhang, 2016).



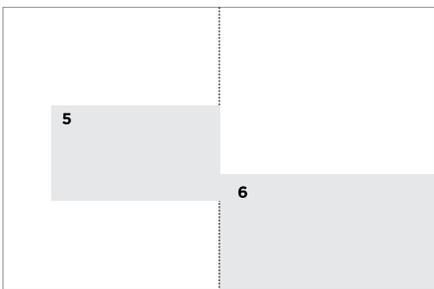
Para mejorar la eficiencia en el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de biogás, se han desarrollado diversas estrategias y tecnologías.

Algunas de las estrategias clave para optimizar la digestión anaerobia, son: el pretratamiento de los sustratos orgánicos mediante técnicas como la trituración, la molienda o la hidrólisis enzimática, lo que aumenta la disponibilidad de sustratos para la digestión anaerobia (Hao *et al.*, 2015). Controlar la relación carbono/nitrógeno del sustrato mediante la adición de fuentes de nitrógeno, mejora la actividad microbiana y la producción de biogás (Zhang *et al.*, 2014). La co-digestión de diferentes tipos de sustratos aumenta la diversidad microbiana y mejora la estabilidad del proceso (Nasir *et al.*, 2014). Implementar tecnologías mejoradas de mezcla dentro del reactor, asegura una distribución homogénea de los sustratos y optimiza la eficiencia del proceso (Feng *et al.*, 2018).



Además, reducir la acumulación de inhibidores como ácidos grasos volátiles o amoníaco mediante la adición de adsorbentes o la optimización de las condiciones de operación, mejora la estabilidad del proceso (Luo *et al.*, 2016). Es necesario seguir investigando y desarrollando nuevas alternativas para perfeccionar la digestión anaerobia y adaptarlas a diferentes condiciones y tipos de sustratos orgánicos.

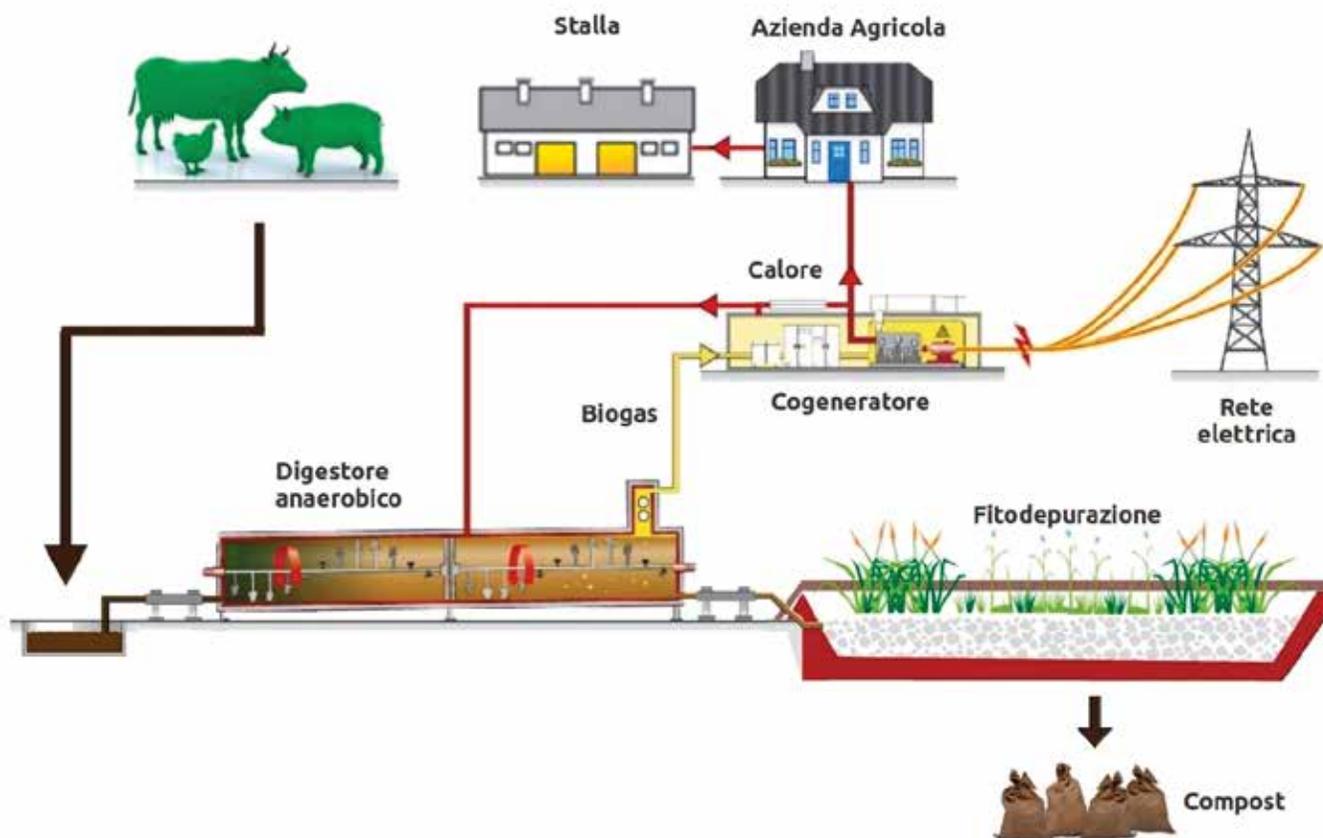
Una de las alternativas a destacar, es la operación del proceso en dos etapas, que divide la descomposición de la materia orgánica en fases específicas: hidrólisis/acidogénesis y metanogénesis (Li *et al.*, 2019). Este enfoque permite ajustar las condiciones de operación para optimizar la actividad microbiana y la conversión de sustratos en biogás, lo que mejora la estabilidad del proceso y la producción de biogás (Wang *et al.*, 2018). Operar el proceso en dos etapas, proporciona condiciones ideales para cada grupo de organismos, lo que resulta en una mayor estabilidad y control del proceso de digestión anaerobia (Rajagopal *et al.*, 2013).



Digestión anaerobia en dos etapas para el tratamiento de residuos de frutas y vegetales

La separación en dos etapas del proceso de digestión anaerobia, responde a la necesidad de optimizar la descomposición de sustratos complejos y maximizar la producción de biogás. La primera etapa, conocida como hidrólisis y acidogénesis, se centra en descomponer materia orgánica compleja en compuestos más simples y ácidos orgánicos. Esta fase facilita la transformación de sustratos difíciles de degradar, como la lignina y la celulosa, en productos más accesibles para los microorganismos. Por otro lado, la segunda etapa, la metanogénesis, se enfoca en la conversión de estos compuestos en biogás, principalmente en metano. El dividir el proceso en dos etapas, permite ajustar las condiciones de pH, temperatura y otros parámetros para maximizar la actividad microbiana en cada fase, lo que resulta en una mayor eficiencia global del proceso y una producción óptima de biogás. Este enfoque se ha demostrado su efectividad en diversos estudios científicos, como los realizados por Rajagopal *et al.* (2013) y Angelidaki y Ahring (1992), respaldando su adopción generalizada en el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de energía renovable.

La tecnología anaerobia depende de biorreactores de alta tasa para su éxito, con diseños adaptados para maximizar la tasa de reacción. Los biorreactores utilizados en estos procesos, varían en su diseño y pueden ser usados en procesos de una sola etapa o de dos, con diferentes temperaturas y dinámicas de fluidos. Los biorreactores deben operar con cargas orgánicas elevadas y sostenibles para maximizar la producción de metano. Algunos de los reactores



discontinuos empleados, son simples y económicos, pero tienen limitaciones en la producción de biogás y en la fluctuación de la calidad de los digestatos.

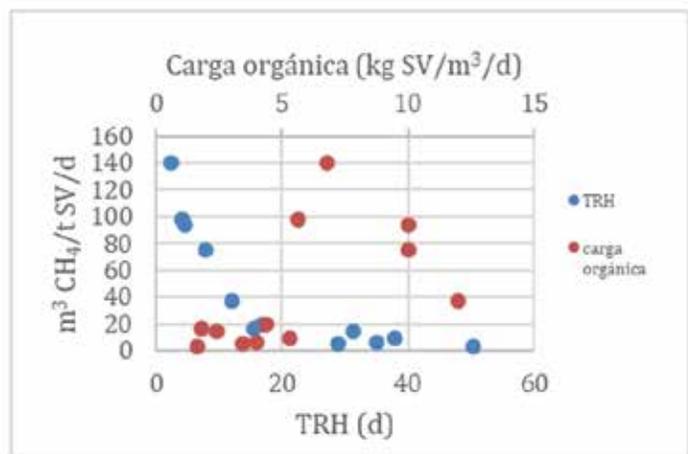
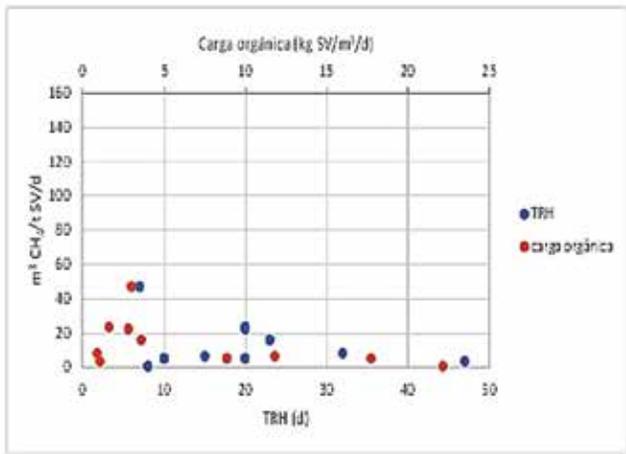
Los tipos de digestores más comunes aplicados en este proceso, incluyen reactores con tanque de agitado continuo, denominados CSTR, reactores anaerobios de flujo ascendente con lecho de lodo, también conocidos como UASB y filtros anaerobios. El diseño y la operación de estos reactores, busca mantener una alta concentración de biomasa activa para lograr tiempos cortos de residencia hidráulica y altas cargas orgánicas. La carga orgánica y el tiempo de retención hidráulico, son parámetros clave para el manejo de los biorreactores, con un equilibrio necesario entre ambos para optimizar la eficiencia de la digestión.

A pesar de los avances en el entendimiento de la dinámica de la digestión anaerobia, los sistemas de una etapa tienen limitaciones en la carga orgánica, debido a la acumulación rápida de ácidos grasos volátiles. Los sistemas de dos etapas permiten tratar mayores cargas orgánicas y alcanzar mejores productividades de metano. Existen diversos procesos y biorreactores para la digestión anaerobia, como los reactores CSTR, reactores tubulares, reactores discontinuos secuenciales anaerobios (ASBR), los UASB y los reactores anaerobios de filtros. Todos ellos difieren en la retención de microorganismos y en el flujo de materiales. Según Montes (2018), se han empleado varios procesos para la digestión anaerobia de residuos de frutas y vegetales. Los resultados indican que los sistemas de una etapa pueden manejar cargas orgánicas de hasta 3 kg SV.m⁻³.d⁻¹, mientras que los sistemas de dos etapas pueden tratar hasta 6 kg SV.m⁻³.d⁻¹ (Figura 1). Sin embargo, la variabilidad entre distintos sistemas de dos etapas es considerable, debido a factores como el tipo de biorreactor utilizado y los tiempos de retención. El tiempo de retención de sólidos es un factor crítico que influye en la adaptación de las células al sustrato a lo largo del tiempo de operación del sistema anaerobio. A pesar de que se tiene un patrón de comportamiento de la productividad de metano con respecto a la carga orgánica y el TRH, hay poca información que nos permita conocer cuál es el efecto del TRS sobre la productividad específica de metano.

Debido a ello, en el Laboratorio de Tecnología Anaerobia se llevó a cabo un trabajo de investigación sobre el tratamiento de residuos de frutas y hortalizas en un sistema en dos etapas, con el objetivo de establecer el efecto del tiempo de retención de sólidos y la carga orgánica sobre la productividad específica

Figura 1

A) Productividad específica de metano contra el TRH y carga orgánica para sistemas de una etapa. Se utilizan reactores de diferente diseño. B) Productividad específica de metano contra el TRH y carga orgánica para sistemas de dos etapas. Se utilizan reactores de diferente diseño (Montes 2018).



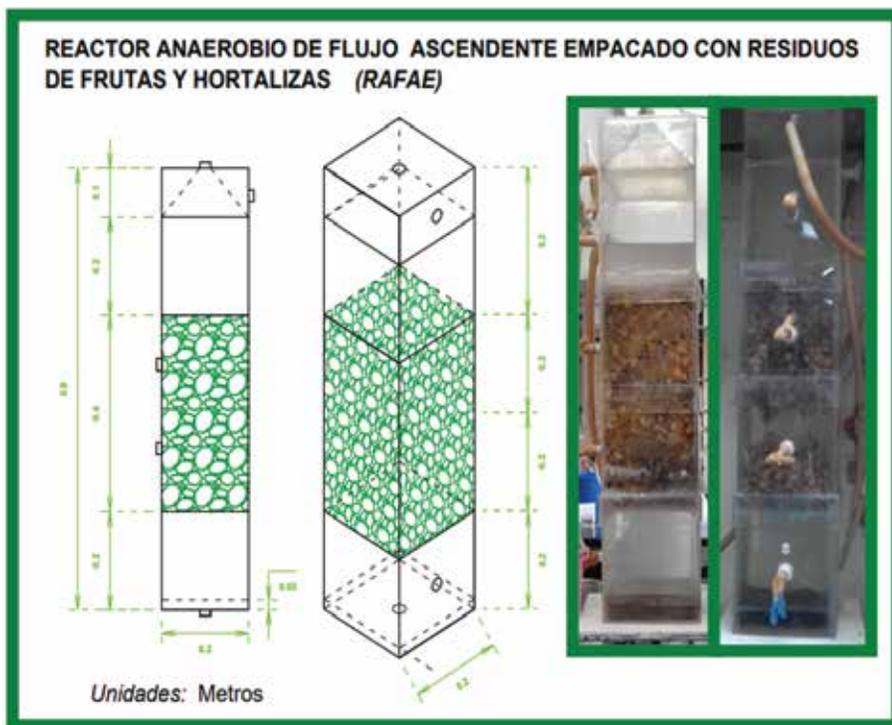


Figura 2

Reactor anaerobio de flujo ascendente empacado (RAFAE).

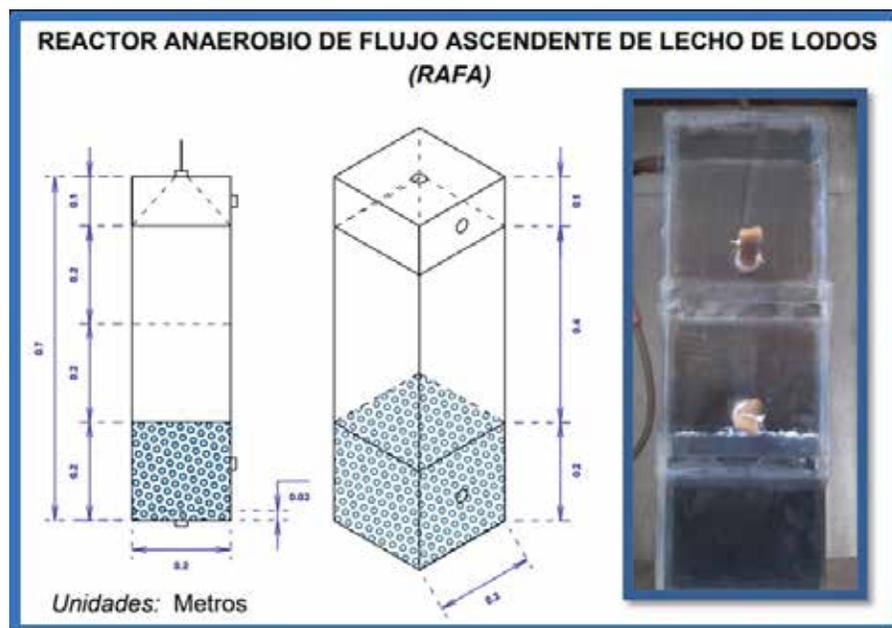


Figura 3

Reactor anaerobio de flujo ascendente con lecho de lodos (RAFA)

de metano. Para lograr este objetivo, se emplearon dos reactores: primero un anaerobio de flujo ascendente empacado (RAFAE), Figura 2, con un volumen de 22 L, en el cual se establecieron las condiciones de operación para favorecer la hidrólisis, la acidogénesis y la acetogénesis (Primera etapa). El segundo reactor fue un anaerobio de flujo ascendente de lecho de lodos (RAFA), con un volumen de 24 L, donde se prepararon las condiciones de operación para llevar a cabo las reacciones de metanogénesis, Figura 3.

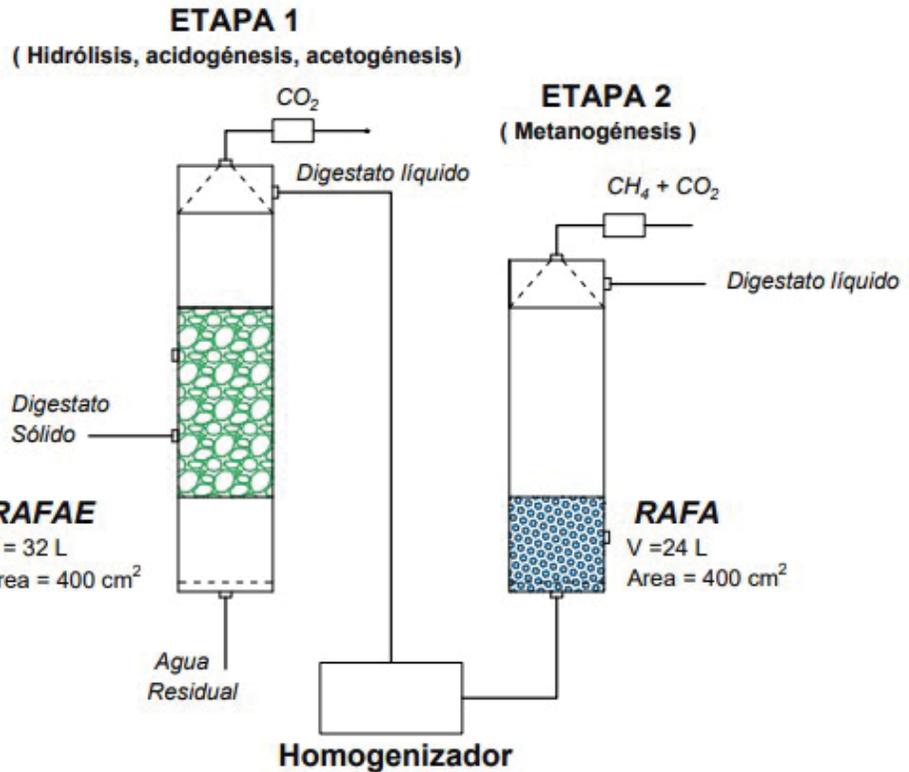


Figura 4

Sistema de digestión anaerobia en dos etapas.

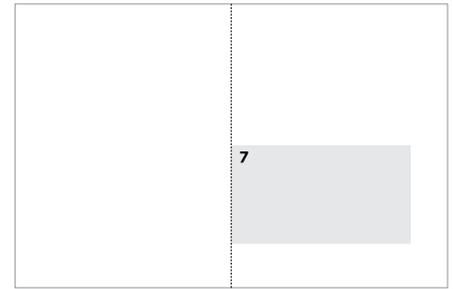
Para operar el sistema en dos etapas (Figura 4), el reactor acidogénico fue alimentado con agua residual doméstica. El sistema contenía un homogeneizador, con una capacidad de 60 L, que recibía el digestato líquido proveniente del reactor acidogénico y se ajustaba el pH a 7 y una vez neutralizado el digestato líquido, se alimentaba al reactor metanogénico. Se establecieron condiciones de operación para cada reactor, considerando aspectos como la velocidad ascensional y el tiempo de retención hidráulico. Con el reactor acidogénico, se logró la conversión de sólidos totales a ácidos grasos volátiles; se registró una inhibición total de la metanogénesis debido a valores de pH por debajo de 5.

Por otro lado, el reactor metanogénico operó con eficiencia de remoción de DQO mayores al 80% bajo ciertas condiciones de operación, mostrando buena remoción de ácido propiónico y una proporción de metano en el biogás del 66%. El sistema de dos etapas mostró características similares a las de los reactores individuales, con buena estabilidad y productividad de metano, entre 2 y 4 L.L⁻¹.d⁻¹. Se concluyó que se pueden resolver los balances de materia de manera desacoplada y que el análisis individual de los reactores minimiza el trabajo de monitoreo de todo el sistema.

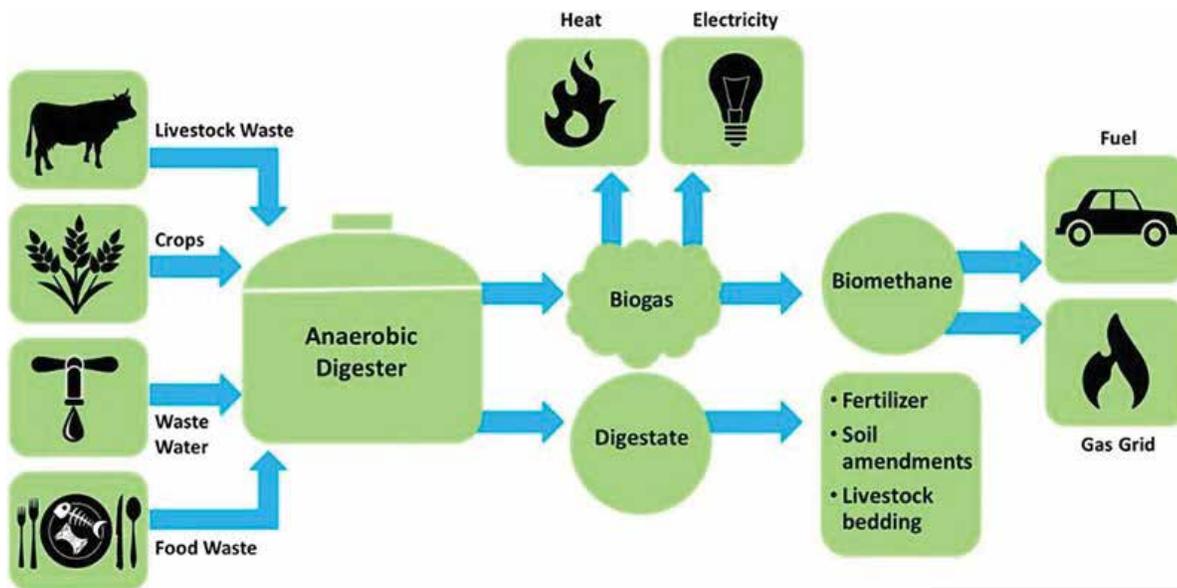
El sistema de dos etapas logró una remoción global del 65% de sólidos volátiles, con una producción de metano de 4 L.L⁻¹.d⁻¹. Con estos resultados, se propusieron proyectos de investigación sobre sistemas en dos etapas, modificando el reactor de la primera etapa con un reactor de mezcla completa, para destacar el estudio de la solubilidad y lixiviación de residuos de frutas y hortalizas.

Conclusiones

La gestión efectiva de residuos sólidos urbanos (RSU) es esencial para combatir los problemas ambientales y de salud pública asociados. En este sentido, la digestión anaerobia emerge como una opción sostenible con potencial para tratar RSOU y producir biogás. Este proceso consta de etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, influenciadas por factores como temperatura, pH, carga orgánica e inhibidores, que deben controlarse para maximizar la eficiencia y producción de biogás. Estrategias como el pretratamiento de sustratos y la co-digestión, han sido desarrolladas para optimizar la digestión anaerobia, mostrando que la operación en dos etapas mejora la estabilidad y producción de biogás. En el Laboratorio de Tecnología Anaerobia se han generado evidencias que señalan que la digestión en dos etapas, optimiza la descomposición de sustratos complejos y la producción de biogás, contribuyendo a una gestión sostenible de los residuos orgánicos y a la producción de energía renovable. Aunque estos resultados son prometedores, se requiere seguir investigando y desarrollando estrategias para adaptar dicho proceso a diversas condiciones y sustratos orgánicos. Este enfoque continuo en la investigación, es vital para enfrentar desafíos emergentes y maximizar los beneficios ambientales y energéticos de la digestión anaerobia en la gestión de RSOU.



<https://spenagroup.com/sistema-digestion-anaerobica-purines-subproductos/>



Fotografías

<https://es.linkedin.com/pulse/la-importancia-de-gesti%C3%B3n-residuos-org%C3%A1nicos-olvideconsulting-ynwdc/>

https://www.researchgate.net/figure/Etapas-de-la-Digestion-Anaerobia-18_fig1_382544403

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014

<https://spenagroup.com/sistema-digestion-anaerobica-purines-subproductos/>

Referencias

- SEMARNAT (2012). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. México.
- Appels Lise, Joost Lauwersa, Jan Degrèvea, Lieve Helsenb, Bart Lievensc, Kris Willemsc, Jan Van Impea, Raf Dewila (2011). "Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4295- 4301
- Montalvo S. y L. Guerrero (2003). *Tratamiento anaerobio de residuos*. Valparaíso. Universidad Técnica "Federico Santa María".
- Varnero, María Teresa (2010). *Manual de biogás*. Editado Proyecto "Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables". Ministerio de Energía.
- Montes García, María Monserrat (2018). Digestión Anaerobia en Dos Etapas de Residuos de Frutas y Vegetales. Tesis de Maestría en Ingeniería Bioquímica, del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. Ecatepec de Morelos, Estado de México.
- Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). "Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants". *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 3(2), 117-129.
- Hansen, K. H., Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1998). "Anaerobic digestion of swine manure: Inhibition by ammonia". *Water Research*, No. 32 (1), 5-12.
- McCarty, P. L., Bae, J., & Kim, J. (2011). Domestic wastewater treatment as a net energy producer - can this be achieved? ("Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer Can This be ..."). *Environmental Science & Technology*, 45(17), 7100-7106.
- Speece, R. E., & McCarty, P. L. (2011). "Anaerobic biotechnology and odor/environmental pollution control". *Water Environment Research*, 83(6), 521-526.
- Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1992). Effects of free ammonia concentration on the anaerobic digestion of glucose. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 37(3), 358-363.
- Rajagopal, R., Masse, D. I., & Singh, G. (2013). "A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia". *Bioresource Technology*, 143, 632-641.
- Hao, W., Wei, Z., & Zhou, L. (2015). "Improvement of biogas production from wheat straw by different pretreatment methods". *Energy Procedia*, 75, 2189-2194.
- Zhang, L., Lee, Y. W., Jahng, D., & Kim, J. (2014). "Effects of carbon to nitrogen ratio on the continuous fermentative hydrogen production from galactose". *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(7), 3249-3256.
- Sawatdeenarunat, C., Surendra, K. C., Takara, D., Oechsner, H., & Khanal, S. K. (2015). "Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities". *Bioresource Technology*, 178, 178-186.
- Nasir, I. M., Mohd Ghazi, T. I., Omar, R., & Wahab, N. A. (2014). "Enhancement of biogas production from co-digestion of palm oil mill effluent with decanter cake in anaerobic batch digester". *Energy Conversion and Management*, 86, 627-634.
- Feng, Y., Zhang, Y., Chen, Y., & Zhao, Y. (2018). "Efficient methane fermentation of ammonia-rich organic slurry via alkaline pretreatment". *Bioresource Technology*, 269, 340-345.
- Luo, G., Angelidaki, I., Zhang, Y., & Zhang, G. (2016). "Effects of operating conditions on the performance of continuous stirred tank reactor digesters treating animal manure". *Energy*, 96, 239-247.