

Eficiencia del tratamiento de residuales ganaderos en digestores de geomembrana

Yanet Pérez González¹ & Milagros de la Caridad Mata Varela²

Fecha de recibido: 03 de junio 2016

Fecha de aceptado: 17 de noviembre 2016

RESUMEN

Se evaluó la eficiencia de doce biodigestores de geomembrana de 10 m³, instalados para tratar los residuales porcinos y ganaderos –en Cooperativas de Créditos y Servicios (CCS) del municipio Cumanayagua–, con el objetivo de evaluar la factibilidad de la implantación en Cuba de la tecnología. Los indicadores físico-químicos de los efluentes fueron determinados en el momento de su entrada y su salida de los biodigestores. En los biodigestores que trabajan con residual porcino se alcanzó remover el 75,88 % de la DQO y hasta el 66,44 % de los SS, se garantiza además que el 64,79 % de la carga orgánica contaminante sea convertida en productos volátiles en el proceso de biofermentación; mientras que los biodigestores que trabajan con residuales vacuno alcanzaron una remoción 60,42 % en la DQO y hasta 67,67 % de los SS, se garantiza además que el 61,51 % de la carga orgánica contaminante sea convertida en productos volátiles. Se concluye que los biodigestores tuvieron valores aceptables de eficiencia, y que esta tecnología es factible de ser empleada en Cuba.

PALABRAS CLAVE/: energía renovable, ganadería, metano, biogás,

Efficiency of treatment of livestock waste in geomembrane digesters

ABSTRACT

It was evaluated the efficiency of twelve geomembrana digesters of 10 m³, installed to treat swinish and cattle residual.-of the Cooperative of Credits and Services (CCS) in the municipality of Cumanayagua, with the objective of evaluating the feasibility of the installation in Cuba of the technology. The physical-chemical indicators of the effluents were determined and the moment of their entrance and their removal from the biodigesters. In the biodigesters that work with swinish residual it was reached to remove 75,88 % of DQO, and until 66,44 % of SS. Also it is guaranteed that 64,79 % of the contaminant organic load is transformed into volatile products in the bio-fermentation process; whereas the residual bovine biodigestores reached a removal of 60,42 % in DQO and until 67,67 % of SS. Likewise it is guaranteed that 61,51 % of the contaminant organic load is transformed into volatile

¹ Lic. Contabilidad y Finanzas, Especialista Principal en Gestión Económica, Empresa Labiofam Cienfuegos UEB Producciones Agropecuarias: yanepg78@nauta.cu

² Dra. C., Profesora Auxiliar Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez : mmata@ucf.edu.cu

products. It can be concluded that biodigestores had acceptable values of efficiency, and this technology is feasible to use in Cuba.

KEY WORDS/: renewable energy, waste, livestock, methane, biogas,

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de alternativas sostenibles para el tratamiento de los residuales procedentes de la crianza animal intensiva constituye una tarea priorizada a escala mundial (IEA, 2013); de forma especial, Fernández et al. (2014) consideran que la tecnología digestor ofrece soluciones sencillas al problema de la disposición final de estiércol de ganado.

En Cuba se han empleado diversos diseños y tecnologías para la construcción de digestores. Los más utilizados según los autores Hilbert (2003), Ramón et al. (2006), Olaya y González (2009), Oviedo (2011), Guardado (2013), Guzmán (2014) y Blanco (2015) son los de cúpula fija, cúpula móvil y planta de geomembrana (PVC), todos útiles y con características que los distinguen unos de otros, pero con la limitante común de no ser efectivos para tratar grandes volúmenes de residuales. Sin embargo, muchos productores privados, con masas relativamente pequeñas y ubicados en ecosistemas frágiles -como las montañas- necesitan de digestores pequeños y prácticos.

Como respuesta a esta problemática, en los últimos años se ha experimentado con biodigestores tubulares horizontales de geomembrana (Díaz y Vega, 2013 y Blanco et al., 2015). El tipo de material de construcción es un factor importante en estos casos; al respecto Poggio et al. (2009) y Blanco et al. (2015), comentan que entre los años 2007 y 2008 se instalaron 13 biodigestores tubulares familiares (11 de polietileno y 2 de PVC), en la micro cuenca del Japón Mayo en Perú; a finales del 2008 se evaluó el estado de los biodigestores donde el 30 % estaban en desuso (todos eran de polietileno).

Otro factor fundamental en la generación de biogás es el material orgánico, ya que se han utilizado diversos tipos como los residuos y subproductos de actividades agrícolas, forestales, industriales, estiércol de vacas, cerdos y búfalos, excrementos humanos, los residuos de procesamiento de carnes, inclusive el jacinto de agua ha sido exclusivamente empleado para la producción comercial de metano en los países en desarrollo y desarrollados (Krishna *et al.*, 1991).

La digestión anaerobia, es una tecnología ampliamente difundida a escala familiar en países como China, India o Nepal. Entre los dos primeros citados existen instalados más de 44,4 millones de biodigestores hasta el 2011 (Martí, 2015). En los países de la Unión Europea hay más de 4 mil plantas para la producción de biogás (Kumar *et al.*, 2000). En los países latinoamericanos también se están desarrollando proyectos industriales de aprovechamiento de desechos orgánicos para la producción de biogás.

Bolivia implementó en el 2006 un programa de viviendas auto energéticas donde instalaron 250 biodigestores de polietileno tubular en condiciones rurales, como una alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias de pequeña, mediana y gran magnitud (Campero, 2008).

En el 2003, México puso en marcha el primer proyecto de generación de energía eléctrica a partir del biogás generado por la fermentación anaerobia de residuos sólidos orgánicos municipales en salinas Victoria, Nuevo León. Desde el surgimiento del primer biodigestor, se han desarrollado y aprobado varios modelos de plantas de biogás con el objetivo de aumentar la eficiencia y bajar los costos de los mismos (Kaiser *et al.*, 2002).

En el proyecto piloto que se presenta, se han instalado, hasta el momento, alrededor de 47 biodigestores familiares, en comunidades rurales de la zona de Cumanayagua, provincia Cienfuegos. El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia de doce biodigestores de geomembrana en fincas de pequeña escala y la factibilidad de la implantación de la tecnología en Cuba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se desarrolló una investigación no experimental, con una población de 47 fincas de pequeña escala, en áreas de montaña, pre-montaña, y llano, hacia el centro este del territorio de Cumanayagua. Se tomó una muestra de 12 casos al azar y durante el período comprendido entre el año 2013 hasta diciembre del 2015.

En el año 2013 fueron instalados 12 biodigestores de geomembrana de PVC de 10 m³. Se tomaron dos muestras por cada biodigestor en condiciones de explotación al residual de entrada y salida del sistema de tratamiento.

Muestreo y ensayo físico-químico de los residuales. La toma de muestras de los residuales se realizó según los criterios de Bartram y Rees (2000). Fueron recogidas en el horario comprendido entre las 8:00 A.M. y 10:00 A.M., utilizándose envases plásticos de 1.5 mL con tapas, lavados, secados al sol y previamente identificados. Dichas muestras permanecieron en condiciones de oscuridad, en neveras con hielo, hasta su transportación al laboratorio.

Los análisis se realizaron en el laboratorio del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) de Cienfuegos que se rige por los ensayos de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1995), y autorizado por el Órgano Nacional de Acreditación de la República de Cuba (ONARC). Los valores obtenidos se compararon con los establecidos en la NC 27:1999 que regula las descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores clase A.

Evaluación de la eficiencia de los biodigestores de geomembrana. Para evaluar la eficiencia del funcionamiento de los biodigestores se calcularon diversos indicadores, dígame, porcentaje de remoción, porcentaje de sólidos en

la mezcla (Sm), porcentaje de Sólidos Totales Volátiles (STV), producción diaria de gas (Pb) y producción de metano (Pm).

Análisis estadístico. Los datos fueron procesados por el paquete estadístico IBM.SPSS v 15. Se realizó una comparación de medias para dos muestras independientes, a partir de una prueba *t*, con un nivel de significación de 0.05.

Los datos en porcentajes fueron transformados con la función: $2 * \sin^{-1} \sqrt{x}$ para su análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los sistemas evaluados se produjo una alcalinización de los residuales durante el proceso, con incremento en el pH, sin diferencias estadísticas entre ambos. Este cambio se debió, en parte, a la dureza del agua de la zona, pero también a la producción de carbonatos en el proceso de digestión anaerobia de la materia orgánica (Rendón, 2007).

Los valores hallados en este análisis coinciden con los obtenidos por Ruiz (2010) y Blanco et al. (2015), quienes señalaron que la digestión anaerobia que ocurre en un biodigestor tiene varias fases, y en cada una los microorganismos presentan su máxima actividad dentro de un rango de pH diferenciado, que llega a alcanzar en la fase metanogénica entre 6,5 y 7,5. Por otra parte, Stams (2004) señaló que un incremento del pH al final del proceso indica que el reactor convierte de manera eficiente la materia orgánica a ácidos grasos volátiles y carbonatos.

De acuerdo a los resultados de laboratorio, los indicadores relacionados con la carga orgánica experimentaron una marcada disminución después del paso de los residuales por el biodigestor. En el caso de los biodigestores alimentados con sustrato porcino (7) se alcanza remover como promedio el 75,88 % de la DQO y hasta el 66,44 % de los SS, se garantiza además que el 64,79 % de la carga orgánica contaminante sea convertida en productos volátiles en el proceso de biofermentación. En el resto de los biodigestores y que trabajan con sustrato vacuno (5) se logra remover 60,42 % de la DQO y hasta 67,67 % de los SS, se garantiza además que el 61,51 % de la carga orgánica contaminante sea convertida en productos volátiles.

Al realizar un análisis de tendencia central logarítmica (figuras 1 y 2), el primer grupo de biodigestores mantienen niveles de remoción de los STV en el rango de 53 % y 69 % y la DQO totalmente oscilante, con valores entre 37 % y 99 %; por su parte el segundo grupo presentó menor movilidad de los STV en el intervalo (55 %; 68 %), con mayor fluctuación del DQO (11 %; 78 %). Sin embargo, persisten problemas con el funcionamiento de algunos reactores (1 y 5) reflejado en el bajo porcentaje de eliminación que presentan.

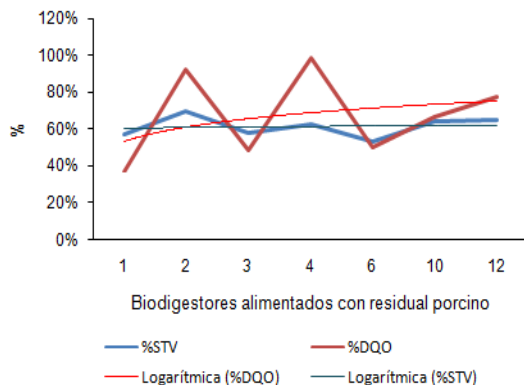


Figura 1: Eliminación de STV y DQO en los digestores que trabajan con residual porcino. Fuente: Elaborado a partir del informe de laboratorio del INRH de Cienfuegos.

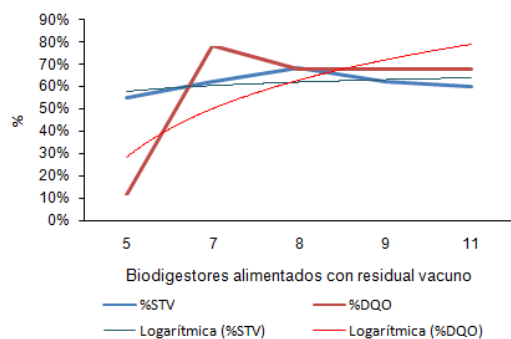


Figura 2: Eliminación de STV y DQO en los digestores que trabajan con residual vacuno. Fuente: Elaborado a partir del informe del laboratorio del INRH de Cienfuegos.

Los sistemas revelaron resultados adecuados de manera general, aunque los estudios desarrollados por Guzmán (2013a, 2013b y 2013c) muestran que en sistemas similares se pueden alcanzar remociones de la DQO mayores de 60 % y STV entre 55 % al 85 %, lo cual indican valores aceptables de eficiencia, tanto en producción de biogás, como en remoción de carga contaminante para los digestores en estudio.

Por otra parte, al comparar los resultados obtenidos con los valores normados a través de la NC 27/99 de la Oficina Nacional de Normalización de Cuba para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores clase A se puede apreciar valores que sobrepasan los límites máximos permisibles excepto para el pH, corroborando el hecho de que el efluente no puede ser descargado o vertido a cursos o cuerpos de agua naturales o a sistemas de alcantarillado, por no cumplir con los requisitos de calidad o remoción de la materia orgánica, haciendo perceptible la coincidencia con lo regulado por la Unidad de Planeación Minero Energética. UPME, (2003), (tablas 1 y 2).

Tabla 1: Valores de las principales variables evaluadas a la salida de biodigestores alimentados con sustrato porcino.

| Biodigestor | pH | CE | DQO | DBO | ST | STF | STV | SS |
|-------------|-------------|--------|------|------|-------|------|------|-----|
| 1 | 7.11 | 4320 | 5392 | 237 | 20076 | 480 | 2671 | 45 |
| 2 | 7.00 | 3240 | 285 | 69 | 1464 | 480 | 2111 | 5 |
| | 6.24 | 5390 | 2106 | 900 | 22198 | 6012 | 2881 | 30 |
| 3 | | | 8 | | | | | 0 |
| 4 | 7.95 | 4490 | 405 | 100 | 1894 | 1020 | 2581 | 0.9 |
| 6 | 6.99 | 3730 | 2214 | 1307 | 1000 | 480 | 3171 | 12 |
| 10 | 7.20 | 6000 | 1578 | 1050 | 1500 | 490 | 2471 | 40 |
| 12 | 7.19 | 2262 | 329 | 72 | 1440 | 265 | 6381 | 5 |
| NC 27/99 | (6.5 - 8.5) | - 1400 | 70 | 30 | - | - | - | 1 |

Fuente: Elaborado a partir de los resultados del informe de laboratorio del INRH de Cienfuegos.

Tabla 2: Valores de las principales variables evaluadas a la salida de biodigestores alimentados con sustrato vacuno.

| Biodigestor | pH | CE | DQO | DBO | ST | STF | STV | SS |
|-------------|-------------|------|------|------|---------|-----|------|----|
| 5 | 7.15 | 4470 | 8008 | 2135 | 8542 | 480 | 3111 | 42 |
| 7 | 6.99 | 1852 | 306 | 114 | 1000 | 480 | 2571 | 4 |
| 8 | 7.76 | 6460 | 8058 | 145 | 7288 | 265 | 5850 | 10 |
| 9 | 7.19 | 2512 | 331 | 77 | 1400 | 270 | 6645 | 5 |
| 11 | 6.99 | 2790 | 1417 | 670 | 4180.00 | 280 | 2571 | 40 |
| NC 27/99 | (6.5 - 8.5) | 1400 | 70 | 30 | - | - | - | 1 |

Fuente: Elaborado a partir de los resultados del informe de laboratorio del INRH de Cienfuegos.

Calidad del biol generado en cada biodigestor. En los sistemas evaluados la calidad del biol no es apto para el uso en el 58 % de los casos muestreados y a partir de los criterios de evaluación de Guzmán (2013a); el principal factor que incide en los resultados derivados es el tiempo de retención (corto) que impide la digestión de toda la materia orgánica en el proceso anaerobio.

Su uso en estas condiciones es perjudicial, afecta la retención de la materia orgánica y la destrucción de la micro fauna edáfica (Departamento técnico de PRONACA, 2016). Según la Unidad de Planeación Minero Energética (2003) y Guzmán (2013a) el efluente exige de una instalación y un período de almacenamiento adecuado; en función de la calidad del mismo puede oscilar entre 5 y 15 días, pasado este tiempo y sometidos a la acción ambiental, no constituyen ningún riesgo para la salud.

En estas condiciones la producción diaria de biogás es aproximadamente de 0.2 m³ biogás/m³ digestor/día dentro del rango descrito en la bibliografía para la

digestión anaerobia (Kashyap *et al.*, 2003). Este gas puede usarse como combustible sólo cuando el metano se encuentra en concentraciones mayores o iguales a 50 % (Rodríguez, 2012). Los valores obtenidos y de forma central se encuentran entre 62 % y 64 % y en dependencia de los grupos estudiados (tabla 3), siempre por encima de los parámetros establecidos, calificándose al gas resultante apto para su uso.

Tabla 3: Evaluación de la disminución de metano a la atmosfera en los biodigestores.

| Productor | Metano (%) | Dióxido de Carbono (%) | Valores del Metano | | | |
|---|------------|------------------------|--------------------|-------|---------|-------|
| | | | Mínimo | Máxim | Mediana | Media |
| Resultados para digestores que trabajan con residuales porcinos | | | | | | |
| P1 | 57 | 38 | 53 | 91 | 64 | 69 |
| P2 | 69 | 26 | | | | |
| P3 | 58 | 37 | | | | |
| P4 | 91 | 4 | | | | |
| P6 | 53 | 42 | | | | |
| P10 | 64 | 31 | | | | |
| P12 | 90 | 5 | | | | |
| Resultados para digestores que trabajan con residuales vacunos | | | | | | |
| P5 | 55 | 40 | 55 | 90 | 62 | 66 |
| P7 | 62 | 33 | | | | |
| P8 | 62 | 33 | | | | |
| P9 | 90 | 5 | | | | |
| P11 | 60 | 35 | | | | |

Fuente: Elaborado a partir de los resultados de los informes de laboratorio del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) de Cienfuegos.

Otro análisis al respecto está referido a la cantidad de metano dejado de emitir como beneficio de la tecnología instalada que asciende a un total de 9414 m³/año en 300 días de operación, donde el 72 % corresponde a biodigestores que trabajan con residual porcino y el 28 % a los alimentados con sustrato vacuno, el resto va a la atmosfera, o sea 17202 m³/año.

Existe además una capacidad de producción de biogás potencial relacionada con la cantidad de excretas producidas que toma valores entre (1.76 m³/día; 20.9 m³/día) para los biodigestores alimentados con sustrato porcino y (2.7 m³/día; 22.5 m³/día) para el resto; limitado siempre por el tamaño del biodigestor (2.7 m³/día). Como resultado, la producción de biogás anual alcanzó el valor de 11058 m³.

Los valores hallados en este análisis coinciden con los obtenidos por Rodríguez (2015), al señalar que un biodigestor de geomembrana, de 10 m³ y ubicado en la provincia de Ciego de Ávila, con una masa de 40 cerdos es capaz de producir anualmente 756 m³ de biogás y reducir la emisión de metano en 630 m³ al año.

Por su parte la experiencia del municipio Cumanayagua, en la finca Hervedero (biodigestor número 12) que trabaja en condiciones similares obtiene 810 m³ de biogás al año unido a la reducción de las emisiones de metano en 729 m³. Ambas experiencias responden al proyecto rectorado por la ANAP del Programa de pequeñas donaciones del PNUD.

Los resultados de los indicadores de eficiencia evaluados (Tabla 4) evidencian que el mayor porcentaje de remoción se encuentra en los biodigestores alimentados con sustrato porcino, en otras palabras remueven una mayor cantidad de materia orgánica durante su funcionamiento, sin embargo, los Sm y STV presentan diferencias significativas ($p < 0,05$) a favor de los biodigestores alimentados con sustrato vacuno, o sea, estos garantizan que una mayor carga orgánica contaminante sea convertida en productos volátiles.

Tabla 4: Indicadores de evaluación de la eficiencia de los biodigestores por tipo de ganado.

| Ganado | Remoción | Sm | STV |
|---------|-------------|-------------|-------------|
| Porcino | 1,99 ± 0,21 | 0,58 ± 0,07 | 1,79 ± 0,04 |
| Vacuno | 1,77 ± 0,27 | 0,60 ± 0,05 | 1,80 ± 0,04 |
| ES ± | 0,542 | 0,881 | 0,958 |

$P < 0,005$ (Duncan, 1955)

CONCLUSIONES

En las condiciones medio ambientales con que cuenta el municipio de Cumanayagua, y mediante la fermentación anaeróbica con doce biodigestores tubulares de geomembrana de PVC de 10 m³, se puede generar 9414 m³/año de gas metano (CH₄) en 300 días de operación; el 72 % corresponde a biodigestores que trabajan con residual porcino y solo el 28 % a los alimentados con sustrato vacuno, el resto va a la atmosfera, o sea, 17202 m³/año.

Teniendo en cuenta el tiempo de retención corto y la carga inter-diaria de 0,5 m³ de solución de estiércol, se obtiene abono orgánico -biol- no apto para el uso en el 58 % de los casos muestreados, su uso en estas condiciones es perjudicial, produce un desbalance de nutrientes en el suelo, afecta la retención de la materia orgánica y la destrucción de la micro fauna edáfica.

La región centro este del territorio de Cumanayagua tiene potencial para la producción de energía renovable a partir de la biomasa existente; con ello se disminuye la formación de aguas residuales que pueden ocasionar problemas ambientales, unido a la disminución de los gases de efecto invernadero, además, de lograr niveles aceptables en el funcionamiento -producción de biogás y remoción de la carga contaminante- por tanto, es posible la adopción de la tecnología a pequeña escala por los productores dueños de fincas y establos.

REFERENCIAS

- Alvarado, K., Matos, K., y Blanco, A. (2012). Evaluación de 5 sustratos en el Bartram, J. K. & Rees, G. (Eds.). *Monitoring bathing waters: A practical guide to the design and implementation of assessments and monitoring programmes*. London, New York: E & FN Spon, 2000.
- Blanco, D. y otros (2015). Eficiencia del tratamiento de residuales porcinos en digestores de laguna tapada. *Pastos y Forrajes*, 38 (4), p 441-447.
- Campero, R. O. (2008). Programa Viviendas auto energéticas en Bolivia. Una nueva forma de ver el futuro energético- ambiental del país en el área rural. *Residuos*, 103: 74 -79.
- Departamento técnico de PRONACA. (2016). Los desechos porcinos están llenos de beneficios. *Procampo* (15).
- Díaz, R. & Vega, J. C. (2013). Efecto de la variación de la carga orgánica en el desempeño de un reactor Uasb (upflow anaerobic sludge blanket) tratando efluentes de una planta extractora de aceite de palma. *Revista ambiental: agua, aire y suelo*. 4 (1):23-32.
- Fernández, V.; Rodríguez, L. & Aquino, N. (2014). Generación de energía renovable a partir del desarrollo de actividades pecuarias en el departamento de Madre de Dios. *Ciencia amazónica (Iquito)*, 4 (1): 67 – 77.
- Guardado, J. A. (2013) *El uso de biodigestores de cúpula fija en el tratamiento de residuales porcinos. Experiencias y lecciones aprendidas en Cuba*. Taller “Transferencia de tecnología para el tratamiento anaeróbico de pequeñas y medianas instalaciones porcinas”. La Habana: PNUD.
- Guzmán, E. (2014). *Evaluación Ex ante del proyecto Tratamiento de residuales con fines productivos en la Empresa Genético Porcina Cienfuegos*. (Tesis de diploma). Cienfuegos.
- Guzmán, J. M. (2013a). *Digestión Anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos*. España: Editorial Académica Española.
- Guzmán, J. M. (2013b). *Evaluación económica de la energía renovable*. España: Editorial Académica Española.
- Guzmán, J. M. (2013c). *Valoración de la eficiencia de plantas de biogás a pequeña escala*. España: Editorial Académica Española.
- Hilbert, J.A. 2003. *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural, INTA Castelar, Morón, Argentina. 54 p
- IEA. (2013). *Redrawing the energy-climate map*. Paris: International Energy Agency.
- Kaiser, F. & Gronauer, A. (2002). Producción de biogás a partir del guano animal: el caso de Alemania. *Agronomía y Forestal UC*, 16: 4 - 8. Kashyap, D.R., Dadhich, K.S., Sharma, S.K. (2003) Biomethanation under psychrophilic conditions: a review. *Bioresource Technology* 87, 147-153.
- Krishna, N.; Sumitra, D.; Viswanath, P.; Deepak, S. & Sarad, R. (1991). Anaerobic Digestion of Canteen Waste for Biogas Production: Process Optimisation. *Process Biochemistry*, 26: 1- 5.

- Kumar, M.; Humar, S. & Poonia, M. P. (2000). Methane, carbon dioxide and nitrous oxide reduction through the application of biogas technology. *Indian Journal of Environmental Health*, 42 (3): 117,120.
- Martí, J. (2015). Biodigestores Familiares: Guía de Diseño y Manual de Instalación. GTZ-Energía de Bolivia.
- Olaya, Y. & González, L. (2009). Fundamentos para el diseño de un biodigestores. Modulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira.
- Oviedo, H. (2011). *Biogás, experiencias en el municipio Bartolomé Masó*. Bayamo, Cuba: Universidad de Granma.
- Pedraza, G.; Chard, J.; Conde, N.; Giraldo, S. & Giraldo, L. (2002). Evaluation of polyethylene and PVC tubular biodigesters in the treatment of swine wastewater. *Livestock Reserch for Rural Development*, 14 (1).
- Poggio, D.; Ferrer, I. Batet, L. & Velo, E. (2009). Adaptación de biodigestores tubulares de plástico a climas fríos. *Livestock Reserch for Rural Development*, 21. <http://www.Irrd.org/Irrd21/9/pogg21152.htm>
- Ramón, J.A.; Romero, L.F.; Simanca, J. L. (2006). Diseño de un biodigestor de canecas en serie para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de cerdo. *Revista Ambiental: Aire, Agua y Suelo*. Vol. 1, 15-23.
- Rendón, J. A. (2007). *Evaluación de la digestión anaerobia mesofílica y termofílica para la producción de biosólidos a partir de lodos residuales combinados generados en una planta de tratamiento de aguas residuales*. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Veracruz, México: Instituto Tecnológico de Orizaba, 2007.
- Rodríguez, L. G. (2012). *Implementación y construcción de un biodigestor hindú de estructura flexible con el aprovechamiento de las excretas de ganado vacuno, aplicado a la quinta experimental punzara*. (Tesis de diploma). Universidad Nacional de Loja. Ecuador.
- Rodríguez, D. R. (2015). *Evaluación técnica-económica de los digestores de Geomembrana (PVC tubular) adquirido por la ANAP en la provincia de Ciego de Ávila. Estudio del caso CCS*. (Tesis de diploma). Universidad de Cienfuegos.
- Ruiz, A. (2010) *Mejora de las condiciones de vida de las familias porcicultoras del Parque Porcino de Ventanilla, mediante un sistema de biodigestión y manejo integral de residuos sólidos y líquidos, Lima, Perú*. (Tesis doctoral). Barcelona: Instituto Químico de Sarria, Universitat Ramon Llull.
- Stams, A. J. (2004). Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments. *Antoine Van Leeuwenhoek*. 66 (1-3):271-294.
- Unidad de Planeación Minero Energética. UPME. (2003). *Guía de implementación de Sistemas de Biogas*. Bogota: Unión Temporal ICONTEC-AENE.