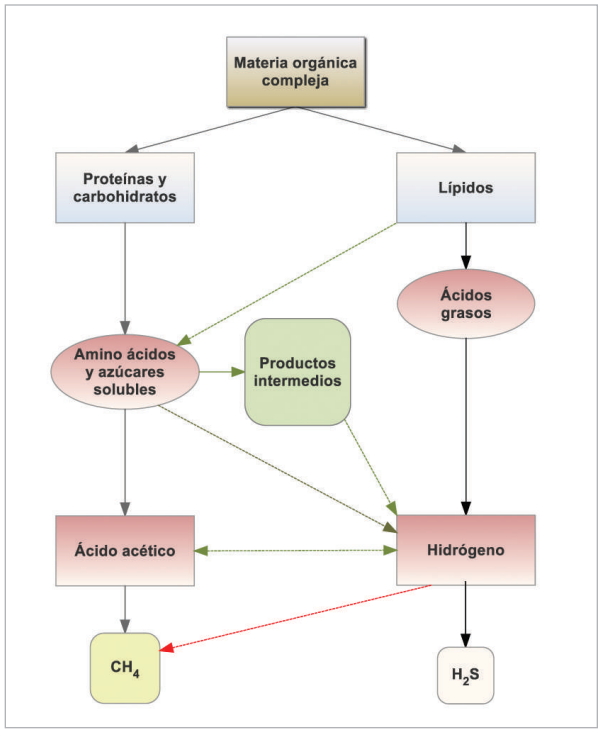
Procesamiento de aguas domésticas e industriales, basura municipal y desechos agroindustriales como productores netos de energía ¿Es posible?

Introducción

La producción de biogás durante la digestión anaerobia[1] de materia orgánica es un sistema ambientalmente positivo y productor neto de energía, cuya aplicación ha incrementado en los últimos años en el tratamiento, tanto de aguas domésticas e industriales, como de basura municipal y desechos agroindustriales incluyendo el estiércol de animales estabulados.

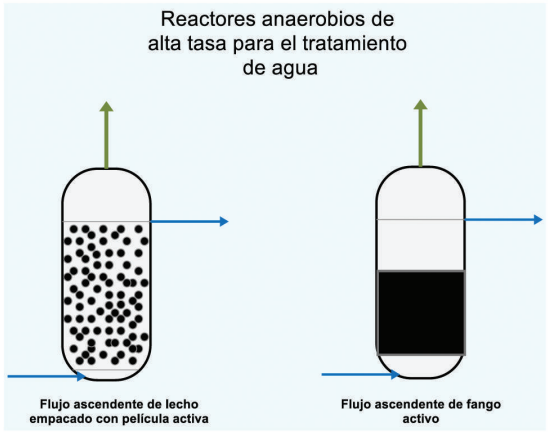
El biogás[2] producido puede utilizarse tal cual como un combustible gaseoso para calentar agua u otros líquidos. También, puede enriquecerse en el contenido de metano, eliminando a su vez algunos gases minoritarios[3] que son corrosivos, de manera que pueda emplearse como combustible en generadores de electricidad. El agua tratada y el residuo sólido contienen nutrientes[4] y por lo tanto pueden emplearse en otros procesos[5] o como fertilizantes orgánicos directamente.

La digestión anaerobia es un proceso bioquímicamente complejo llevado a cabo por un consorcio de microorganismos que funcionan en etapas múltiples: a) la hidrólisis de la amplia gama de compuestos orgánicos[6] se lleva a cabo por bacterias que los transforma en productos solubles; b) otro tipo de bacterias convierte estos compuestos a ácidos orgánicos volátiles[7] hidrógeno y CO_2; c) una acetogénesis[8] causada por bacterias específicas y d) el ácido acético, el hidrógeno y el CO_2 lo transforman arqueas[9] en la mezcla gaseosa del biogás. Una versión reciente del diagrama metabólico se encuentra en la Gráfica 1.

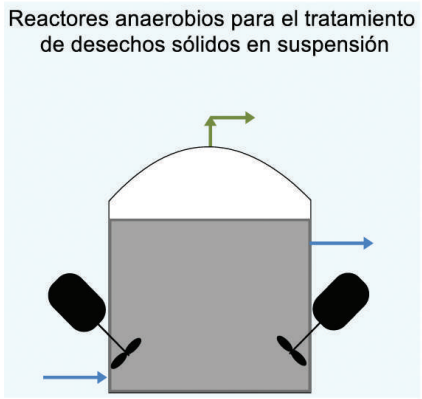


Gráfica 1. Cadena metabólica de la conversión de la materia orgánica en metano

[1] En ausencia de oxígeno.
[2] Mezcla de dióxido de carbono (CO_2) ~60 % y metano (CH_4) ~40%.
[3] Específicamente el sulfuro de hidrógeno (H_2S).
[4] Principalmente nitrógeno y fósforo.
[5] Ver Perspectiva *Usos múltiples de las algas y cianobacterias en el tratamiento del agua* Revista de la Universidad del Valle No. 33, 2016.
[6] Proteínas, polisacáridos, lípidos, y estructuras orgánicas más complejas.
[7] Ácidos acético, propiónico y butírico.
[8] Transformación de ácidos propiónico y butírico en ácido acético.
[9] Arqueas: organismos unicelulares de características particulares y diferentes de las bacterias que las colocan como una forma de vida más en el planeta.



Gráfica 2. Modelos básicos de reactores para el tratamiento de aguas con cantidades bajas de



Gráfica 3. Modelo de reactor anaerobio para el tratamiento de fluídos conteniendo alrededor

El proceso es sensible a su entorno, por ejemplo, la producción del biogás es máxima cuando el pH es neutro. La acidificación de un reactor anaerobio es uno de los problemas serios en la operación ya que la producción de biogás bajo esas condiciones es prácticamente nula. Sin embargo, el metano puede producirse a temperaturas psicrofílicas, mesofílicas y termofílicas[10]. Es pertinente recalcar que el establecimiento y la conservación del consorcio de microorganismos dentro del reactor son esenciales para que el sistema funcione en forma óptima. La puesta en marcha del reactor toma tiempo debido a la adaptación del consorcio a las características de la materia prima y a las peculiaridades del inóculo. Este último generalmente se obtiene de equipo alterno en operación o también de algunas fuentes naturales, como lodos de pantanos y agua estancada, o del estiércol y contenido del rumen de animales rumiantes.

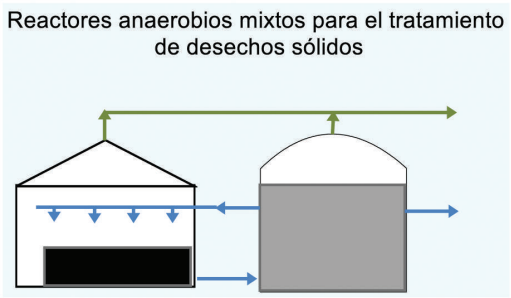
Es importante mencionar que debido a la complejidad biológica del proceso es factible que ocurran problemas operacionales, tales como la inestabilidad, baja eficiencia, y tiempos extensos de retención. Lo anterior se debe a que todavía se encuentra en investigación aquellas variables que es necesario medir y controlar para asegurar una operación continua estable o una operación por lotes repetitiva.

Tipos de reactores

El diseño de los reactores anaerobios o digestores depende en buena medida de las características del material que se procesará. Por ejemplo, aguas de desecho, ya sea municipales, industriales o agroindustriales, previa eliminación de sólidos en suspensión, son adecuadas para tratarse en reactores de alta tasa de producción, los cuales consisten generalmente en cilindros o columnas. Es imprescindible que, durante la operación, la compleja biomasa microbiana permanezca dentro del reactor, de manera que los diseños de reactores comerciales emplean diferentes estructuras internas para lograrlo. Básicamente, como se muestra en la Gráfica 2, existen dos diseños, el denominado *upflow-sludge-bed-anaerobic-reactor, UASB* y el *biofilm-packed-bed-reactor*. En el primero, la biomasa microbiana ha sido inducida a formar gránulos que en conjunto se agrupan formando un fango o lodo en la parte inferior del reactor. En el segundo, la biomasa forma una película alrededor del soporte y el líquido fluye a través de los espacios vacíos. Si el caso lo permite, es posible aumentar el flujo dentro del reactor, de manera que, por un lado, en el primero, el fango o lodo se expanda, y por el otro, en el segundo, el soporte llegue a fluidizarse. Los problemas comunes en la operación consisten, en el primero, la formación de los gránulos y la estabilidad del fango, y en el segundo, la disminución del flujo por bloqueo de los espacios en el soporte. Existen reactores híbridos que aprovechan las bondades de ambos diseños utilizando diversas estructuras internas dentro del reactor.

Los rectores para el tratamiento de desechos sólidos en suspensión o como tales, son más complicados, específicamente por la necesidad de cargar, descargar y mezclar el material sólido adecuadamente dentro del reactor. La fracción orgánica de la basura municipal, el lodo o fango activado de las plantas aerobias del tratamiento aguas y el estiércol de animales domésticos son los desechos que han recibido la mayor atención. La mayoría de reactores emplea tanques de diversas geometrías los cuales están cubiertos por estructuras de membranas que retienen el gas generado y emplean agitadores laterales como se aprecia en la Gráfica 3. En este reactor pueden tratarse materiales con una concentración de sólidos entre 8 a 10 %,

[10] Es decir, en rangos de temperatura $< 20\ ^{o}C$ y entre 20 y 45 ^{o}C y 45 a 60 ^{o}C respectivamente.



Gráfica 4. Esquema de un reactor anaerobio para el tratamiento de sólidos húmedos

de manera que puedan emplearse las bombas comerciales existentes para trasegar la suspensión. Materiales con una concentración mayor de 20 % de sólidos deben ser tratados de una manera diferente, una alternativa consiste en dos reactores interconectados como se muestra en la Gráfica 4. El sólido húmedo se carga al reactor formando una pila empleando un tractor. El reactor se cierra y se asperja por la parte superior el líquido en fermentación del reactor anaerobio adjunto. Dicho fluido percola a través del material sólido y regresa al digestor. El biogás producido de ambos reactores se lleva a su almacenamiento. El proceso de circulación continúa hasta que la tasa de producción de gas llega a un mínimo. Los sólidos residuales se descargan del reactor y empieza un lote nuevo. Este sistema ha sido desarrollado en Alemania, mas existen procesos y diseños alternos como *Valorga, Dranco* y *Kompogas* y otros[11].

Co-digestión

La co-digestión anaerobia consiste en emplear una mezcla de dos o más substratos con características complementarias de manera de lograr una mayor producción de metano debido al sinergismo positivo de la mezcla. Los expertos opinan que la co-digestión es actualmente uno de los temas importantes en la digestión anaerobia debido a la gran disponibilidad de substratos, entre los que se encuentran: el estiércol de animales domésticos estabulados, los fangos o lodos de plantas de tratamiento de agua, la fracción orgánica de la basura municipal y los desechos agrícolas. La co-digestión ofrece varias ventajas como un mejor balance de nutrientes y del cociente C/N, disminución de efectos inhibitorios vía la dilución y un incremento en la producción de metano. A pesar de ello la selección de los substratos y la proporción de los mismos en la mezcla todavía están sujetas a la técnica de probar y errar experimentalmente, debido a que una decisión errada induce con facilidad a una inestabilidad del sistema.

Ejemplos

A continuación, se presentan comentarios relacionados con la aplicación de la digestión anaerobia al tratamiento de los desechos de algunos procesos industriales de interés para el país.

• **Vinazas.** La producción de etanol a partir de melaza o jugo de caña de azúcar genera entre 10 a 15 L de vinazas por L de etanol producido. El tratamiento anaerobio de las vinazas presenta ventajas energéticas y ambientales. Desde la perspectiva ambiental, el tratamiento anaerobio reduce la carga orgánica de ácidos láctico y acético, glicerol, y etanol principalmente, manteniendo el contenido de nutrientes inorgánicos, los cuales son fundamentales para el ferti-riego de los campos. La práctica común en la industria cañera ha sido el de emplear en esta operación la vinaza tal cual, a pesar de que, debido a la carga orgánica presente, se generan en el campo emisiones de gases de invernadero, una contaminación del agua, generación de malos olores y posiblemente, la atracción de plagas. Estudios energéticos al respecto han indicado que la generación de energía del metano producido puede coadyuvar a la co-generación de energía eléctrica y a la substitución del diésel empleado en la maquinaria de cosecha y el transporte. Eventualmente podría liberar el bagazo para producir etanol con tecnología 2G[12].

Pero las vinazas son una mezcla compleja cuya composición varía de acuerdo a la materia prima procesada para producir etanol, sea melaza o jugo de caña, y también durante la zafra, en donde es común encontrar cambios debido al proceso de diferentes variedades de caña, con índices de madurez fluctuantes, crecida en suelos diferentes y cambios en los protocolos de fertilización. A pesar de una serie de experimentos a pequeña escala que han proporcionado datos del rendimiento de metano obtenido, la aplicación industrial del proceso es mínima. En Brasil, el mayor productor de etanol de la caña de azúcar, solamente un ingenio opera un digestor anaerobio de flujo ascendente de fango activo con una capacidad de 5,000 m^3, y el metano se emplea para deshidratar la levadura separada de los fermentadores. Entendemos que un ingenio en el país está operando un biodigestor de alta tasa de producción para tratar las vinazas.

Los expertos opinan que es necesario realizar una mayor investigación al respecto para optimizar el proceso y convertirlo en un tratamiento confiable y robusto a las condiciones existentes. La vinaza muestra en promedio un intervalo de 20,000 a 33,000 mg/L de DQO[13]. El digestor anaerobio operado en forma continua reduce un 70 % de esta carga, produciendo aproximadamente 0.30 Nm^3 de metano por kg de DQO removido[14]. El biogás tiene un contenido de metano cercano a 60 %. La carga al bioreactor oscila entre 4 y 28 kg DQO/m^3 día. Las cifras anteriores son representativas de la experimentación realizada a pequeña escala en varios países.

[11] El lector interesado puede consultar: Fagbohungbe, M.O., Dodd, I.C., Ben M.J. Herbert, B.M.J., Hong, L., Ricketts, L., Semple, K.T. (2015) *High solid anaerobic digestion: Operational challenges and possibilities* Environmental Technology and Innovation 4: 268-284.

[12] 2G = segunda generación, o sea producción de etanol de la lignocelulosa del bagazo.

[13] DQO = demanda química de oxígeno.

[14] Nm^3 = metros cúbicos del gas medidos a condiciones normales, 0 °C y 1 atmósfera.

• **Aguas del beneficiado del café.** El gasto de agua por quintal de café pergamino seco producido es de aproximadamente 1,900 litros, equivalente a 38 litros por Kg, cifra que puede disminuir a 850 litros, o sean 17 litros por Kg, si se efectúa un reciclaje parcial del agua durante las operaciones. Al suponer una producción promedio de 5.24 millones de quintales de café pergamino seco por cosecha (262 millones de Kg), la industria cafetalera emplea entre 4.45 a 9.96 millones de m^3 agua. Si se asigna un valor promedio de 25.0 g/litro de materia orgánica en los efluentes, se estima, entonces, que la industria cafetalera descarga al ambiente entre 425 a 950 g de DQO por Kg de café pergamino, o sean 111,000 a 248,000 Mg (toneladas) de materia orgánica por cosecha.

Un problema del beneficio húmedo de café es que opera entre 3 a 4 meses al año, de manera que el sistema de tratamiento debe procesar el resto del tiempo con otro efluente. La alternativa es utilizarlo para tratar las aguas negras del beneficio y casas aledañas. Lo anterior depende de cada situación en particular.

Ensayos realizados en nuestro laboratorio de la remoción en seco de la pulpa, con el objeto de ahorrar agua, la subsiguiente fermentación del grano despulpado, y el tratamiento anaerobio de las aguas de lavado del grano fermentado nos proporcionaron algunos posibles rendimientos, los cuales se complementaron con los pocos existentes en la literatura pertinente. Lo anterior permitió efectuar algunas estimaciones que se presentan a continuación.

Un beneficio de capacidad alta procesa alrededor de 10,000 sacos de 50 Kg de café cereza diarios. Al operar, por ejemplo, 90 días, procesa 45,000,000 Kg de café cereza, (3.4 % de la cosecha total del país). Despulpar en seco produce 27,000,000 Kg de café despulpado de acuerdo a un rendimiento de 60 %. Luego de la fermentación y el lavado se obtendría un efluente con una carga de 303,750 Kg de materia orgánica a un pH de 4.0. La conversión a biogás de dicha materia orgánica solamente es de un 75 %, o sean 227, 812 Kg. Resultados de la literatura indican que pueden obtenerse de este efluente 0.52 Nm^3 de biogás con 65 % de metano por Kg de DQO removido. La carga al biorreactor estaría alrededor de los 10 kg DQO/m^3 día. Por lo tanto, se producirían 77,000 m^3 de metano, equivalente aproximadamente a 53,782 Kwh de generación eléctrica durante la cosecha. Lo anterior es factible, ¿pero es atractivo? Es necesaria más investigación a mayor escala de operación para confirmar los datos experimentales iniciales.

• **Efluente del procesamiento del fruto de la palma para la obtención del aceite.** El proceso de extracción de aceite requiere en promedio 1.5 m^3 de agua por una tonelada de fruto procesada, aproximadamente la mitad del agua se desecha como el efluente de la planta, el cual, en promedio tiene un pH entre 4.0 y 5.0, valores de 70,000 mg/L de DQO y 30,000 mg/L de DBO[15], alta concentración de compuestos inorgánicos como también proteínas y aceite residual y por ende causa serios problemas ambientales si se vierte directamente a las aguas superficiales. En países del sureste asiático, región mayor productora de este aceite, el sistema de tratamiento más empleado es el de lagunas abiertas, el cual no es satisfactorio, ya que tienen un tiempo de residencia elevado, produce malos olores y genera a la atmósfera gases de invernadero. En dichos países se han llevado a cabo ensayos del tratamiento anaerobio de este efluente a escala piloto de diversas capacidades empleando biorreactores de diferente geometría y operación. Los resultados son prometedores lográndose obtener 0.15 a 0.42 Nm^3 por kg de DQO removido y con una reducción del DQO entre 70 al 97%. La carga al biorreactor estaría entre 1 a 10 kg DQO/m^3 día. Entendemos que una planta extractora en el país está operando un biodigestor para tratar el efluente y generar metano, el cual consiste en una laguna cubierta con techo plástico para guardar el biogás generado, sistema que resulta de menor costo, pero también de menor productividad.

• **Efluente de la industria del hule natural.** El sector hulero en el país produce y exporta caucho y látex concentrado. El procesamiento emplea entre 20 y 30 m^3 de agua por tonelada de producto. El efluente contiene compuestos orgánicos incluyendo proteínas y nitrógeno amoniacal, tiene un pH ácido, mal olor y una DQO entre 3,500 y 26,000 mg/L, dependiendo del proceso y producto final. Se trata en lagunas abiertas con un alto tiempo de residencia y posible emisión de gases de invernadero. Investigadores de Vietnam y Japón han informado de resultados experimentales en un prototipo piloto conformado por un reactor anaerobio con desviadores, seguido de un UASB y luego un reactor de flujo descendente con empaque de esponjas y aerobio. Se logró una reducción alta de la DQO, 98 %, con cargas de 12 kg DQO/m^3 día y una producción de metano de alrededor de 0.10 Nm^3 por kg de DQO removido con una concentración de metano en el biogás de 72 %.

• **Suero de leche.** El suero de leche es el subproducto líquido obtenido en la manufactura del queso que posee una alta carga de material orgánico, principalmente carbohidratos (lactosa), proteínas, grasa y sales minerales, con valores de DQO y DBO de 50,000 a 80,000 y de 40,000 a 60,000 mg/L, respectivamente y un pH entre 6 y 7. Por cada kilo de queso se producen alrededor de nueve kilos de suero. El procesamiento anaerobio de este subproducto ha sido ensayado desde tiempo atrás y existen en operación digestores a escala industrial, aunque debido al alto contenido de carbohidratos y la baja alcalinidad del mismo se acidifica rápidamente creando problemas de estabilidad en el reactor anaerobio. Se ha experimentado con una amplia variedad de geometrías de reactores, logrando, en condiciones óptimas, una producción de metano entre 0.28 a 0.55 Nm^3 por kg de DQO removido, con una reducción del DQO >85 % con cargas alrededor de 10 kg DQO/m^3 día.

• **Efluentes de cervecería.** Existen en operación a escala industrial en varios países una gama de reactores de diferente diseño procesando los efluentes de cervecería. El consumo de agua en diferentes secciones del proceso oscila entre 4 a 11 litros por litro de cerveza producida y el efluente tiene una carga que varía entre 1,200 a 125,000 mg/L de DQO de acuerdo con las características de diseño y operación de la cervecería. El

[15] DBO = demanda biológica de oxígeno

material orgánico presente se biodegrada fácilmente por lo que tiende a acidificarse. Lo anterior causa inestabilidad en el reactor por lo que hay necesidad de controlar el pH empleando diversas técnicas. En un reactor de lecho granular expandido a escala industrial se logró reducir la DQO en 95 %, con cargas de 18 a 26 kg COD/m^3 día y un rendimiento de 0.4 Nm^3 por kg de DQO removido.

• **Efluentes de la curtiembre.** La industria de curtiembre del cuero requiere el empleo de una alta cantidad de agua, como cifra indicativa, alrededor de 30 m^3 por tonelada de materia prima procesada. También incluye la adición de una gran cantidad de productos químicos, alrededor de 300 kg por tonelada de materia prima. Por lo tanto, el efluente del proceso es químicamente complejo, concentrado y tóxico, el cual causa considerable daño ambiental si no recibe algún tipo de tratamiento previo. Debido a la toxicidad presente, la cual se manifiesta también hacia los microorganismos, en el pasado se ha recurrido a métodos químicos de oxidación, los cuales de por sí no han resuelto el problema. Han sido publicadas investigaciones en las cuales el tratamiento del efluente se lleva a cabo en etapas en serie empleando diversas tecnologías, entre las cuales está la digestión anaerobia en reactores de alta tasa de producción. Debido al carácter preliminar de las investigaciones no se ofrece en este trabajo resultados experimentales; el lector interesado podrá consultar la bibliografía respectiva anotada al final.

• **Ejemplos. Co-digestión.** Basten algunos ejemplos para ilustrar el beneficio de juntar materias primas que se complementan y mejoran las condiciones del proceso. Hublin y colaboradores[16] encontraron que las condiciones óptimas de operación para una mezcla de suero de leche y el estiércol de vaca eran: una temperatura de 55 °C, 10 % de suero y el resto de estiércol, y 5 g/L de bicarbonato de sodio con el objeto de mantener el pH adecuado. En 45 días la DQO se redujo en un 56 %, el contenido máximo del metano del gas fue de 79 % y la mayor productividad fue de 1 L/L día. Sharma y colaboradores[17] encontraron que al agregar entre 40 a 60 % de vinazas a la gallinaza aumentaba la cantidad de gas producido y el contenido de metano. Astals y colaboradores[18] encontraron que al adicionar 3 % de glicerol tal cual se produce en las empresas productoras de biodiesel al estiércol de puercos aumentaba la producción específica de biogás, desde un valor de 0.17 L/g de sólidos volátiles iniciales obtenido con el estiércol puro, hasta 0.47 L/g de sólidos volátiles iniciales en la mezcla, causado por una mayor carga al digestor, la biodegradabilidad elevada del glicerol, la reducción leve del amoníaco y un mejor cociente C/N en la mezcla.

Epílogo

La materia orgánica de desperdicio contenida en aguas municipales e industriales, en la basura municipal y los desechos agroindustriales incluyendo el estiércol de animales estabulados no debería catalogarse únicamente como un problema ambiental y social, sino más bien, como una materia prima que habría que aprovechar. La digestión anaerobia productora de metano con la consiguiente generación eléctrica, es una alternativa factible, como sucintamente se ejemplifica en los párrafos anteriores, cuyo potencial y beneficios directos y colaterales deberían definirse mejor en el país a través de una experimentación a todos los niveles, desde el laboratorio, el módulo piloto y la escala industrial.

Bibliografía

Introducción al tema

Abbasi, T., Tauseef, S.M., Abbasi, S.A. (2012) *Anaerobic digestion for global warming control and energy generation-An overview* Renewable and Sustainable Energy Reviews 16: 3228-3242.

Amani, T., Nosrati, M., Sreekrishnan, T.R. (2010) *Anaerobic digestion from the viewpoint of microbiological, chemical, and operational aspects - a review* Environmental Research 18: 255-278.

Batstone, D.J., Virdis, B. (2014) *The role of anaerobic digestion in the emerging energy economy.* Current Opinion in Biotechnology 27: 142-149.

Horvath, H.S. Tabataei, M., Karimi, K., Kumar, K. (2016) *Recent updates on biogás production – a Review* Biofuel Biofuel Research Journal 10: 394-402.

Martins-das-Neves, L.C., Converti, A., Vessoni-Penna, T.C. (2009) *Review Biogas Production: New Trends for Alternative Energy Sources in Rural and Urban Zones Chemical* Engineering and Technology 32 (8): 1147-1153.

Tipos de reactores

Abbasi, T., Abbasi, S.A. (2012) *Formation and impact of granules in fostering clean energy production and wastewater treatment in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors* Renewable and Sustainable Energy Reviews 16: 1696-1708.

Chong, S., Sen, T.K., Kayaalp, A., Ang, H.M. (2012) *The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment - A State-of-the-art review* Water Research 46: 3434-3470.

Deublein, D., Steinhauser, A. (2008) *Biogas from waste and renewable resources* Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Escudié, R., Cresson, R., Delgene`s, J-P., Bernet, N. (2011) *Control of start-up and operation of anaerobic biofilm reactors: An overview of 15 years of research* Water Research 45: 1-10.

Foresti, E., Zaiat, M., Vallero, M. (2006) *Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges* Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 5: 3-19.

[16] Hublin, A., Zokic, T.I., Zelic, B. (2012) *Optimization of Biogas Production from Co-digestion of Whey and Cow Manure* Biotechnology and Bioprocess Engineering 17: 1284-1293.

[17] Sharma, D., Espinosa-Solares, T., Huber, D.H. (2013) *Thermophilic anaerobic co-digestion of poultry litter and thin stillage* Bioresource Technology 136: 251-256.

[18] Astals, S., Nolla-Ardevol, V., Mata-Álvarez, J. (2013) *Thermophilic co-digestion of pig manure and crude glycerol: Process performance and digestate stability* Journal of Biotechnology 166: p. 97-104.

Leitao, R.C., van Haandel, A.C., Zeeman, G., Lettinga, G. (2006) *The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review* Bioresource Technology 97: 1105-1118.

Lim, S.J., Kim, T.-H. (2014) *Applicability and trends of anaerobic granular sludge treatment processes* Biomass and Bioenergy 60: 189-202.

Loupasaki, E., Diamadopoulos, E. (2013) *Attached growth systems for wastewater treatment in small and rural communities: a review* Journal of Chemical Technology and Biotechnology 88: 190-204.

Nicolella, C., van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J. (2000) *Wastewater treatment with particulate biofilm reactors* Journal of Biotechnology 80: 1-33.

Rajeshwari, K.V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K., Kishore, V. V.N. (2000) *State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment* Renewable and Sustainable Energy Reviews 4: 135-156.

Co-digestión

Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S., Astals, S. (2011) *Co-digestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling* Critical Reviews in Biotechnology 31: 99-111.

Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M.S., Fonoll, X., Peces, M., Astals, S. (2014) *A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013* Renewable and Sustainable Energy Reviews 36: 412-427.

Xie, S., Hai, F.I., Zhan, X., Guo, W., Ngo, H.H., Price, W.E., Nghiem, L.D. (2016) *Anaerobic co-digestion: A critical review of mathematical modelling for performance optimization* Bioresource Technology 222: 498-512.

Ejemplos. Vinazas

Moraes, B.S., Junqueira, T.L., Pavanello, L.G., Cavalett, O., Mantelatto, P.E., Bonomi, A., Zaiat, M. (2014) *Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense?* Applied Energy 113: 825-835.

Moraes, B.S., Zaiat, M., Bonomi, A. (2015) *Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives* Renewable and Sustainable Energy Reviews 44: 888-903.

Ejemplos. Aguas del beneficiado del café

Bruno, M., de Oliveira, R.A. (2008) *Tratamento anaerobio de aguas residuarias do beneficiamento de cafe por via umida em reatores UASB em dos estagios* Eng Agríc Jaboticabal 28: 364-377.

Ciotola, R.J., Lansing, S., Martin, J.F. (2011) *Energy analysis of biogas production and electricity generation from small-scale agricultural digesters* Ecol Eng 37: 1681- 1691.

Houbron, E., Larrinaga, A., Rustrian, E. (2003) *Liquefaction and methanization of solid and liquid coffee wastes by two phase anaerobic digestion process* Water Sci Technol 48: 255-262.

Selvamurugan, M., Doraisamy, P., Maheswari, M. (2010) *An integrated treatment system for coffee processing wastewater using anaerobic and aerobic process* Ecol Eng 36: 1686-1690.

Ejemplos. Efluente del procesamiento del fruto de la palma.

Ahmed, Y., Zahira, Y., Akhtar, P., Kamaruzzaman, S. (2015) *Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME)* Renewable and Sustainable Energy Reviews 42: 1260-1278.

Chan, Y.J., M.F. Chong, Law, C.L. (2012) *An integrated anaerobic-aerobic bioreactor (IAAB) for the treatment of palm oil mill effluent (POME): Start-up and steady state performance* Process Biochemistry 47: 485-495.

Choi, W.H., Shin, C.H., Son, S.M., Ghorpade, P.A., Kim, J.J., Park, J.Y. (2013) *Anaerobic treatment of palm oil mill effluent using combined high-rate anaerobic reactors* Bioresource Technology 141: 138-144.

Ohimain, E.I., Izah, S.C. (2017) *A review of biogas production from palm oil mill effluents using different configurations of bioreactors* Renewable and Sustainable Energy Reviews 70 242-253.

Tabassum, S., Zhang, Y., Zhang, Z. (2015) *An integrated method for palm oil mill effluent (POME) treatment for achieving zero liquid discharge - A pilot study* Journal of Cleaner Production 95: 148-155.

Wanitanukul, S., Rukruem, W., Chaiprasert, P. (2013) *Effect of Operating Condition on Performance of Anaerobic Hybrid Reactor at Thermophilic Temperature* Journal of Energy Technologies and Policy 3: 211-219.

Ejemplos. Efluente de la industria del hule natural

Nguyen, N.H., Luong, T.T. (2012) *Situation of wastewater treatment of natural rubber latex processing in the Southeastern region, Vietnam* Journal of Vietnamese Environment 2 (2): 58-64.

Watari, T., Thanh, N.T., Tsuruoka, N., Tanikawa, D., Kuroda, K., Huong, N.L., Tan, N.M., Hai, H.T., Hatamoto, M., Syutsubo, K., Fukuda, M., Yamaguchi, T. (2016) *Development of a BR-UASB-DHS system for natural rubber processing wastewater treatment* Environmental Technology, 37: 459-465.

Ejemplos. Suero de leche

Chatzipaschali, A.A., Stamatis, A.G. (2012) *Biotechnological utilization with a focus on anaerobic treatment of cheese whey: current status and prospects* Energies 5: 3492-3525.

Karadag, D., Ko_rog_lu, O.E., Ozkaya, B., Cakmakci, M. (2015) *A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater* Process Biochemistry 50: 262_271.

Panesar, P.S., Kennedy, J.F. (2012) *Biotechnological approaches for the value addition of whey* Critical Reviews in Biotechnology 32: 327-348.

Ejemplos. Efluentes de cervecería

Radu, T., Blanchard, R., Smedley, V., Theaker, H., Wheatley, A. (2014) *Monitoring anaerobic digestion: a 2-year brewery case study* Journal of Environmental Engineering and Science 9 (4): 207 - 213.

Ejemplos. Efluentes de la curtiembre

Durai, G, Rajasimman, M. (2011) *Biological treatment of tannery wastewater - a Review* Journal of Environmental Science and Technology 4 (1): 1-17.

El-Sheik, M.A., Saleh, H.I., Flora, J.R., AbdEl-Ghany, M.R. (2011) *Biological tannery wastewater treatment using two stage UASB reactors* Desalination 276: 253-259.

Lefebvre, O., Vasudevan, N., Torrijos, M., Thanasekaran, K., Moletta, R. (2006) *Anaerobic digestión of tannery soak liquor with an aerobic post-treatment* Water Research 40: 1492-1500.

Liu, W-H., Xhang, C-G., Gao, P-F., Liu, H., Song, Y-Q., Yang, J-F. (2017) *Advanced treatment of tannery wastewater using the combination of UASB, SBR, electrochemical oxidation and BAF* Journal of Chemical Technology and Biotechnology 92: 588-597.

Umaiyakunjaram, R., Shanmugan, P. (2016) *Study on submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR) treating high suspended solids raw tannery wastewater for biogas production* Bioresource Technology 216: 785-792.

Carlos Rolz
Editor

Comentario de Perspectiva

Dr. Oscar A. Monroy Hermosillo
Departamento de Biotecnología
Universidad Autónoma Metropolitana, México
monroy@xanum.uam.mx

Mi inmediata y única respuesta a la pregunta del Editor es afirmativa; sí es posible la producción neta de energía a partir del procesamiento anaerobio de la materia orgánica presente en aguas residuales domésticas e industriales, residuos municipales y agroindustriales. La tecnología anaerobia es especialmente útil para las pequeñas agroindustrias y urbanizaciones ya que permite aprovechar los residuos orgánicos, reciclando nutrientes al suelo generando energía para el tratamiento subsecuente del agua residual, y de esta manera evita la contaminación. Al no requerir equipo mecánico tiene un bajo costo de operación y mantenimiento.

La digestión anaerobia, es una tecnología sustentable por naturaleza al permitir el tratamiento descentralizado que a su vez induce la generación descentralizada de energía porque permite multiplicar las actividades humanas que hoy solo se realizan mediante las redes de distribución eléctrica o de combustibles fósiles.

Sin embargo, esta tecnología, a pesar de ser muy estudiada tiene un largo camino que recorrer para poderse implementar al nivel descentralizado debido a tres limitantes:

1.Recolección y separación eficiente de los residuos orgánicos

a. Sólidos, la separación de los residuos sólidos orgánicos desde la fuente es imprescindible para la viabilidad económica. La tendencia mundial va en la dirección correcta, afortunadamente.

b. Agua, Tanto las aguas industriales como las domésticas deben tratarse por separado para aprovechar las corrientes concentradas en materia orgánica y hacer el tratamiento descentralizado para maximizar la recuperación de metano y facilitar el postratamiento para reuso o vertido a la naturaleza[1].

2. Diseño de procesos robustos (de operación sencilla y confiable, con mínimo mantenimiento)

a. Pretratamientos, sin necesidad de consumir recursos externos ya que la materia orgánica residual puede brindar los nutrientes y la energía para las operaciones mecánicas, enzimáticas y térmicas. Aquí el tema de la codigestión de los residuos es de suma importancia para la valoración eficaz de cualquier cantidad de residuos y la optimización del proceso por la aportación de cada componente de la mezcla para un correcto balance de C y N principalmente.

b. Reactores anaerobios para sólidos (retención de biomasa), si bien los reactores anaerobios para aguas residuales tienen gran capacidad para retener la biomasa activa y lograr cortos tiempos de residencia, en los reactores de residuos sólidos la separación entre la biomasa activa y los sólidos orgánicos suspendidos no es tan obvia, de ahí que los tiempos de residencia se tengan que ajustar a la velocidad de crecimiento de la biomasa activa. La respuesta la está dando la digestión anaerobia en dos etapas aprovechando los cortos tiempos de reproducción de las bacterias que realizan la hidrólisis y la acidogénesis a una alta tasa dejando material soluble para que en una segunda etapa metanogénica, y se puedan separar la biomasa del sustrato logrando cortos tiempos de residencia.

c. Acondicionamiento y usos del biogás. Para potenciar el interés en la digestión anaerobia el biogás debe ser usado de manera sistemática para que represente una ventaja. Dependiendo del sustrato y del uso que se le quiera dar, el acondicionamiento del biogás puede requerir un proceso complejo. Si el sustrato contiene azufre, lo más conveniente es que pase al biogás y de ahí separarlo mediante biofiltros para evitar contaminar la atmósfera. Para la generación de calor no se requiere un tratamiento adicional. Si los usos son para alimentar motores de combustión interna se requiere además obtener un biogás con contenido de CH_4 mayor al 60%, lo que implica remover vapor de agua y CO_2. En todos los casos se requiere un almacenamiento antes y después del tratamiento para tener flujos controlados para el acondicionamiento y para el uso[2].

3. Uso del agua tratada.

Los procesos de tratamiento de aguas residuales deben tener como objetivo el reuso del agua, en circuitos cerrados (en el proceso industrial, en la agricultura, urbano) o en circuitos abiertos (reincorporación al ciclo hidrológico, lagos, acuíferos y el mar) para los cuales el agua debe tener las características adecuadas. Para esto debe existir un manejo integral del agua que considere sus diversos usos[3].

Referencias

1. Zeeman, G., Kujawa, K., De Mes, T., Hernández, L., De Graaff, M., Abu-Ghunmi, L., Mels, A., Meulman, B., Temmink, H., Buisman, C., Van Lier, J., Lettinga, G. (2008) *Anaerobic treatment as a core technology for energy, nutrients and water recovery from source-separated domestic wastewater* Water Sc. Technol. 57(8): 1207-1212

2. Arellano, L., Dorado, A., Fortuny, M., Gabriel, D., Gamisans, X., González-Sánchez, A., Hernández, S., Lafuente, J. Monroy, O., Revah, S., Sierra, H. (2016) Purificación y usos del biogás, *Purification and use of biogas,* Universitat Autónoma de Barcelona. 08193 Bellaterra Barcelona, España, Dipòsit legal: B-2677-2017, ISBN 978-84-490-6961-1

3. Monroy Hermosillo, O. (2013) *Manejo sustentable del agua en México,* 14, 10:| ISSN 1607 - 6079 http://www.revista.unam.mx/vol.14/num10/art37/index.html