

Para una correcta selección y explotación de digestores anaerobios

Sarah Barreto Torrella

Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Camagüey

sara.barreto@reduc.edu.cu

RESUMEN

La digestión anaerobia es un proceso atractivo para el tratamiento de residuos, por su efecto depurador y la posibilidad de obtener biogás. Se analizan las tecnologías empleadas con este fin y las principales restricciones de su aplicación, relacionadas con las características del residuo. También se ofrecen requerimientos técnicos específicos tales como: carga orgánica, tiempo de retención hidráulico y de la biomasa así como la eficiencia que alcanzan. Se pretende facilitar la selección de estos reactores y contribuir a mejorar e incrementar su explotación.

Palabras clave: *digestor anaerobio, biogás, digestores, eficiencia*

Anaerobic Digesters: Current Use

ABSTRACT

Anaerobic digestion is an attractive process for residual treatment due to its cleansing effect and the possibility of obtaining biogas. In this research paper, the technologies applied to this end and the main limitations in their applicability imposed by the residuals characteristics are assessed; besides, a number of specific technical requirements such as organic load, hydraulic and biomass retaining time, and the indicators efficiency are dealt with. The research is aimed at a better selection of this kind of reactors as well as the improvement and increase of their exploitation.

Key words: *anaerobic digester, biogas, digesters, efficiency*

INTRODUCCIÓN

La digestión anaerobia —independientemente de que desactiva los lodos de plantas depuradoras y reduce su volumen, haciendo más económica su disposición— es más eficiente que la aerobia, pues demanda menor cantidad de energía y es capaz de producir metano, portador energético para diferentes usos (Barreto, 2007). Este proceso se emplea cada vez más para el aprovechamiento de residuos, lo mismo en plantas familiares que en granjas o como producción centralizada de biogás o codigestión de residuos (Barreto, 2006; Barreto, 2007a; Barreto, 2007b).

En Cuba se han empleado diferentes tipos de reactores; los más usados han sido los convencionales, aunque también existen experiencias con digestores de alta tasa (Valdés, 2000).

Entre los factores que han influido en el deficiente empleo de esta tecnología y en el abandono de las plantas se destacan la falta de información y de capacitación del personal relacionado con su diseño y explotación (Barreto, 2004; Barreto, 2005).

En este trabajo se abordan las tecnologías disponibles, sus restricciones en cuanto a las características de la carga, de la materia prima de carga y tiempo de retención, así como la eficiencia que se

puede alcanzar en su explotación. Asimismo se analiza su aplicación hasta el momento, lo cual facilita la selección y explotación de los reactores.

DESARROLLO

Digestores anaerobios empleados en la actualidad

Los procesos de digestión anaerobia pueden clasificarse según los sólidos totales (ST) en el reactor, a saber: sistemas de bajo contenido de sólidos (menos de un 10 % de ST), medio (aproximadamente de 15 % a 20 %), y alto (de 22 % a 40 % de ST). También pueden categorizarse a partir del número de reactores empleados, en: una fase (están presentes todas las fases del proceso de digestión en un mismo reactor) y multifase, cuando las fases del proceso se realizan en reactores diferentes. Otro modo de clasificación es según la forma en que se cargan: batch o continuos (Themelis, 2002).

Ndom y Dague (1997) señalan como principales desventajas de la digestión anaerobia en digestores convencionales mezclados, la baja tasa de crecimiento de los organismos anaerobios, que no resulta factible para tratar residuales de baja concentración (demanda química de oxígeno < 1 000 mg/L). Además, se requiere de una tem-

peratura relativamente alta para que el proceso sea eficiente.

Los digestores convencionales han encontrado una limitada aplicación para uso industrial por su baja eficiencia, gran volumen y la cantidad de área que ocupan (Zuxuan *et al.*, 1985).

En Cuba los reactores que más se han empleado son los convencionales, aunque existen digestores que trabajan en dos etapas. Para tratar residuales porcinos se construyeron digestores de manto de lodo de flujo ascendente, los cuales no están funcionando; aunque en Villa Clara y en Ciego de Ávila se utilizan estos últimos para el tratamiento de vinazas (Valdés, 2000).

Todos los procesos modernos de alta velocidad de metanización se basan en el concepto de la retención de biomasa altamente viable por alguna forma de inmovilización del lodo bacteriano. Esto puede lograrse con alguno de los siguientes métodos:

- Formación de agregados de lodo altamente sedimentables combinado con la separación del gas y la sedimentación del lodo, Ej. digestores de flujo ascendente en manto de lodo y reactores anaerobios con pantallas.
- Bacterias adheridas a partículas de alta densidad de materiales transportados, Ej. reactores de lecho fluidizado y de cama expandida.
- Retención de los agregados del lodo entre el material de soporte suministrado al reactor, Ej. filtros anaerobios de flujo descendente y filtros anaerobios de flujo ascendente (Rajeshwari *et al.*, 2000).

En la Tabla 1 se muestran las características de estas tecnologías.

Procesos convencionales

El reactor convencional es el más utilizado en los países de pocas posibilidades económicas. Estos digestores generalmente trabajan a flujo discontinuo, y debido a que no se agitan, poseen cierta estratificación. Requieren de altos tiempos de retención hidráulicos y de edades del lodo (Menéndez y Pérez, 1991). En un proceso convencional el tiempo de residencia del lodo nunca podrá ser inferior de 7 a 12 días (Danesh *et al.*, 2000). Hernández (1987) plantea que debe estar en el rango de 20 a 55 días. A juicio de la autora de este artículo, 20 días es suficiente, puesto que la temperatura promedio anual en Cuba es de 25 °C, donde los meses más fríos son enero y febrero, con una temperatura promedio de 22 °C, y

el mes más caluroso es agosto, con aproximadamente 28 °C (INSMET, 2006). Según Mamie y Lau (1985) a estas temperaturas se alcanza la máxima tasa de producción de gas; si se tiene en cuenta este factor, el costo de inversión de las plantas resulta menor sin afectar la productividad.

La carga en estos casos se lleva a cabo normalmente una vez al día. Se ha comprobado experimentalmente que una carga que contenga entre 7 y 9 % de ST es óptima para la digestión del sistema. De estos sólidos, normalmente entre un 77 y un 90 % son materia orgánica biodegradable y se denominan “sólidos volátiles” (SV) (Hernández; 1987). En el caso de las excretas vacunas los SV resultan de 64 a 75 % de los ST (Barreto *et al.*, 2004; Barreto y Rodríguez, 2005). En Cuba se han obtenido efectos de remoción de SV de 50 a 80 % y de 50 a 70 % de la DQO al tratar por este medio residuales de ganado, según datos de Pérez *et al.* (2000), Chao *et al.* (2003), Barreto *et al.* (2004) y Barreto y Rodríguez (2005).

Estas condiciones de operación dan lugar a que la eficiencia en la remoción de la materia orgánica sea baja con producciones de biogás que no sobrepasan 1,5 m³ de biogás por m³ de reactor. Las variantes de estos tipos de digestores se emplean para el tratamiento de residuos sólidos y la estabilización de lodos. Ejemplos de los mismos son los digestores de cúpula fija y campana móvil, desarrollados en China y la India, respectivamente (Pérez *et al.*, 2000).

Digestores de flujo pistón

En un digestor flujo pistón los residuos pasan a través del digestor de forma secuencial, desde la entrada hasta la salida. Se nombran de ese modo aquellos digestores sin mezclado y tubulares. El material sólido tiende a moverse a través del digestor en forma secuencial, mientras que la fracción líquida se mezcla más rápidamente (Srinivasan y Sansalone, 2004). Hernández (1987) agrega que los digestores horizontales o digestores de flujo pistón o de flujo de émbolo, generalmente se construyen enterrados, poco profundos y alargados, semejantes a un canal o túnel. Su sección transversal es cuadrada, circular o en forma de V, donde la relación largo:ancho es de aproximadamente 5:1 hasta de 8:1. Este tipo de diseño se opera a régimen semicontinuo donde la carga se introduce por un extremo del digestor y la descarga se produce hidrostáticamente por el extremo opuesto. Lusk (1999) recomienda que la concen-

tración de sólidos totales en el substrato sea de 11 a 13 %.

Lagunas tapadas

El metano que produce una laguna anaerobia es capturado mediante la instalación de una cubierta impermeable sobre la misma. La cubierta puede colocarse sobre toda la laguna o sobre aquella parte donde se produce más cantidad de metano. Alrededor del 18 % de los digestores empleados actualmente en EE. UU. son de este tipo (Balsam, 2006).

Digestores anaerobios con retención de biomasa suspendida

La clave para el incremento de la factibilidad económica del tratamiento de aguas residuales diluidas, según Zhang *et al.* (1997), está en la separación de los tiempos de retención hidráulico y de los sólidos así como de la retención de suficiente biomasa sólida en el reactor con pequeños tiempos de retención, mediante digestores de contacto anaerobio y UASB.

El autor señala que un reactor anaerobio completamente mezclado emplea un clarificador externo para separar parte de los sólidos del efluente y recircularlos al reactor para asegurar un tiempo de retención de los sólidos superior al tiempo de retención hidráulico y agrega que la desventaja de los digestores convencionales consiste en el costo adicional asociado a este clarificador externo y los requerimientos adicionales que esto implica. En la Tabla 1 uno se ofrecen las características de estos reactores.

Digestores anaerobios bach secuenciales

Los digestores anaerobios bach secuenciales constituyen un proceso de tratamiento anaerobio de alta tasa que puede ser operado a varios números de secuencias por día. Cada frecuencia de operación en este reactor incluye los siguientes pasos: alimentar, reaccionar, sedimentar y decantar (Ndon y Dague, 1997). Los autores aseguran que este tipo de reactor puede ser efectivo para tratar residuales de baja concentración¹ (DQO < 1 000 mg/L), asimismo su empleo es factible para tratar residuales de animales, incluidos los de porcino, con concentraciones de sólidos totales inferiores al 2 %, para lo cual recomiendan un tiempo de retención hidráulico de tres días, tasas de carga de

sólidos volátiles de 5,5 g/L/día a 25 °C (el rango apropiado, según los autores, es de 2 a 6 kg/m³/día y el recomendado de 3 a 4 kg/m³/día) (Zhang; 1997). Estos autores recomiendan la remoción de materiales lignocelulósicos poco degradables y de sólidos inertes antes del digestor anaerobio. Asimismo señalan que se han obtenido buenos resultados con cuatro alimentaciones al día y con media hora para la fase de sedimentación. Bajo las condiciones descritas se espera una remoción de sólidos volátiles de 40 a 60 %. En el caso de residuales líquidos de porcinos recomiendan almacenar el estiércol inicialmente en un tanque de mezclado/alimentación, antes de dosificarlo al digestor, y que el volumen de ese tanque debe ser lo suficientemente grande para garantizar el almacenamiento de una cantidad de estiércol superior a dos alimentaciones del reactor. En el caso de que la concentración de amonio sea superior a 1 500 mg/L, recomiendan adicionar agua limpia para disminuir su concentración y evitar el efecto inhibitorio que causa el amonio en las bacterias metanogénicas.

Digestor UASB

Lettinga *et al.* (1997) consideran que de los sistemas de alta tasa resultan los más prometedores para el tratamiento de aguas residuales: los reactores de manto de lodo ascendentes en sus diferentes variantes (lecho de lodos granular expandido (EGSB), sistema anaerobio por fases “multi fase” (SMPA), etc.), por ser una tecnología de bajo costo y aplicable para casi cualquier tipo de residuales: (calientes o fríos, solubles o parcialmente solubles, de alta o de muy baja fortaleza, complejos o no) y aguas residuales domésticas.

Su mayor ventaja consiste en que demanda menor inversión comparado con los filtros anaerobios o los digestores de lecho expandido. También posee desventajas notables, como su necesidad de largos periodos de puesta en marcha y de suficiente cantidad de lodo semilla granular para una puesta en marcha más rápida (Rajeshwari, 2000).

El Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar ha desarrollado una tecnología de producción de biogás basada en reactores del tipo UASB, de origen holandés, con la cual se encuentra construida una planta, única de su tipo en Cuba, de 3 000 m³ de capacidad, para el tratamiento de las aguas residuales de la Empresa Mielera *Heriberto Duquesne*, en Remedios,

¹ Soto *et al.* (1997) dicen que los residuales diluidos o de baja concentración son aquellos con una DQO inferior a 2 000 mg/L.

Tabla 1. Características de los diferentes tipos de reactores (Rajeshwari *et al.*, 2000)

Tipo de reactor anaerobio	Reciclaje del efluente	Separación gas/sólido	Velocidades de carga típicas kg de DQO/m ³ /día	Tiempo de retención hidráulico, días	Empacado
CSTR	No	No	0,25 - 3	10-60	No esencial
Contacto	No	No	0,25 - 4	12-15	No esencial
UASB	No	Esencial	10 - 30	0,5-7	No esencial
Filtro anaerobio	No	Beneficioso	1- 40	0,5-12	Esencial
AAFEB	Sí	No	1-50	0,2-5	Esencial
AFB	Sí	Beneficioso	1-100	0,2-5	Esencial

Leyenda: CSTR Continuous Stirred Tank Reactor, UASB Upflow Anaerobic Sludge Blanket, AAFEB Anaerobic Attached-Film Expanded-Bed Reactor, AFB Anaerobic Fluidized Bed

Villa Clara. La planta está concebida para tratar 800 m³ de vinazas, y producir 16 000 m³ de biogás (Obaya *et al.*, 2001).

Sistema EGSB (Expanded Granular Sludge Bed)

Es una variante del sistema UASB que incluye la recirculación interna del efluente.

La cama de lodo granular es expandida y el mezclado hidráulico es intensificado con el objeto de mejorar el contacto biomasa-sustrato; la velocidad ascensional es de 5 a 6 m/h, mientras que en los UASB es de 0,5 a 1,5 m/h.

El EGSB utiliza una cama de lodo parcial o totalmente expandida. Son atractivos para el tratamiento de aguas residuales de baja fortaleza (DQO < 2 000 mg/L). Por sus sofisticadas formas de distribución del sustrato y por su altura, este tipo de reactor tiene altos costos de inversión. Son atractivos también en lugares con poca disponibilidad de área y donde no sea posible aplicar un sistema convencional por su alta relación diámetro/altura (Obaya y Valdés; 1999).

Filtros anaerobios

El campo de aplicación es similar al de los UASB. Los filtros con flujo descendente no pueden usarse para tratar vertidos con fracciones apreciables de sólidos en suspensión (Rozzi, 1988).

Este tipo de digestor posee eficiencias de remoción de la DQO del 70 al 90 %. En un reactor de este tipo empleado por la compañía Bacardí en Puerto Rico con una carga orgánica de alrededor de 10 kg de DQO/L x día se obtienen remociones de la DBO del 70 al 80 % (Álvarez, 1991).

Digestores de dos fases

La digestión en dos fases estabiliza el proceso anaerobio y mejora su eficiencia. Se han obtenido a nivel de laboratorio 20 m³/m³ de biogás a partir de vinazas de destilerías de alcohol, con una con-

centración de DQO de 30 000 mg/L y un tiempo de retención hidráulica de 15 horas (Zuxuan *et al.*, 1985).

El Instituto Cubano de Investigaciones Azucareiras ha empleado esta tecnología; comenzaron en 1984 a nivel de laboratorio y construyeron una planta en el complejo agroindustrial *Pablo Noriega*, la cual se encontraba lista para su puesta en marcha en 1989. El tratamiento se hace en dos fases:

1. La hidrólisis y la acidificación del contenido orgánico residual.
2. La metanización del resultado de la fase anterior.

El tiempo de residencia acidogénica es de 5,5 h, el de la etapa metanogénica de 8,5 h, la razón de carga en la primera etapa es de 30 kg de DQO/m³.día y de la segunda de 15 kg de DQO/m³.día. Se han obtenido remociones de DQO del 90 y 94 %, la producción máxima de biogás es de 1 200 Nm³/día y la de lodo fertilizante de 5 t/día. La tasa de producción de gas es de 0,5 Nm³/kg de DQO soluble eliminado. La temperatura en los reactores es de 36 y 38 °C respectivamente, las cuales se alcanzan con el aprovechamiento del calor de los condensados contaminados en el proceso. Cuando existen bajos valores de pH en la corriente de entrada el proceso de digestión anaerobia se detiene en la fase de acidogénesis y el pH alcanzado resulta inapropiado para el crecimiento de bacterias metanogénicas (González, 1991).

Aplicación de los diferentes tipos de digestores

Los digestores convencionales mezclados, los de flujo pistón, los de contacto anaerobio y los digestores con tabiques son más adecuados para residuales en forma de sólidos en suspensión.

Otros diseños son más recomendados para residuales solubles, residuales de alta concentración,

como en el caso de los filtros anaerobios, los de lecho fluidizado, los reactores de manto de lodo, los filtros anaerobios con manto de lodo y los sistemas de reactores en dos fases.

Las lagunas cubiertas han sido aplicadas para residuales solubles y de partículas en suspensión; esta aplicación requiere de una atención particular para el diseño cuidadoso de las estructuras de soporte y la selección de los materiales.

La mayoría de la información disponible de las plantas operadas a pequeña escala indican preferencia por tecnologías más simples y baratas como: lagunas, digestores de flujo pistón y los mezclados (Pohland y Harper, 1985).

El reactor más empleado para el tratamiento de residuales industriales es el UASB por las ventajas técnico-económicas que se tiene al operar con altos tiempos de retención de la biomasa activa, sin necesidad de emplear soportes para la inmovilización, ni recurrir a la recirculación de los lodos como alternativa determinante de la estrategia de operación (Xunmin, 2002).

Reactores empleados para el tratamiento de residuos de ganado

Pohland y Harper (1985) y Zhang *et al.* (1997) señalan que los digestores más empleados para tratar residuales de animales son de flujo pistón y digestores convencionales mezclados. Pohland y Harper (1985) aseguran que el 80 % de los digestores existentes son del primer tipo y el otro 20 % son del segundo. Trabajan con tiempos de retención de 15 a 30 días (Zhang, 1997). La reducción de sólidos volátiles que se obtiene es de un 20 a un 40 %, con una tasa de producción de gas de 1 a 3 volúmenes por volumen de reactor por día ($V/V \times \text{día}$) (60 % CH_4) (Pohland y Harper, 1985). Ambos tipos de reactores resultan factibles para el tratamiento de residuales de alta concentración, como los que se colectan mediante raspadores mecánicos; no resultan económicos para tratar residuales diluidos. Lusk (1999) asegura que se pueden tratar residuales con un contenido de sólidos totales de 3 a 10 % con tiempos de retención de 10 a 20 días.

Muchos de los digestores de alta velocidad presentan algunas limitaciones para su empleo en el tratamiento de residuos de animales. Por ejemplo, los reactores mezclados de flujo continuo necesitan energía para el mezclado. Los filtros anaerobios son factibles para residuales hasta de 1 % de contenido de sólidos. La dilución de los residuos

de animales hasta estos niveles de contenido de sólidos resulta en un incremento significativo en el volumen del efluente a disponer o manejar. Los reactores de lecho fluidizado poseen altos requerimientos de energía para la fluidización; lo mismo ocurre con los de manto de lodos y resulta algo más compleja la operación y más costoso su mantenimiento (Ghaly y Echiegu, 1992).

En la Tabla 2 se ofrecen algunos resultados obtenidos en el tratamiento de residuales de ganadería; en algunos casos el tiempo de retención supera los 20 días, las producciones de gas son desde 0,16 hasta $1 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

CONCLUSIONES

De lo antes analizado, se puede concluir que la selección de digestores debe hacerse según las características del residuo, la disponibilidad de área y el volumen que se deberá tratar.

Los indicadores principales que deben considerarse para interrelacionar los tres componentes: fuente de materia prima, capacidad y producción son:

El contenido de sólidos totales.

El contenido de la demanda química de oxígeno.

La carga orgánica ($\text{kg DQO}/\text{m}^3 \times \text{día}$)

El contenido de sólidos por los requerimientos de carga (v/v) del digestor y para estimar la cantidad de efluente que se produce.

El contenido de la DQO nos permite conocer la carga orgánica del sustrato y estimar la producción de gas y la calidad del efluente a partir de balances de masa y de la valoración de la eficiencia del reactor en el tratamiento de residuos específicos.

La razón de carga ($\text{kg DQO}/\text{m}^3/\text{día}$) y el tiempo de retención hidráulico, para definir la capacidad del reactor.

La selección adecuada de los reactores influye en la eficiencia del proceso y en su factibilidad económica.

REFERENCIAS

- ÁLVAREZ, M.: *Digestores anaerobios: Evolución y tendencias*, t. XLI, Afinidad, Barcelona, 1991.
- AMULYA, K.; N. REDDY, P. RAJABAPAIH y H. I. SOMASEKHAR: *Energy as an Instrument for Socio-Economic Development, Part II: Removing the Obstacles: The Small-Scale Approach*, Chapter 8. *Community Biogas Plants Supply Rural Energy and Water: The Pura Village Case Study*, disponible en: <http://www.undp.org/seed/energy/>

Tabla 2. Resultados obtenidos por diferentes autores en el tratamiento de residuales vacunos

Carga	TRH, días	Esv, %	E _{DQO} , %	Temp °C	Prod. de gas	Fuente
4 – 5 kg SV/m ³ d	29				1m ³ / m ³ di- gestor	Nyns; 1985
				33°C	0,394 m ³ /kg ST 0,504 m ³ /kg SV 1,069 m ³ /kg SV degradados	Chen <i>et al.</i> ; 1985
250 kg ST, fracción líquida de estiércol vacuno	11			35-38	0,833 L/g SV degradados (40-50 % de los ST en el influente	Lindley; 1985
Excreta fresca	37	5 –15		35	0,18 m ³ /kg SV adicionales	Steiner; 1985
2-15 kg SV/m ³ d						
1,6-11,88 kg SV/m ³ d	37	30- 33			0,27 m ³ /kg SV	
3,3 – 6,6 %	20	56,10			0,092 – 0,354 m ³ /kg SV adicionales	Ghaly y Echiegu (1992)
Excretas: agua (1:2,7), 15 % de MS	52				0,1-0,2 m ³ biogas/m ³ /día	Henderson; 2001
					0,16 m ³ /m ³	Esquivel;2002
1,56 kg DQO/m ³ .día	73	43	50		0,36 m ³ /m ³	Barreto <i>et al.</i> ; 2004
0,65 kg DQO/m ³ .día	61	52	19,3		0,34 m ³ /m ³	
Excretas: agua(1:1), 8,5 % MS, 7 % de MV					0,5 m ³ /m ³ (Flujo pistón)	Amulya; <i>et al.</i> 2005
					0,2-0,3 (campana móvil)	
0,02 kg SV/ m ³ .d	484	51	49,5		0,201 m ³ /m ³	(Barreto <i>et al.</i> ; 2005)
					0,965 m ³ /kg SV	

policy/ch_8.htm. 2005. (Revisado: octubre de 2005).

BALSAM, J. Anaerobic Digestion of Animal Wastes: Factors to Consider. Appropriate Technology Transfer for Rural Areas (ATTRA). 2006. www.attra.ncat.org/attra-pub/PDF/anaerobic.pdf

BARRETO, SARAH y E. MARTÍN: “Evaluación del funcionamiento de una pequeña planta de biogás”, *Rev. prod. anim.*, 16 (2), 2004.

BARRETO, SARAH.: “Para un desarrollo de programas rurales de empleo del biogás”, *Rev. prod. anim.*, Universidad de Camagüey, Cuba, 15 (2), 2003.

BARRETO, SARAH y D. RODRÍGUEZ: “Empleo familiar del biogás”, *Revista de Producción Animal*, Universidad de Camagüey, Cuba, 17 (2): 48-49, 2005.

BARRETO, SARAH: “Nuevo concepto para el empleo de efluentes de digestores anaerobios en el desarrollo rural”, *Revista de Producción Animal*, Universidad de Camagüey, Cuba, 17 (2): 50-53, 2005.

BARRETO, SARAH: Estrategia para la inserción industrial de la digestión anaerobia en el desarrollo regional, tesis presentada en opción al grado de doctora en Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Camagüey, 2006.

- BARRETO, SARAH: La digestión anaerobia como vía para el manejo y aprovechamiento de los residuales de la producción animal, Memorias de la Conferencia Internacional "Las ciencias técnicas y agropecuarias por un desarrollo sostenible", Universidad de Camagüey, Cuba, 2007.
- BARRETO, SARAH: "Efluente de digestores anaerobios: un producto valioso (artículo de revisión)", *Rev. prod. anim.*, Universidad de Camagüey Cuba, 19 (2): 85-92, 2007.
- CHAO, R.; R. SOSA y A. PÉREZ: Utilización del biogás en un seminternado de primaria. Impacto social. *ACPA* (4): 22-23, 2003.
- CHEN SHING-MING, A: Comparative Study of Biogas Fermentation of the Cow, Pig, and Hen Feces. Proceedings of the Fourth International Symposium on Anaerobic Digestion Held. 228 pp., Guangzhou, China on 11-15 November, 1985.
- DANESH, S.; D. SMALL y D. HODGKINSON: Pilot Plant Demonstration of a Three-Stage Waste Treatment Technology, 2000, disponible en <http://www.gov.mb.ca/agriculture/news/mdb/pdf/mlmmi98-01-31.pdf>. 2000. (Consulta: septiembre de 2004).
- ESQUIVEL, R.; M. MÉNDEZ, T. PRESTON y G. PEDRAZA: "Aspectos importantes al introducir biodigestores en explotaciones lecheras a pequeña escala", *Livestock Research for Rural Development*, 14, (3), 2002, disponible en <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd14/3/Viey143.htm>. (Consulta: octubre de 2002).
- GHALY, A. E. y E. A. ECHIEGU: "Performance Evaluation of a Continuous-Flow No-Mix Anaerobic Reactor Operating on Dairy Manure", *Energy Sources*, 14: 113-134, 1992.
- GONZÁLEZ, H; A. NÚÑEZ y D. CUEVAS: "Experiencia industrial de una tecnología cubana para el tratamiento de los residuales", *Cuba Azúcar*, 1991.
- HENDERSON, P.: Anaerobic Digestion in Rural China, City Farmer Canada's Office of Urban Agriculture, 2001, disponible en www.cityfarmer.org/biogasPaul.html. (Consulta: febrero de 2003).
- HERNÁNDEZ, C. A: *Biogás*, Segundo Fórum nacional de energía, La Habana, 132 pp., 1987.
- INSMET (Instituto de Meteorología, Camagüey): El estado del tiempo en Cuba, Camagüey, disponible en <http://www.cadenagramonte.cubaweb.cu/tiempo.asp>. (Consulta: octubre de 2006).
- LETTINGA, G.; J. FIELD, J. VAN LIER, G. ZEEMAN y L. HULSHOFF: "Advanced Anaerobic Wastewater Treatment in the Near Future", *Wat. Sci. Tech.*, 35 (10): 5-12, 1997.
- LINDLEY, J. A.: Biogas Production from the Liquid Fraction of Dairy Manure, en Proceedings of the Fourth International Symposium on Anaerobic Digestion Held, Guangzhou, China, 230 pp., 1985.
- LUSK, P.: "Latest Progress in Anaerobic Digestion", *BioCycle Magazine*: 52, 1999.
- MAMIE, M.: The Effect of Operational Parameters on Biogas Production and a Comparison of the Dynamics of Three reactors Designs, en Proceedings of the Fourth International Symposium on Anaerobic Digestion Held, Guangzhou, China, 720 pp., 1985.
- MENÉNDEZ, C. y JESÚS PÉREZ OLMO: *Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales*, Ed. ISPJAE, La Habana, Cuba, 311 pp., 1991.
- NDON UDEME, J. y R. DAGUE RICHARD: "Effects of Temperature and Hydraulic Retention Time on Anaerobic Sequencing Batch Reactor Treatment of Low-Strength Wastewater", *Wat. Res.*, 31 (10): 2455-2466, 1997.
- NYNS, E. J.: Success or Failure of Biogas Plants in Europe. The Paradox of a Mature Technology, en Proceedings of the Fourth International Symposium on Anaerobic Digestion Held, Guangzhou, China, 1985.
- OBAYA, M. C. y E. VALDÉS: "Tecnologías de avanzada para el tratamiento de las aguas residuales de baja y alta fortaleza", *Cuba Azúcar*, 1999.
- OBAYA, M. C.; E. VALDÉS, O. LEÓN, A. CUELLAR, R. VALENCIA y P. VILLA: "Algunas consideraciones sobre el uso de la recirculación de efluentes tratados en reactores UASB", *Tecnología del Agua*, Año XXI (217), 2001.
- PÉREZ, J. L.; R. BERMÚDEZ, P. LEZCANO y D. RAVELO: "Tecnologías de Digestión anaerobia para el tratamiento de residuales", *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 34 (2): 34-93, 2000.
- POHLAND, F. G. y S. HARPER: Biogas Developments in North America, en Proceedings Fourth International Symposium on Anaerobic Digestion Held, Guangzhou, China, 1985.
- RAJESHWARI, K. V.: "State-of-the-Art of Anaerobic Digestion Technology for Industrial Wastewater Treatment", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4: 135-156, 2000, disponible en www.elsevier.com/locate/rser.
- Rozzi, A.: Estado del arte de la digestión anaerobia en Europa, en Depuración anaerobia de residuales, Actas del 4º Seminario D. A. A. R., pp. 21-39, Valladolid, España, 1988.
- SOTO, M.; P. LIGERO, A. VEIGA y R. BLÁZQUEZ: "Sludge Granulation in UASB Digesters Treating Low Strength Wastewaters at Mesophilic and Psychrophysics Temperatures", *Environmental Technology*, 18: 1133-1141, 1997.
- SRINIVASAN, V. y J. SANSALONE: Plug Flow Anaerobic Digester. United States Patent 6,673,243 (C02F 003/00). January 6, 2004. Appl. No.: August 1, 2001. 7p.

- STEINER, A.: Anaerobic Digestion and Methane Production of Fresh and Stored Liquid Manure, Proceedings of the Fourth International Symposium on Anaerobic Digestion Held, Guangzhou, China, 1985.
- THEMELIS, N. J.: Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes, Vermathesis, 2002, disponible en www.seas.columbia.edu/earth/vermathesis.pdf. (Consulta: diciembre de 2006).
- VALDÉS, A.: "Cuba's Transition Away From Fossil Fuels, Renewable Energy for Development", *SEI*, vol. 13 (2), Environment Institute Newsletter of the Energy Programme Stockholm, 2000.
- XUNMIN, O. U.: Implementation of Anaerobic Digestion in Industry Organic Wastewater Treatment, disponible en Seminar.econon.keio.ac.jp/yamaguchi/2002/files/Ou_Xunmin.seika_2002. (Consulta: 2003).
- ZHANG, R. H.: "Anaerobic Treatment of Swine Waste by the Anaerobic Sequencing Batch Reactor", *ASAE*, 4 (3): 761-767, 1997.
- ZUXUAN, W.; C. H. ZEPENG y Q. ZESHU: Status Quo and Prospects on the Study of Anaerobic Disposal for Industrial Waste Water in China, en Proceedings of the Fourth International Symposium on Anaerobic Digestion Held, Guangzhou, China, 1985.

Recibido: 12/1/2008

Aceptado: 16/3/2008