

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL PORCINO A ESCALA
PILOTO: CASO DE ESTUDIO BIORREACTOR CONTINUÓ TUBULAR
PLÁSTICO (BCTP) FINCA TOSOLY**

**CARLOS DIDIER BAYONA PAEZ
BRAYAN STEEK CORTÉS LUENGAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2015**

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL PORCINO A ESCALA
PILOTO: CASO DE ESTUDIO BIORREACTOR CONTINUÓ TUBULAR
PLÁSTICO (BCTP) FINCA TOSOLY**

**CARLOS DIDIER BAYONA PAEZ
BRAYAN STEEK CORTÉS LUENGAS**

**Trabajo de grado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO**

Directores

**LILIANA DEL PILAR CASTRO MOLANO
Ingeniera Química Ph.D.
Profesor Escuela Ingeniería química - UIS**

**HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ
Ingeniero Químico Ph.D.
Profesor Escuela Ingeniería química - UIS**

**LYLIAN VICTORIA DEL ROSARIO RODRÍGUEZ JIMÉNEZ
Zootecnista Ph.D.
Directora de la RedBioCOL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

Gracias Dios por permitirme despertar cada día a perseguir mis sueños y así como en este momento dar con un triunfo más en mi vida.

A mis padres, Bertha Cecilia y Carlos Fernando, ahora vemos que la paciencia y la perseverancia siempre nos llevan por el camino de las buenas decisiones hacia el cumplimiento de nuestros sueños.

A mis hermanos Daney Fernando y María Camila siempre presentes en mi corazón. Sin dudarlo, esta meta alcanzada es gracias a su apoyo.

A mi mujer, Ana Sofía. Mi amor cada paso a tu lado es avanzar hacia el triunfo y mirar hacia atrás es darme cuenta que siempre has estado presente apoyándome. Gracias por tanto!

A mi mayor motivación, mi hij@, mi SA-SA. Este es mi primer regalo para ti, anhelo con el alma tu llegada y cada día me imagino levantándote para verte a los ojos y decirte que mi mayor logro y mi mayor bendición eres tú.

A Brayan, mi compañero de trabajo. Amigo

Gracias por todo!

Carlos Didier Bayona Páez

DEDICATORIA

A Dios primeramente por la salud, la fortaleza y las bendiciones recibidas durante este ciclo tan importante para mi vida.

A mis padres por su apoyo incondicional, por sus buenos consejos, guiármelos en la vida, y depositar tanta confianza.

A mi hermano por estar siempre en los buenos y malos momentos, por ser más que un hermano un cómplice en todas las cosas.

A mis tíos por tanto apoyo recibido por estar siempre para aconsejar, y generar optimismo.

A mi compañera sentimental, que estuvo en este proceso, apoyándome, colaborándome y generándome la felicidad, y amor.

Infinitos agradecimientos a todos los que hicieron parte de este proceso.

Brayan Cortés Luengas

AGRADECIMIENTOS

A la doctora Lylian Rodríguez, por abrirnos las puertas y brindarnos la posibilidad de realizar este trabajo.

A la red BioCOL por hacernos parte de su grupo de trabajo y por las enseñanzas brindadas.

A Luis y Jose, gran soporte en el laboratorio.

A don Guillermo, por su orientación y disposición en el laboratorio.

A Linita, sin duda alguna el proceso fue más fácil gracias a su ayuda.

Al profesor Humberto Escalante y la profesora Liliana Castro, su apoyo, incondicionalidad y paciencia en este trabajo nos impulsaron en el cumplimiento de nuestras metas.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. DIGESTIÓN ANAEROBIA	21
1.1 BIORREACTOR CONTINUÓ TUBULAR PLÁSTICO (BCTP)	24
2. METODOLOGÍA	28
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	32
4. CONCLUSIONES	37
5. RECOMENDACIONES	38
BIBLIOGRAFÍA	39
ANEXOS	42

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Producción de biogás y Biol en la finca TOSOLY	18
Figura 2. Etapas del proceso de digestión anaerobia	22
Figura 3. Fraccionamiento de materia orgánica	24
Figura 4. a) Biorreactor continuo tubular plástico (BCTP)	28
Figura 4. (b) Registro fotográfico, biorreactor continuo tubular plástico (BCTP), finca TOSOLY	28
Figura 5. Variación de la COV y variación de ART	33
Figura 6. Variación de la COV y variación de AGV	34
Figura 7. Comportamiento del pH y la relación AGV/AT	35
Figura 8. Variación de la COV y Producción de biogás	36

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones técnicas del biorreactor continuo tubular plástico (BCTP)	29
Tabla 2. Variables a monitorear, método analítico, unidades y periodicidad de la medición	30
Tabla 3. Efecto de la temperatura sobre la operación del biorreactor continuo tubular plástico (BCTP)	32

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. PROTOCOLO PARA LA TOMA DE MUESTRA EN LA EN EL REACTOR CONTINUO, PLÁSTICO TUBULAR	43
ANEXO B. MANUAL PARA INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y UTILIZACIÓN DE UN BIORREACTOR CONTINUÓ TUBULAR PLÁSTICO (BCTP) DE BAJO COSTO	45
ANEXO C. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH) PARA REACTORES DE FLUJO PISTÓN	48

LISTA DE ABREVIATURAS

BCTP	Biorreactor continuo tubular plástico
DA	Digestión anaerobia
ART	Azúcares reductores totales
AGV	Ácidos grasos volátiles
AT	Alcalinidad total
COV	Carga orgánica volumétrica
BIOL	Efluente
VB	Volumen biogás
RTFP	Reactor tubular flujo pistón
TRH	Tiempo de retención hidráulico

RESUMEN

TÍTULO: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL PORCINO A ESCALA PILOTO: CASO DE ESTUDIO BIODIGESTOR TUBULAR FINCA TOSOLY*

AUTORES: CARLOS DIDIER BAYONA PAEZ,
BRAYAN CORTÉS LUENGAS**

PALABRAS CLAVES: biorreactor, efluente, afluente, lodo, Digestión Anaerobia, biogás, RedBioCOL, RedBioLAC.

DESCRIPCION

El creciente deterioro del ecosistema, deficiente tratamiento de aguas, residuos orgánicos y sólidos durante los últimos años ha llevado a una crisis ambiental, que ha despertado la preocupación de la población en la búsqueda de soluciones a la crisis mundial por la que atraviesa el planeta en términos ambientales y sociales.

La creación de la RedBioLAC en Perú en el año 2009, así como de la RedBioCOL en el año 2012 en la finca TOSOLY, muestran el compromiso e interés de la sociedad para dar la pertinente importancia al buen manejo y aprovechamiento de residuos orgánicos, como a la tecnología del biogás como una respuesta a la crisis ambiental en américa latina y el mundo.

El biorreactor continuo tubular plástico (BCTP) es una herramienta práctica de operación sencilla, excelente alternativa como medio de suministro energético a nivel rural, eficiente, de fácil elaboración y económica, en el aprovechamiento del material orgánico, aguas residuales, producción de biogás y biol, mediante la digestión anaerobia (DA).

En el presente se comprobó que el biorreactor continuo tubular plástico de la finca TOSOLY, que en la actualidad tiene 15 años de instalado, presenta un desempeño favorable dado que para una carga 1:7 excretas-agua consiguió alcanzar un rendimiento en producción de biogás entre 0.4 y 0.5m³/día.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora Liliana Castro Ing. Química Ph.D. Directora de la RedBioCOL Lylian Rodríguez

ABSTRACT

TITLE: BIOGAS PRODUCTION FROM MANURE PIG PILOT SCALE: CASE STUDY BIODIGESTOR PLUG CONUTRYSIDE TOSOLY*

AUTHOR: CARLOS DIDIER BAYONA PAEZ,
BRAYAN CORTÉS LUENGAS**

KEYWORDS: bioreactor, affluent, effluent, sludge, Anaerobic Digestion, biogas, RedBioCOL, RedBioLAC

The growing deterioration of the environment, poor water treatment, organic and solid waste in recent years has led to an environmental crisis that has aroused the concern of people in finding solutions to the global crisis being experienced by the planet environmental and social terms.

The creation of the RedBioLAC in Peru in 2009, as well as the RedBioCOL in 2012 on the farm TOSOLY show the commitment and interest of society to give relevant importance to the proper management and use of organic waste as biogas technology as a response to the environmental crisis in Latin America and the world.

Plastic tubular continuous reactor (BCTP) is a handy tool for simple operation, excellent alternative means of energy supply level country side, efficient, easy to prepare and economical in the use of organic material, waste water, production of biogas and biol by anaerobic digestion (DA).

In this it was found that the tubular continuous bioreactor plastic TOSOLY farm, which now has 15 years installed, it presents a favorable performance because for a load 1: 7 excreta-water managed to achieve a return on biogas production from 0.4 and 0.5m³ / day.

* Project Grade

** Faculty of Engineering physic-chemical. School of Chemical Engineering. Director Liliana Castro
Chemical Engineering Ph.D. Director de la RedBioCOL Lylian Rodriguez

INTRODUCCIÓN

La red de Biodigestores de América Latina y el Caribe (RedBioLAC) nació en Perú en el año 2009, teniendo como principal objetivo implementar la tecnología de digestión anaerobia como una respuesta a una crisis ambiental y la necesidad de obtener biogás. RedBioLAC anualmente ha promovido encuentros en Costa Rica, México, Nicaragua, entre otros países, para intercambiar ideas y experiencias relativas a la valorización energética de residuos y la solución de problemas ambientales a escala rural (RedBioLAC, 2015).

En octubre de 2012, durante un encuentro de RedBioLAC en TOSOLY (ubicada en la vereda Morarío, Guapotá – Santander) se fundó la Red Colombiana del Biogás en Colombia (RedBioCOL). Esta red está constituida por actores industriales, rurales y académicos y cumple en el país con objetivos similares a RedBioLAC (RedBioCOL, 2015). RedBioCOL tiene el objetivo de contribuir al desarrollo sostenible de la sociedad colombiana, mediante la promoción del aprovechamiento energético de residuos orgánicos con acciones de articulación, gestión del conocimiento, incidencia sociopolítica y ambiental en los territorios (RedBioCOL, 2015).

La finca TOSOLY es epicentro de educación y manejo de recursos naturales como una forma de asegurar el cubrimiento de las necesidades alimentarias y energéticas de la sociedad, por eso es una entidad abierta a realizar convenios con diferentes instituciones como la alcaldía de Guapotá, Wisions, Green Empowerment, UIS, UTA foundation, entre otros, y así contagiar a la población de la necesidad de crear y desarrollar un uso eficiente y estratégico de recursos locales para favorecer el trabajo familiar, la descentralización, autosuficiencia y diversificación y lograr responder a la problemática mundial de los recursos naturales.

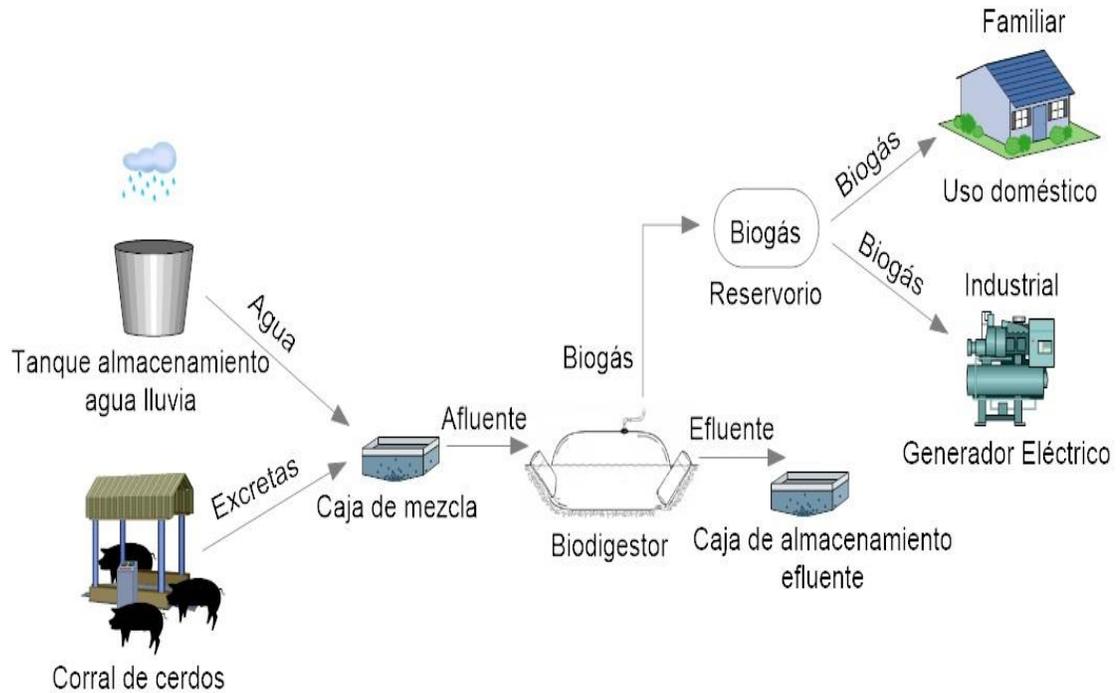
TOSOLY es un modelo de finca autosuficiente y ecológicamente sostenible. En ella la cría de chivos, gallinas y cerdos, cultivos de café, maíz, tomate y otras legumbres,

producción de miel. Adicionalmente, en Tosoly la producción y uso de biogás como complemento energético, tanto para cocción de alimentos como para operación de maquinaria, y el uso de digestato como potenciador de los suelos de los cultivos, son algunas de las características que evidencian el buen manejo de los desechos orgánicos.

El proceso controlado de digestión anaerobia es uno de los más idóneos para la reducción de las emisiones de efecto invernadero, que desde hace varios años se ha convertido en un problema ambiental y social. Es por eso que la implementación adecuada de un buen manejo de los residuos orgánicos da beneficios como: reducción significativa de malos olores, mineralización, producción de energía renovable.

La valorización energética de los residuos pecuarios en TOSOLY se lleva a cabo mediante el proceso de digestión anaerobia (Figura 1). En la etapa preliminar se recolectan y mezclan, el agua lluvia y las excretas de diversos corrales y letrinas. Esta mezcla se constituye en la carga del biodigestor. La etapa secundaria da lugar al proceso propiamente dicho de DA, donde se produce el biogás y el lodo estabilizado (digestato o biol). La etapa terciaria es la recolección del biogás en el reservorio, y del efluente (BIOL) en la caja de almacenamiento a la salida del biodigestor. Finalmente, el biogás se utiliza como combustible para las estufas de la casa (cocción de alimentos) y en el generador eléctrico. El efluente se destina al riego de cultivos.

Figura 1. Producción de biogás y Biol en la finca TOSOLY



Los biodigestores fueron considerados, principalmente, como una manera de producir gas combustible a partir de desechos orgánicos. Sin embargo al ser integrados a un sistema de agricultura ecológica, los biodigestores pueden brindar otros beneficios¹, desde la producción de biogás para la cocción de alimentos y funcionamiento de máquinas como moladoras de caña de azúcar, hasta la obtención de fertilizantes de alta calidad.

TOSOLY cuenta con 5 biodigestores plásticos para la producción de biogás. Tres biodigestores son alimentados con la mezcla de aguas lluvias y excreta porcina y dos con aguas residuales de letrinas y desechos humanos todos interconectados y manejados con válvulas y tuberías cuyo destino son dos bolsas plásticas de almacenamiento, una ubicada junto al juego de máquinas como moladoras de caña

¹Preston, T., 2005. Los biodigestores en los sistemas agrícolas ecológicos. *LEISA - Revista de Agroecología*, 21(1), pp.18–22.

y la otra en el interior de la casa principal usado para la cocción de alimentos de los habitantes de la finca.

La constante y desequilibrada entrada y salida de lechones, la sedimentación de lodos en el fondo de los biodigestores, las repentinas y drásticas fluctuaciones ambientales, entre otros desperfectos, hacen que el desempeño de los biodigestores en muchas ocasiones se vea afectado y hasta interrumpido, aunque la operación de este tipo de reactores es sencilla, e indispensable mantenerlos y trabajarlos con el mayor cuidado y en las mejores condiciones posibles.

El estudio y análisis del comportamiento del biodigestor teniendo en cuenta condiciones climáticas, variables directamente relacionadas con las diferentes etapas de descomposición de la materia, la cuantificación de los porcentajes de remoción en términos de materia orgánica disuelta y evaluación de la estabilidad e inhibición, son herramientas adecuadas para implementar en busca del entendimiento y mejoramiento en la eficiencia del reactor.

Las condiciones ambientales que inciden en el proceso además de la pertinente adecuación en el sitio de ubicación del reactor también son claves para un eficiente proceso de DA, producción de biogás y digestato de calidad. Una ubicación en la que se pueda apreciar el proceso y que brinde comodidad al operario sería muy útil en el seguimiento y ajuste de falencias del proceso.

La población rural es a quien va dirigida esta iniciativa, es importante tener un impacto en la comunidad en el que se despierte el interés social en la aplicación de una tecnología limpia que no solo supla las necesidades agro-energéticas de la población campesina sino que contribuya a la disminución de la crisis ambiental.

Este trabajo (modalidad práctica empresarial) no solo pretende evaluar, entender y mejorar el proceso de digestión anaerobia en la producción de biogás y digestato,

también busca generar en la comunidad la conciencia y el interés necesario para la implementación de la tecnología del biodigestor como recurso en la mejora de la calidad de vida en el campo así como medio de solvencia en la crisis ambiental.

1. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La DA es un proceso biológico complejo, que consiste en la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno para producir un biogás y un digestato (BIOL). El biogás está compuesto de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y otros compuestos². La DA implica la realización de una serie de reacciones bioquímicas, donde participan una gran variedad de microorganismos³. El biol es utilizado como fertilizante en la recuperación de suelos estériles⁴. La DA se ha convertido en una tecnología establecida y comprobada como medio de gestión de los residuos sólidos orgánicos.

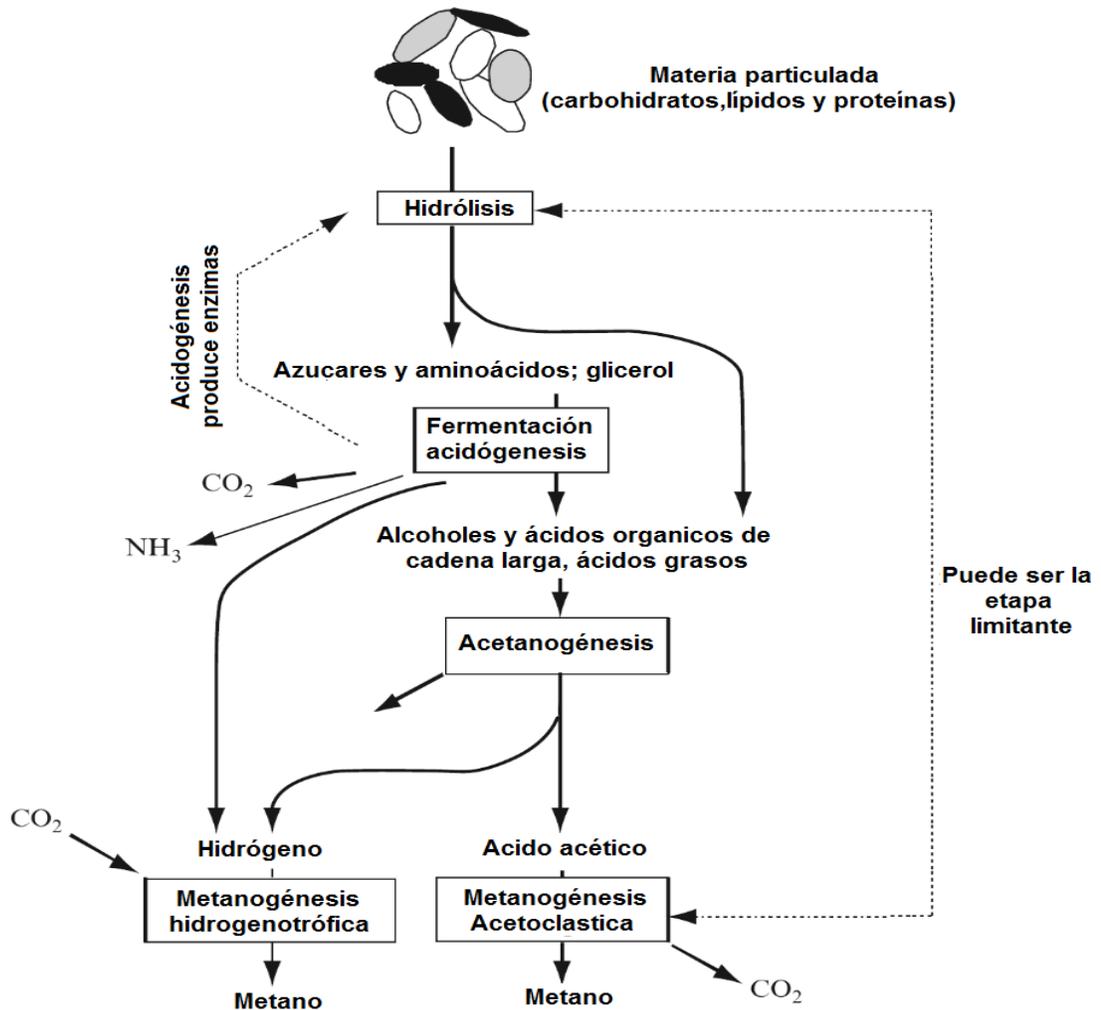
La DA involucra 4 etapas: a) la hidrólisis de las macromoléculas como polisacáridos, lípidos y proteínas b) la acidogénesis de los monómeros, C) la acetogénesis y d) la metanogénesis en donde cada una es llevada a cabo por diferentes grupos de microorganismos (Figura 2).

²Shin, H.-S. & Youn, J.-H., 2005. Conversion of food waste into hydrogen by thermophilic acidogenesis. *Biodegradation*, 16(1), pp.33–44. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15727153>.

³Guevara, A., 1996. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. , pp.1–80.

⁴Babaee, A. & Shayegan, J., 2011. Effect of Organic Loading Rates (OLR) on Production of Methane from Anaerobic Digestion of Vegetables Waste. *World renewable energy Congress*, pp.411–417. Available at: http://www.ep.liu.se/ecp_article/index.en.aspx?issue=57;vol=1;article=55.

Figura 2. Etapas del proceso de digestión anaerobia



Fuente: Angelidaki I., Karakashev D., Batstone D., Plugge C., Stams A "Biomethanation and Its Potential" En: Methods in Methane Metabolism. In R. and Ragsdale, ed. *Elsevier Applied Science*,. Inglaterra: Elsevier Applied Science, pp. 327–348.

En la etapa de hidrólisis las moléculas complejas, son degradada a compuestos más simples. En esta etapa intervienen las bacterias hidrolíticas, que producen ácido acético, compuestos monocarbonados, ácidos grasos orgánicos y otros compuestos policarbonatos. En esta etapa las cadenas de carbohidratos se transforman en azúcares simples, las grasas en ácidos grasos y glicerol y las

proteínas se hidrolizan hasta péptidos y aminoácidos, liberando dióxido de carbono e hidrogeno. (Castro 2012). La evidencia que se está llevando a cabo esta etapa, es la disminución de la concentración de azúcares reductores totales⁵.

Disminución de la materia orgánica disponible para el proceso, cuantificada como sólidos volátiles (SV) que ocurre en el transcurso de las etapas, ésta se evalúa con la hidrólisis.

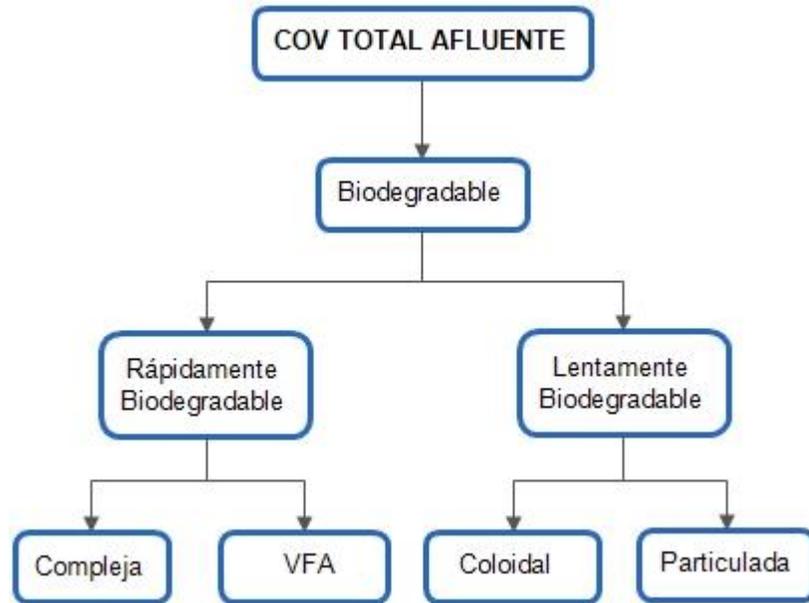
En la etapa de la Acidogénesis, los productos intermedio (monosacáridos) producidos en la etapa anterior son convertidos en ácidos orgánicos tipo acetato, propionato, valerato, CO₂ y H₂. La tercera etapa es la Acetogénesis donde las bacterias acetogénicas generan mayoritariamente acetato, H₂ y CO₂ utilizando hidrogeno y dióxido de carbono como fuente de energía (Bermúdez. *et al* 1988).

Finalmente en la etapa de la Metanogénesis las arqueometanogénicas transforman el hidrógeno (H₂) y el dióxido de carbono (CO₂) en CH₄ y CO₂; esto se da debido a cuatro senderos de reacción anaerobia (Deppenmeier, 2002, Liu *et al.*, 2008). La *Metanogénesis acetoclástica*: el acetato se fracciona en CH₄ y CO₂ afectando el pH del sistema; la *metanogénesis hidrogenotrófica*: el dióxido de carbono se reduce a CH₄, limitando el potencial de óxido-reducción del bioproceso (Castillo *et al.*, 2007); y la *metanogénesis metilotrófica*, los compuestos metilados (metanol, metilaminas, sulfuro de dimetilo, etc.) se transforman a CH₄ (Chen *et al.*, 2008).

⁵Angelidaki I., Karakashev D., Batstone D., Plugge C., Stams A “Biomethanation and Its Potential” En: Methods in Methane Metabolism. In R. and Ragsdale, ed. *Elsevier Applied Science*,. Inglaterra: Elsevier Applied Science, pp. 327–348.

La figura 3 muestra cómo se fracciona la materia orgánica en un proceso anaerobio.

Figura 3. Fraccionamiento de materia orgánica



1.1 BIORREACTOR CONTINUÓ TUBULAR PLÁSTICO (BCTP)

Existe variedad de modelos de biodigestores (digestor de cúpula flotante o hindú, digestor de cubierta fija o chino, biodigestores discontinuos y continuos, biodigestor con desplazamiento horizontal) el diseño y construcción de estos, varían en su magnitud, desde pequeños digestores alimentados por los residuos de una o varias familias, granjas pequeñas, hasta vertederos de plantas industriales, etc. Todo dependerá fundamentalmente de la necesidad o demanda energética y de la disponibilidad de materia prima⁶.

Estos sistemas de biodigestión son conocidos también como biodigestores tipo salchicha o taiwanés, se caracterizan por ser sistemas continuos construidos a partir

⁶Gon, L.M.I., 2008. Guía para proyectos de biodigestión en establecimientos agropecuarios. , pp.1–27.

de polietileno tubular. Es un sistema estacionario de geometría alargada donde el flujo de líquido es continuo, ordenado; esto significa que, al igual que en un reactor de flujo pistón (RTFP) cada fracción de líquido que entra en el biodigestor no sobrepasa o se mezcla con otra fracción o elemento situado antes o después de aquel en la dirección de flujo (dirección axial). Debido a las características del flujo continuo, las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas del flujo cambian a medida que avanzan dentro del biodigestor; por lo tanto, la producción de biogás es distinta en cada sección del sistema⁷, el tiempo de retención hidráulico para estos sistemas se calcula igual que para los reactores de flujo pistón.

La determinación de la ecuación para hallar el tiempo de retención hidráulico (TRH) se muestra en el anexo C, lo que se hace es tomar el caudal con el que se alimenta el BCTP y generar una relación con el volumen del mismo, de esta manera el cálculo se da mediante la relación $TRH = V/Q$ (V =Volumen del BCTP y Q =Caudal de alimentación del BCTP).

Para el volumen del BCTP de 6,75 m³ y un caudal de alimentación de 0,336 m³/día se tiene que el TRH = 20,089 días. Generalmente se trabaja con tiempos de retención entre 20 y 55 días y con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico de digestor (Manual del biogás, 2011), lo que evidencia que se encuentra dentro del rango apropiado de degradación de la materia⁸.

Los biodigestores familiares de bajo costo han sido desarrollados y están ampliamente implementados en países del sureste asiático, pero en América Latina, solo países como Cuba, Colombia y Brasil tienen desarrollada esta tecnología. Estos modelos de biodigestores familiares, se caracterizan por su bajo costo, fácil

⁷Samayoa, S., Bueso, C. & Viquez, J., 2012. Implementación de sistemas de biodigestión en ecoempresas de sistemas de biodigestión. Available at: http://www.snvworld.org/sites/www.snvworld.org/files/publications/guia_sistema_de_biodigestion_web.pdf.

⁸ Eroglu S., Toprak S., Urgan O, MD, Ozge E. Onur, MD, Arzu Denizbasi, MD, Haldun Akoglu, MD, Cigdem Ozpolat, MD, Ebru Akoglu, M., 2012. MANUAL DE BIOGÁS. *Saudi Med J*, 33, pp.3–8.

instalación y mantenimiento, así como por requerir sólo de materiales locales para su construcción. Por ello se consideran una “tecnología apropiada”⁹. El tiempo de vida útil de estos sistemas es de 10 a 15 años, dependiendo de las condiciones ambientales y operación adecuada.

La temperatura es uno de los principales parámetros de diseño a medida que ésta aumenta, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión dando lugar a mayor producción de biogás. Mantener el sistema dentro de un rango de pH entre 6,8 y 7,4 proporciona un desarrollo satisfactorio del proceso (teniendo en cuenta que el pH no solo determina la producción de gas sino también su composición) y el control propio del mismo gracias a la alcalinidad natural del sistema que ayuda a regular el proceso soportando y amortiguando la presencia de ácidos manteniendo el pH dentro del rango óptimo de operación.

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida (Sólidos Totales ST), es importante controlar la concentración de estos en la mezcla pues la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato puede verse limitada a medida que aumenta la concentración de ST y de esta forma afectarse la eficiencia del reactor y producción de biogás.

El arranque del proceso está ligado a una fuerte dependencia de la concentración de azúcares reductores totales (ART), éstos son compuestos solubles que son fácilmente metabolizados por los microorganismos (etapa hidrolítica). Una alta concentración de ART favorece el arranque del proceso y el buen funcionamiento del reactor. La materia orgánica disuelta en la hidrólisis se biodegrada en ácidos grasos volátiles (AGV) como resultado de la acidogénesis, en la que la inhibición de microorganismos metanogénicos puede provocar acumulación de AGV

⁹ Marti, J., 2008. Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación. , p.81.

ocasionando disminución de los valores de pH y por ello es un parámetro muy importante en la producción de biogás.

Las variables de respuesta (AGV, ART, T, pH, ST) del proceso de digestión anaerobia, son el principal objetivo de estudio y tratamiento pertinente para tener un rendimiento eficiente del biodigestor.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo se desarrolló en la modalidad práctica empresarial, dentro de la Finca Tosoly, en el campo de la digestión anaerobia. Para este trabajo se seleccionó como modelo de estudio un biorreactor continuo tubular plástico (BCTP), con operación continua, cuyas características se especifican en la figura 4 y en la tabla 1.

Figura 4. a) Biorreactor continuo tubular plástico (BCTP)

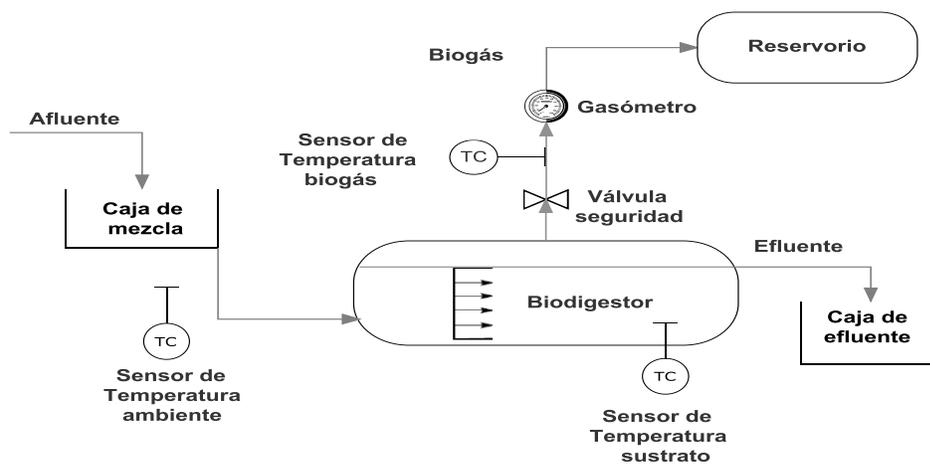


Figura 4. (b) Registro fotográfico, biorreactor continuo tubular plástico (BCTP), finca TOSOLY



Tabla 1. Especificaciones técnicas del biorreactor continuo tubular plástico (BCTP)

Parámetro	Valor
Dimensiones generales (m)	Largo: 6 m Diámetro: 1 m
Volumen total (m ³)	6.75 m ³
Volumen líquido (sin presión de gas) (m ³)	5.4 m ³
Volumen líquido (máxima presión) (m ³)	4.69 m ³
Porcentaje de líquido	75 %
Porcentaje de biogás	25 %
Tipo de membrana	Polietileno tubular calibre 18 con protección UV
Dimensiones de la zanja (m)	Ancho superior: 0.9 m Ancho inferior: 0.7 m Largo: 6 m Profundidad: 1 m
Dimensiones caja de carga y mezcla (m)	Ancho: 0.7 m Largo: 0.9 m Profundidad: 0.3 m
Dimensiones caja de almacenamiento efluente (m)	Ancho: 0.7 m Largo: 0.9 m Profundidad: 1 m
Tubería entrada (afluente)	Largo: 1m Diámetro: 5"
Tubería salida (efluente)	Largo: 1m Diámetro: 5"
Válvula seguridad (recipiente PET con agua)	Recipiente PET de 1000 ml
Válvula de bola	Diámetro: 1/2"
Líneas de transporte de gas (tubería PVC)	Longitud: 7 m Diámetro: 1/2"

Este reactor lleva en operación cerca de 15 años y se ha realizado de manera continua diariamente. El sustrato empleado es una mezcla de agua lluvia y de excretas de porcino, para lo cual el reactor está conectado al desagüe de una

porqueriza que tiene un promedio de 15-20 cerdos. Como inóculo del reactor, inicialmente, cuando se instaló se cargó con lodo estiércol porcino. El tiempo de retención hidráulico aproximado varía entre 25-30 días. Durante el periodo de operación se estableció la proporción entre excretas y agua de 1:7, con volumen de mezcla (excretas + agua) de 0.336 m³/día, e igual flujo de digestato por día, dada su operación continua.

Durante el periodo de operación (11 semanas) se monitorearon las variables de respuesta de la digestión anaerobia (DA), AGV, ART, AGV/AT, pH, con el objetivo de evaluar la capacidad de producción de biogás. La toma de muestra se realizó cada 7 días, el protocolo utilizado para la recolección, almacenamiento y traslado de la muestra se presenta en el anexo A. La muestra se tomó en la entrada y salida del biorreactor continuo tubular plástico (BCTP); en la caja de carga y mezcla (entrada) y en la caja de descarga (salida). Las muestras se recolectaron en recipientes plásticos de 400 ml, para su posterior traslado.

Tabla 2. Variables a monitorear, método analítico, unidades y periodicidad de la medición

Variable		Método analítico	Unidades	Periodicidad
Entrada	COV	Correlación matemática	Kg SV/d	Cada 7 días
	TRH	Correlación matemática	Días	Cada 20 días
	T _{entrada}	Sensor de temperatura	°C	Cada hora
Salida	VB	Gasómetro	m ³	Diario
	T _{biogás}	Sensor de temperatura	°C	Cada hora
	AGVT	standard methods	mg/L	cada 7 días
	ART	standard methods	mgCaCO ₃ /L	cada 7 días
Estabilidad	pH	Potenciométrico/NTC 5167	-	Cada 7 días
	AGVT/AT	standard methods	mg/L	Cada 7 días

Se caracterizaron el afluente y efluente del biorreactor continuo tubular plástico (BCTP), para evaluar el proceso de producción de biogás a escala piloto, Determinando la estabilidad del reactor y viabilidad de la DA. La caracterización fue realizada en el laboratorio de biotecnología de la Universidad Industrial de Santander.

El monitoreo de las variables en el reactor continuo tubular plástico, se inició en la primera semana del trabajo de campo, configurando y posicionado los sensores de temperatura en el siguiente orden: dentro del reactor (T_{sustrato}), en el gasómetro ($T_{\text{gasómetro}}$), y al ambiente (T_{ambiente}), con el fin de determinar la temperatura adecuada para la producción de biogás. También se estableció la posición e instalación del gasómetro para hacer el respectivo seguimiento de producción de biogás.

Durante el monitoreo se hace un seguimiento a la producción de excretas, para establecer una carga determinada al biorreactor continuo tubular plástico (BCTP), además previo al monitoreo se hicieron las siguientes mejoras: instalación de invernadero, revisión y adecuación de líneas de transporte de gas, reubicación de gasómetro, adecuación de carga de mezcla (elaboración de tapa), pre tratamiento a la carga. Implementadas durante esta etapa para favorecer la DA garantizando las condiciones de operación apropiadas.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

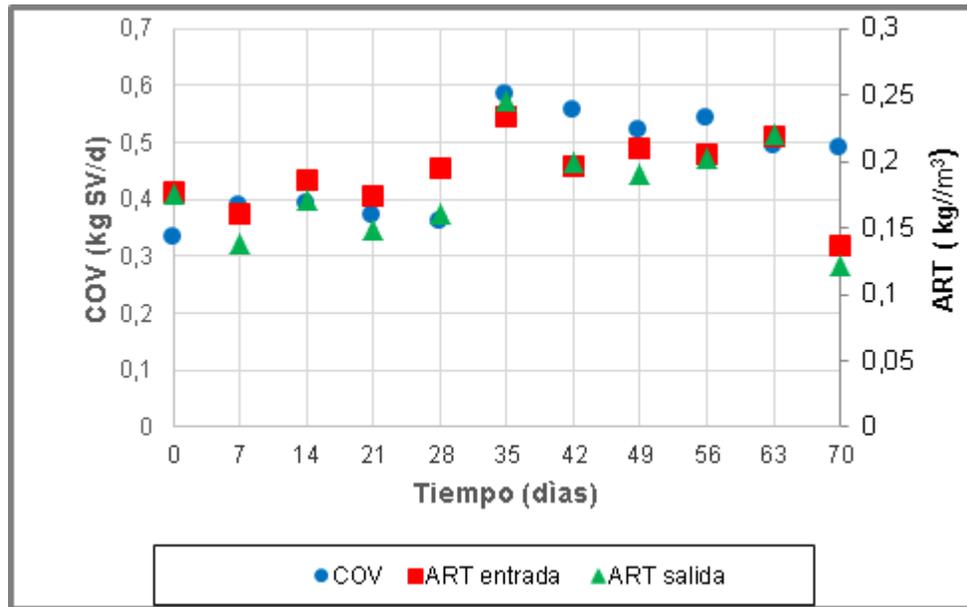
En la tabla 3 se presenta datos de temperatura ambiente y salida de biogás, en operación del biorreactor continuo tubular plástico (BCTP), se evidencia una variación baja, que indica que la temperatura no incide significativamente en la producción de biogás.

Tabla 3. Efecto de la temperatura sobre la operación del biorreactor continuo tubular plástico (BCTP)

Día	T _{ambiente día} (°C)	T _{ambiente noche} (°C)	T _{biogás día} (°C)	T _{biogás noche} (°C)
0	32.08	20.51	32.29	20.23
7	30.45	20.43	31.77	20.99
14	31.14	19.37	30.36	19.91
21	33.44	20.32	32.8	20.59
28	30.34	20.78	30.15	20.23
35	28.08	19.69	29.36	20.19
42	30.12	20.25	28.64	20.63
49	31.26	20.11	31.63	20.75
56	33.30	19.74	33.68	20.31
63	30.54	19.13	30.22	19.67
70	31.8	19.73	32.12	20.47

El comportamiento de la materia orgánica disponible para conversión a biogás presente en la alimentación del BCTP (COV) varió en el intervalo (0.047431 – 0.082868) durante los 70 días de monitoreo (Figura 5). En el inicio del seguimiento se trató con una alimentación de los cerdos previamente establecida a base de salvado de arroz pero a partir del día 28, por decisión de la administración de TOSOLY, a la dieta de los animales se les agregó hojas de bore y jugo de caña de azúcar.

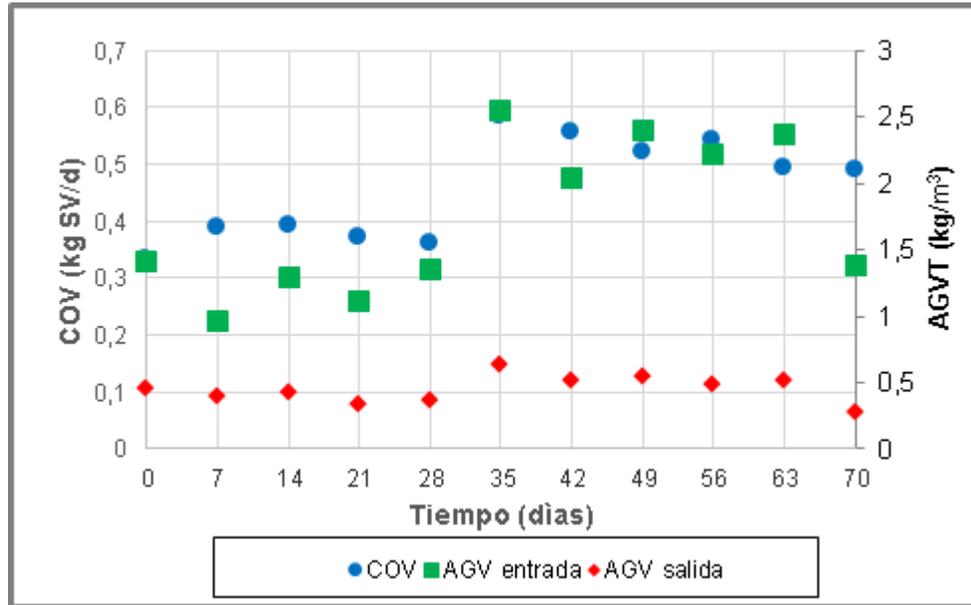
Figura 5. Variación de la COV y variación de ART



Los ART del afluente durante el seguimiento al reactor están entre (0.137171-0.234090). Estos ART representan la materia orgánica soluble con la que se dará inicio al proceso en la etapa hidrolítica. Los ART del efluente representan la materia soluble que no se convirtió en gas, con un comportamiento entre (0.121430-0.245109), ésta materia queda disponible en el biol y puede ser aprovechada en el reciclaje de nutrientes (Figura 5).

La etapa acidogénica deja como resultado los AGVT, en la entrada del BCTP estuvieron entre (0.96-2.55); este rango de valores evidencia la continuidad del proceso de DA además que al estar tan diluida la COV, disminuye el riesgo de acumulación de AGV y de inhibición por acidificación dentro del reactor (Figura 6).

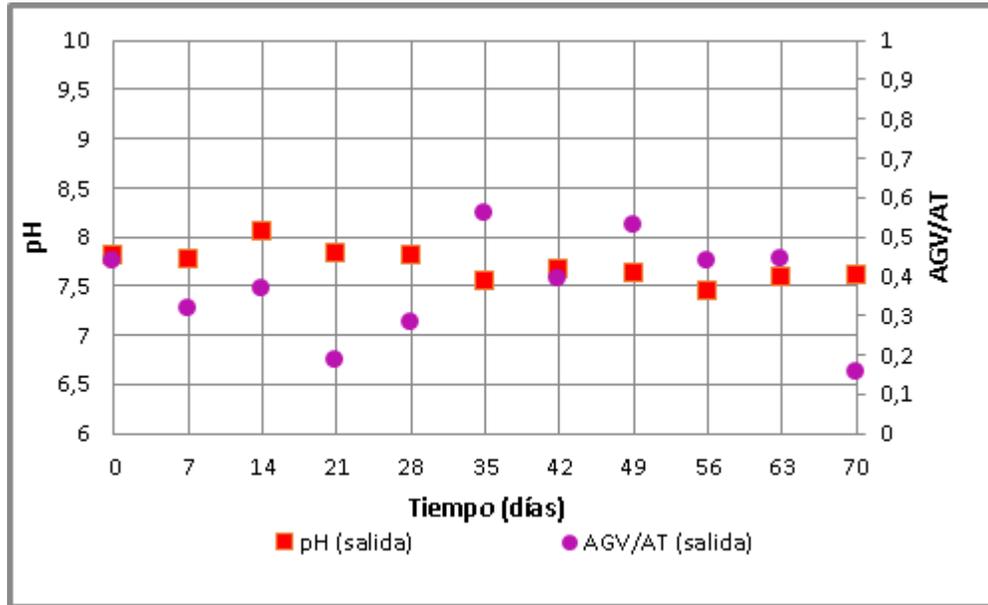
Figura 6. Variación de la COV y variación de AGV



Los AGVT en la salida, al encontrarse dentro de los valores (0.27-0.63) muestran la cantidad de materia orgánica aún disponible en el efluente para que pueda ser aprovechada en el reciclaje de nutrientes (Figura 6)

La relación AGV/AT se puede utilizar como una medida de la estabilidad del proceso anaerobio (Raposo *et al.*, 2009). Cuando esta relación es superior a 0.4 sugiere la presencia de disturbios en el proceso de la digestión (Rodríguez *et al.*, 2013). El rango de pH estipulado para el buen funcionamiento de un reactor de este tipo está entre 6 y 8, siendo el pH neutro el ideal.

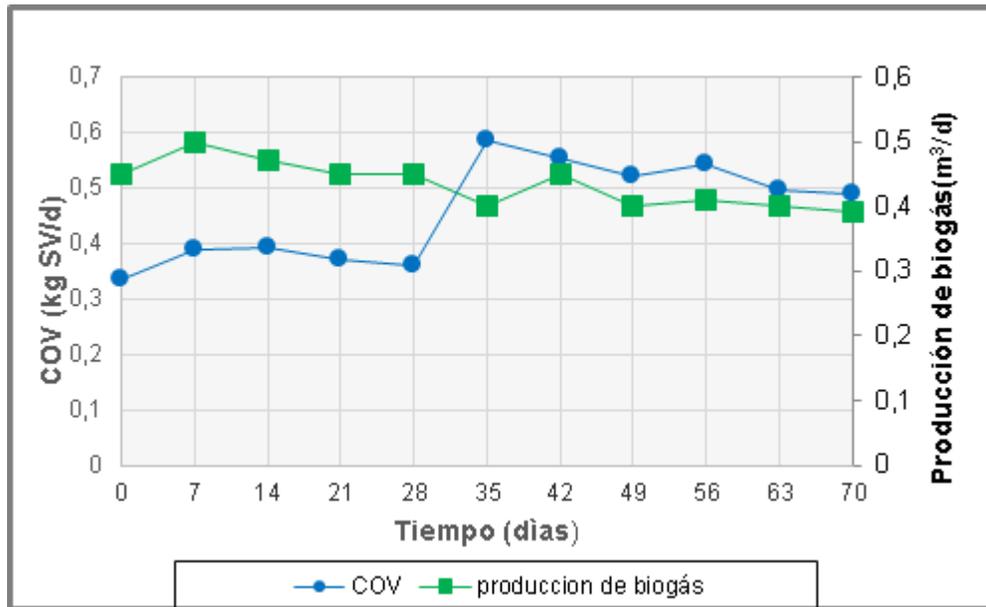
Figura 7. Comportamiento del pH y la relación AGV/AT



Los datos registrados de AGV/AT a la salida del BCTP muestran que los valores están dentro del rango apropiado para evitar acidificación, o sea, entre 0.1 – 0.4. El pH obtenido en la respectiva medición a la salida del reactor evidencia que durante el tiempo de seguimiento se operó en el rango permitido, gracias a esto es de asumir que el reactor mantuvo su estabilidad, tuvo un buen desempeño y todas las etapas de la DA se desarrollaron garantizando producción de biogás (Figura 7).

La figura 8 evidencia la producción de biogás durante los 70 días de seguimiento al BCTP registrando un comportamiento entre (0.4 m³ – 0.5 m³). El cambio en la COV a partir del día 28 no tuvo una influencia importante en el proceso de DA pues no se presentaron fluctuaciones destacables en el volumen de gas producido.

Figura 8. Variación de la COV y Producción de biogás



4. CONCLUSIONES

Se comprobó que el biorreactor continuo tubular plástico de la finca TOSOLY, que en la actualidad tiene 15 años de instalado, presenta un desempeño favorable dado que para una carga 1:7 excretas-agua consiguió alcanzar un rendimiento en producción de biogás entre 0.4 y 0.5m³/día

Dado que el biorreactor continuo tubular plástico tiene 15 años de instalado, el inóculo respondió al cambio de la carga, durante 70 días de operación, mejorando la producción de biogás.

El monitoreo fisicoquímico del biorreactor continuo tubular plástico, durante 70 días, permitió evidenciar que su desempeño es estable.

La operación técnica de estos biorreactores es sencilla, por lo tanto es una excelente alternativa de suministro energético a nivel rural.

5. RECOMENDACIONES

La aplicación de unos pre tratamientos adecuados la carga del biodigestor, mejorará el rendimiento de la digestión anaerobia (DA), aumentando la producción y la calidad del biogás, reduciendo los tiempos de retención, creando unas condiciones óptimas para el crecimiento microbiano. En general, los pretratamientos a utilizar pueden ser: mecánicos, térmicos.

Es importante establecer una técnica de agitación, para tener un mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor y prevenir la sedimentación en el reactor.

Mejorar el sistema de alimentación, evitando las fluctuaciones de carga.

Establecer una técnica de agitación para tener un mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra dentro del biorreactor continuo tubular plástico, y espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor y previniendo la sedimentación.

BIBLIOGRAFÍA

Angelidaki I., Karakashev D., Batstone D., Plugge C., Stams A “Biomethanation and Its Potential” En: Methods in Methane Metabolism. In R. and Ragsdale, ed. *Elsevier Applied Science*,. Inglaterra: Elsevier Applied Science, pp. 327–348.

Babae, A. & Shayegan, J., 2011. Effect of Organic Loading Rates (OLR) on Production of Methane from Anaerobic Digestion of Vegetables Waste. *World renewable energy Congress*, pp.411–417. Available at: http://www.ep.liu.se/ecp_article/index.en.aspx?issue=57;vol=1;article=55.

Botero Botero, R. & Preston, T.R., 1987. Biodigestor de bajo costo para la produccion de combustible y fertilizante a partir de excretas. *Bbc*, p.20.

Eroglu S., Toprak S., Urgan O, MD, Ozge E. Onur, MD, Arzu Denizbasi, MD, Haldun Akoglu, MD, Cigdem Ozpolat, MD, Ebru Akoglu, M., 2012. MANUAL DE BIOGÁS. *Saudi Med J*, 33, pp.3–8.

Escalante, H., Orduz, J. y Zapata, L. (2010). *Atlas del potencial energético*. Unidad de planeación minero energética, Universidad Industrial de Santander,UIS.

Gon, L.M.I., 2008. Guía para proyectos de biodigestión en establecimientos agropecuarios. , pp.1–27.

Guevara, A., 1996. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. , pp.1–80.

Marti, J., 2008. Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación. , p.81.

Preston, T., 2005. Los biodigestores en los sistemas agrícolas ecológicos. *LEISA - Revista de Agroecología*, 21(1), pp.18–22.

Raposo, F., Borja, R., Martín, M.A., Martín, A., de la Rubia, M.A., Rincón, B. (2009). Influence of inoculum–substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 149, 70-77.

Samayoa, S., Bueso, C. & Viquez, J., 2012. Implementación de sistemas de biodigestión en ecoempresas de sistemas de biodigestión. Available at: http://www.snvworld.org/sites/www.snvworld.org/files/publications/guia_sistema_de_biodigestion_web.pdf.

Shin, H.-S. & Youn, J.-H., 2005. Conversion of food waste into hydrogen by thermophilic acidogenesis. *Biodegradation*, 16(1), pp.33–44. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15727153>.

Wang, H., Lehtomäki, A., Tolvanen, K., Puhakka, J., Rintala, J. (2009). Impact of crop species on bacterial community structure during anaerobic co-digestion of crops and cow manure. *Bioresource Technology*, 100, 2311-2315.

Wang, M., Sun, X., Li, P., Yin, L., Liu, D., Zhang, Y., Li, W., Zheng, G. (2014). A novel alternate feeding mode for semi-continuous anaerobic co-digestion of food waste with chicken manure. *Bioresource Technology*, 164, 309-314.

Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J., Jones, D.L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99, 7928-7940.

Yangin-Gomec, C., Ozturk, I. . (2013). Effect of maize silage addition on biomethane recovery from mesophilic co-digestion of chicken and cattle manure to suppress ammonia inhibition. *Energy Conversion and Management*, 72, 92-100.

ANEXOS

ANEXO A. PROTOCOLO PARA LA TOMA DE MUESTRA EN LA EN EL REACTOR CONTINUO, PLÁSTICO TUBULAR

Materiales

- Nevera de icopor
- Hielo
- Recipientes de plástico de 400 ml
- Tapa bocas
- Guantes de nitrilo
- Balde
- Cinta de enmascarar
- Marcador permanente
- pH-metro

Procedimiento

1. Recolectar la muestra en un balde.
2. Almacenar la muestra en recipientes de 400 ml.

3. Medir el pH, rotular las muestras con nombre del lugar, día y fecha de la toma de la toma de muestra.
4. Depositar los recipientes en la nevera de icopor para mantenerlos a temperatura adecuada .para su traslado.
5. Trasladar la muestra al laboratorio para sus correspondientes caracterizaciones, manteniéndolas refrigeradas hasta su uso.

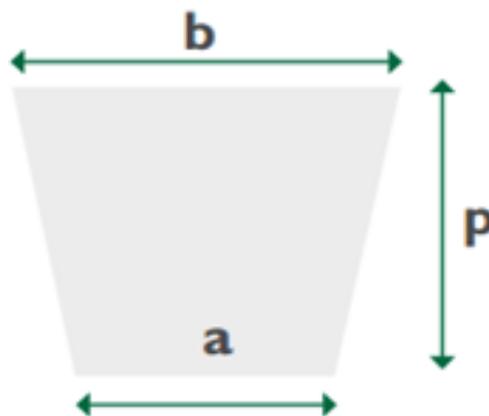
ANEXO B. MANUAL PARA INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y UTILIZACIÓN DE UN BIORREACTOR CONTINUÓ TUBULAR PLÁSTICO (BCTP) DE BAJO COSTO

Principalmente se debe elegir el punto en donde se instalará el biorreactor, debe ser accesible y a la vez no interrumpir el camino de animales o personas. Teniendo clara la ubicación del biorreactor se procede a cavar la zanja, sus dimensiones dependerán principalmente del ancho de rollo del plástico que se empleará.

Es conveniente que la excavación se realice en forma de “V” y que además el fondo de la zanja no presente desnivel para no perjudicar el equilibrio hidráulico del biodigestor, en caso contrario, una inclinación de 5% es lo máximo permitido.

Tabla 4. Dimensiones de la zanja según el ancho del rollo de membrana (AR)

AR (m)	2	1.75	1.5	1.25	1
a (m)	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
b (m)	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
p (m)	1	0.9	0.8	0.7	0.6



Es de vital importancia forrar las paredes laterales así como el fondo de la excavación para evitar daño del plástico por el roce que se presenta al acomodar el reactor dentro de la zanja¹⁰ .

La construcción del biorreactor continuo tubular plástico (BCTP) debe hacerse en un salón con capacidad suficiente para las dimensiones del reactor con el piso previamente aseado, de no tener las instalaciones adecuadas, la fabricación puede hacerse al aire libre previniendo la presencia de rocas u objetos que puedan dañar e material. Recortar el plástico recordando que se debe adicionar un metro para los amarres de los tubos de afluente y efluente.

Como se tendrá un reactor con doble capa de plástico es claro que se deben cortar dos capas de igual longitud, la primera capa se extenderá en el suelo mientras que la segunda se recogerá con mucho cuidado de manera que una persona logre sujetarla de un extremo y atravesar el interior del cilindro igualando las dos capas.

Es preciso ubicar la salida de biogás, es recomendable que esté ubicada más cerca del punto de alimentación del biorreactor continuo tubular plástico (BCTP), si hay inclinación la campana de gas se formará más cerca de la entrada, es una forma de compensar la inclinación y no afectar la salida de gas. A esta salida se le acoplará un tramo de tubería de pvc de ½ pulgadas junto a una llave de bola que permanecerá cerrada.

Una vez hecha la instalación de la salida de gas se puede proceder a los amarres de los tubos de afluente y efluente cuyo procedimiento es el mismo para los dos, proteger el extremo que irá dentro del reactor para que el filo de éstos no produzca daños en el plástico, el plástico alrededor de los tubos se recoge haciendo pliegues en forma de acordeón hasta tenerlo contra el tubo, ahí se procede al amarre con

¹⁰ Marti, J., 2008. Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación. , p.81.

liga de automóvil o motocicleta solapando cada vuelta sobre la anterior lentamente y con fuerza¹¹.

En este punto ya se tiene la ubicación y fabricación del biorreactor continuo tubular plástico (BCTP), se procede entonces a la instalación en la zanja, para esto previamente se adecuó la zanja forrándola para evitar daños al material durante la puesta dentro de ésta. Es de tener en cuenta que la boca de salida del efluente irá a nivel con el tope de volumen líquido o lo que es lo mismo, la altura de la zanja, de esta forma el tubo de alimentación del biorreactor quedará más elevado que el de efluente, quedando la boca de salida en medio del amarre de la tubería.

Se procede entonces a alimentar el biodigestor con la primera carga, para esto es recomendable comenzar a acumular estiércol 7 días antes de la instalación, mezclado el estiércol con el agua en una relación 1:3 (siendo 1 parte de excreta por 3 de agua), de no ser suficiente el lodo acumulado es viable terminar la alimentación con agua corriente hasta que las bocas internas de los tubos de alimentación y evacuación estén tapadas de líquido por completo, ésta es la forma de asegurar que no entrara aire al sistema.

Lo que resta es terminar la línea de conducción del gas desde la boquilla hacia el reservorio (tanque de almacenamiento del biogás) y de éste hacia la cocina o destino que se le quiera brindar al gas. Es indispensable ubicar una válvula de seguridad en la salida del biogás como vía de escape del gas en caso de que éste no se consuma, también introducir lana de acero (bombril) dentro de la tubería de conducción de gas ayudará a retener parte del H₂S generado (reduciendo olores) y evitará que una combustión externa se propague por la tubería evitando explosiones¹².

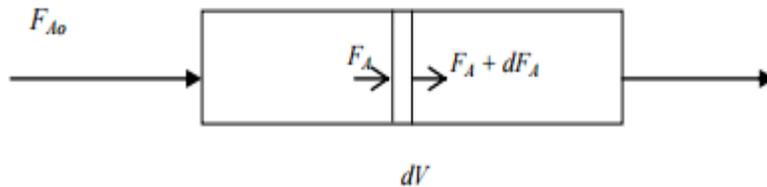
¹¹ Botero Botero, R. & Preston, T.R., 1987. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. *Bbc*, p.20.

¹² Marti, J., 2008. Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación. , p.81.

ANEXO C. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH) PARA REACTORES DE FLUJO PISTÓN

El reactor tubular de flujo en pistón (RTFP) se caracteriza porque el flujo de fluido a su través es ordenado, sin que ningún elemento del mismo sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de aquel, esto es, no hay mezcla en la dirección de flujo (dirección axial). Como consecuencia, todos los elementos de fluido tienen el mismo tiempo de residencia dentro del reactor.

Se estudia este reactor en estado estacionario, o sea que el término de acumulación desaparece en el balance. Como la composición del fluido varía a lo largo del reactor el balance de materia debe realizarse en un elemento diferencial de volumen transversal a la dirección de flujo.



Entrada = Salida + Desaparición por reacción

$$F_A = F_A + dF_A + r_A dV$$

Teniendo en cuenta que $dF_A = d[F_{A0}(1 - X_A)] = -F_{A0} dX_A$ por sustitución queda

$$F_{A0} dX_A = r_A dV$$

Que integrada queda

$$\int_0^V \frac{dV}{F_{A0}} = \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A}$$

o bien

$$\text{TRH} = V/Q$$

Dónde:

TRH = Tiempo de retención hidráulico [días]

V = Volumen del BCTP [m^3]

Q = Caudal de alimentación del BCTP [$\frac{m^3}{día}$]

ANEXO D. REGISTRO FOTOGRÁFICO.

Reactor continuo tubular plástico Finca TOSOLY



Modificación de las condiciones de operación del RCTP Finca TOSOLY



Ajuste completo de las condiciones Térmicas de operación del RCTP



Alimentación del RCTP



Gasómetro



Horno de mufla con muestras para ST y SV



Estufa biogás finca TOSOLY



Calentamiento de muestras para determinar ART



Preparación de muestras para prueba DNS



Espectrofotómetro para ART



Prueba titulométrica para determinar AGV



Calentamiento de muestra para determinar AGV

