

Producción de Biogás y compost a partir de Residuos Orgánicos recolectados del Complejo Arqueológico Huaca de la Luna

Alejandro W. Padilla Sevillano¹, José F. Rivero Méndez²

¹Magister en Ingeniería Ambiental. Docente- Investigador del Departamento de Química - Facultad de Ingeniería Química – UNT.

²Doctor en Medio Ambiente. Docente- Investigador del Departamento de Química – Facultad de Ingeniería Química – UNT

Recibido: 07-07-2015

Aceptado: 16-09-2015

RESUMEN

La investigación fue basada en la producción de biogás y compost a partir de las aguas residuales de proyectos arqueológicos, debido a que no cuentan con servicios de alcantarillado, utilizando pozos sépticos para su mantenimiento, los cuales periódicamente se acumularon en función a la cantidad de los visitantes, (Tabla 01); ocasionando un problema de contaminación por sus lixiviados a las aguas subterráneas y así mismo un costo en la limpieza de los pozos sépticos; por lo que se propuso una manera de remediar este problema, desarrollándolo en tres etapas; iniciando la investigación con la caracterización de los desechos orgánicos acumulados en los pozos sépticos cuantificando sus sólidos totales, sólidos totales volátiles, Demanda bioquímica de Oxígeno, Demanda Química Oxígeno, potencial de hidrógeno (pH), materia orgánica y el volumen de acumulación con respecto al tiempo y a la cantidad de turistas que visitaron por año, teniendo como referencia que el pozo séptico ubicado en el parador turístico de Huaca de la Luna con capacidad de 7,0 m³ se llenó en un periodo de 12 meses con un cantidad de 80 mil visitantes aproximadamente; la segunda etapa consistió en la producción del biogás y compost en laboratorio con 2 biodigestores (vidrio y polietileno) con una capacidad de 10 litros cada uno, obteniendo mejores resultados en el biodigestor de polietileno con la mayor producción de biogás de 17 % en promedio con respecto al biodigestor de vidrio, así como también en el compost, obteniendo mayores concentración de Nitrógeno con 1,83 y 1,34 con respecto al biodigestor de vidrio, de fosforo con 0,23 y 0,18; potasio 1,18 y 0,56 mg/Kg respectivamente; por consecuencia el mayor beneficio económico se da en este biodigestor, y finalmente como tercera etapa se propuso el diseño de un biodigestor de polietileno de una capacidad de 20 m³ para el tratamiento de residuos generados por los turistas para un tiempo de 3 años de acumulación. Siendo esta instalación factible porque minimizaría la contaminación de la napa freática y disminuiría el presupuesto anual de la limpieza de pozos sépticos.

Palabras Claves: Biogás, Compost, Residuos Orgánicos.

ABSTRACT

The research was based on the production of biogas and compost from sewage archaeological projects, because they do not have sewerage, using septic tanks for maintenance, which periodically accumulated according to the amount of visitors (Table 01); causing a problem of contamination by its leachate into groundwater and likewise a cost in cleaning septic tanks; so they proposed a way to remedy this problem, developing in three stages; initiating research with the characterization of organic waste accumulated in the septic quantifying total, total solids volatile solids, biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand, potential of hydrogen (pH), organic matter accumulation and volume compared to time and the number of tourists visiting each year, with reference to the septic tank located in the tourist center of Huaca de la Luna with 7,0 m³ capacity was filled in a period of 12 months with an amount of approximately 80 thousand visitors; the second stage was the production of biogas and compost laboratory with 2 digesters (glass and polyethylene) with a capacity of 10 liters each, obtaining better results in the polyethylene biodigester biogas as 17% on average digester compared to glass, as well as

compost, obtaining higher nitrogen concentration of 1,83 and 1,34 relative to digester glass, phosphor with 0,23 and 0,18; Potassium 1,18 and 0,56 mg / kg respectively; consequently the greatest economic benefit occurs in the digester, and finally as the third stage digester design a polyethylene with a capacity of 20 m³ for the treatment of waste generated by tourists for a period of 03 years was proposed. This installation being feasible because minimize pollution of the water table and decrease the annual budget of the cleaning of septic tanks.

Keywords: biogas, compost, organic waste.

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación tubo como finalidad el diseño de un biodigestor para producir biogás y compost a partir de los residuos orgánicos (aguas residuales) emitidos por los visitantes al proyecto arqueológico Huaca de la Luna. Lo que nos permitieron disminuir la contaminación de los suelos y el agua subterránea de la zona, por los lixiviados generados; así como también aminorar los gastos de limpieza de los pozos sépticos, toda vez que en los últimos años se va incrementado la cantidad de visitantes nacionales y extranjeros, lo que ha producido mayor generación y acumulación de residuos orgánicos, que directamente origina un costo en su tratamiento de deposición y eliminación, debiendo ser removidos periódica de la pozos sépticos causando un presupuesto anual a los proyectos arqueológicos.

Con este trabajo proponemos una nueva forma de tratar estas aguas residuales utilizando tecnologías limpias produciendo biogás y abono natural; y al mismo tiempo concientizar a los pobladores y/o administradores de proyectos arqueológicos a utilizar estos biodigestores para disminuir la contaminación, el costo de mantenimiento y limpieza de los pozos sépticos. Hay que recalcar que existen varios trabajos sobre la obtención de biogás y compost, pero este proyecto está orientado básicamente y de manera concreta a esta zona que carece precisamente de sistemas de alcantarillado, lo que conlleva a aportar a una solución de un problema real de la sociedad. Es además indiscutible los beneficios que tendría la población aledaña al proyecto y los demás proyectos arqueológicos de la región, el poder utilizar un biodigestor para obtener el biogás y compost libre de contaminantes como metales pesados etc.

Dicha investigación se realizó en tanques con 10 litros de agua residual con un dispositivo para captar y almacenar el biogás; este proceso ocurre por la existe de microorganismos bacterianos anaeróbicos presentes en el material fecal, que al actuar sobre los desechos orgánicos producen una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH₄) llamada biogás. Realizándose en tres etapas, la primera los compuestos orgánicos son Hidrolizados y Fermentados a ácidos grasos, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono; la segunda las bacterias Acetogénicas generan ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Y finalmente la tercera las bacterias Metanogénicas generan el metano.

En la **Tabla 01** mostramos el aumento de turistas por año en Huaca de la Luna.

AÑOS	NACIONALES	%	EXTRANJEROS	%	TOTAL	AUMENTO TURISTAS	% DE AUMENTO
1996	25793	75	8598	25	34390		
1997	25972	73,04	9587	26,96	35559	1169	3,4
1998	24368	74	8562	26	32930	-2629	-7,39
1999	34576	77	10328	23	44904	11974	36,36
2000	34967	76,26	10884	23,74	45851	947	2,11
2001	40234	71	16434	29	56668	10817	23,59
2002	42014	73	15539	27	57553	885	1,56
2003	46006	69	20669	31	66675	9122	15,85
2004	56431	72	21946	28	78377	11702	17,55
2005	59969	70,93	24579	29,07	84548	6171	7,87
2006	73188	75,6	23616	24,4	96804	12256	14,5
2007	69638	70,32	29386	29,68	99024	2220	2,29
2008	84529	74,41	29066	25,59	113595	14571	14,71
2009	69263	70,57	28880	29,43	98143	-15452	-13,6

Viene de la Tabla 1...

2010	82425	76,36	25519	23,64	107944	9801	9,99
2011	86139	75,14	28502	24,86	114641	6697	6,2
2012	92524	75,44	30118	24,56	122642	8001	6,98
2013	97798	77,6	28226	22,4	126024	3382	2,76
2014	95437	77,25	28111	22,75	123548	-2476	-1,96
TOTAL	1141271	74,12	398550	25,88	1539820		9,14

1.1. Biodigestores.

1.1.1. Marco teórico.

Un digestor de desechos orgánicos o biodigestor es una forma simple de un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales - no se incluyen cítricos ya que acidifican) en determinada dilución de agua para que a través de la fermentación anaerobia se produzca gas metano y fertilizantes orgánicos rico en nitrógeno, fósforo y potasio, y además, se disminuya el potencial contaminante de los excrementos. Asimismo, el sistema puede incluir una cámara de carga y nivelación del agua residual antes del reactor, un dispositivo para captar y almacenar el biogás y cámaras de hidrogenación y pos tratamiento (filtro y piedras, de algas, secado, entre otros) a la salida del reactor (López-Pérez, 2014: 16-56)

El fenómeno ocurre porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos presentes en el material fecal que, al actuar sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal, producen una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH₄) llamada biogás, que es utilizado como combustible y como resultado de este proceso se generan residuos con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica (ideales como fertilizantes) que pueden ser aplicados frescos, pues el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas, dando lugar a una de las características más importantes de la biodigestión es que disminuye el potencial contaminante de los excrementos de origen animal y humano, disminuyendo la Demanda Química de Oxígeno DQO y la Demanda Biológica de Oxígeno DBO hasta en un 90% (dependiendo de las condiciones de diseño y operación).

La adopción de biodigestores ha sido muy alta entre agricultores de áreas donde la leña escasea o el acceso a electricidad u otras fuentes de energía es limitado, cuya situación ha sido observada en campos Agrícolas de Colombia, Costa Rica, Ecuador, y los autores han estado envueltos en varios programas de extensión, teniendo como resultado de que en la tecnología de biogás, se han desarrollado diferentes diseños de extracción como el caso del tipo de la India, con una campana flotante o el modelo chino de campana fija para el almacenamiento de biogás (Brown, 1987; Marchaim, 1992, 23-65) de acuerdo a la experiencia de Xuan An *et al.* (1997a), en zonas tropicales los modelos de la India (también conocido como Gobar) y el modelo Chino han tenido problemas por la aparición de grietas en el concreto usado para construir estas unidades, especialmente durante periodos largos de altas temperaturas.

Impulsado por la intención de resolver estos problemas, el Dr. T.R. Preston desarrolló un sistema de biodigestor utilizando polietileno, en vez de cemento, como material esencial en su instalación. Una de las principales ventajas de un biodigestor de polietileno (BDP), comparado con otros modelos de digestores, es el bajo costo de instalación y mantenimiento (Xuan An *et al.*, 1997b; Botero *et al.*, 2000). Además, los materiales usados en la instalación de biodigestores de polietileno son normalmente encontrados sin dificultades en zonas rurales y tienen la ventaja de ser de bajo peso (Botero *et al.*, 2000; Aguilar, 2001a 65-83).

Los Beneficios Económicos Totales constituyen un concepto que incluye beneficios directos y valores funcionales derivados de la adopción de una nueva tecnología. Los beneficios directos incluyen, por ejemplo, gastos no incurridos en la compra de otros combustibles convencionales, gracias al uso de biogás y del efluente del biodigestor.

Valores funcionales incluyen el potencial de la tecnología para disminuir impactos ambientales causados por otras fuentes convencionales de energía.

1.1.2. Importancia de los Biodigestores.

La población mundial supera en la actualidad los 5 000 millones de habitantes y la producción de residuos sólidos urbanos de cada uno de los habitantes de la Tierra oscila ampliamente según el país, entre los valores de 0,4 y 1,2 kg/hab y día.

La siguiente **Tabla 02** muestra la producción de residuos urbanos a nivel mundial y por continentes

Continente	Residuos (10 ⁶ t/año)
África	78
Asia	390
Europa	230
América	390
Australia y Oceanía	14
TOTAL	1,102

Fuente: EPA's Air and Energy Engineering Research Laboratory (AEERL)

La mayor parte de estos residuos son depositados en vertederos incontrolados. Sólo un pequeño porcentaje de los residuos termina en un vertedero controlado, es incinerado o es reintroducido en el ciclo productivo, vía reutilización, reciclaje o compostaje. Aún en los países occidentales el vertido es la solución más extendida para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos. En España, Grecia y Portugal todavía se vierten de forma incontrolada gran parte de los Residuos sólidos urbanos.

La Comisión Europea, en la última Propuesta de Directiva sobre vertido de residuos (5 de marzo de 1997), sitúa el vertido muy por detrás de las estrategias de reducción, reciclaje y valorización de los residuos. La propuesta pretende suprimir a medio plazo el vertido de residuos biodegradables, con objeto de reducir las emisiones de lixiviados y de metano.

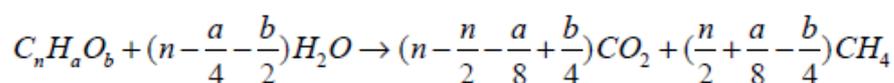
1.1.3. Etapas de la degradación anaerobia

La materia orgánica contenida en los residuos sólidos se degrada de forma anaerobia. Como resultado de esta degradación, se desprende una mezcla gaseosa constituida fundamentalmente por metano y oxígeno. Los microorganismos responsables de esta transformación forman un ecosistema complejo, donde los residuos de la acción de unos, son aprovechados como nutrientes por otros.

Se distinguen, de forma general, tres etapas en la degradación de la materia orgánica dentro de un vertedero.

- Primera Etapa.** Los compuestos orgánicos son **HIDROLIZADOS y FERMENTADOS** a ácidos grasos, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Segunda Etapa.** Las bacterias **ACETOGENICAS** generan ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Tercera Etapa.** Las bacterias **METANOGENICAS** generan metano.

Estas tres etapas se resumen en la siguiente reacción general:



La hidrólisis es el paso crítico del proceso, que limita la velocidad de degradación de los residuos y la generación de metano, pues los microorganismos necesitan que sus nutrientes estén disueltos en agua para actuar. Es llevada a cabo por bacterias fermentativas que generan enzimas extra-celulares. Estas bacterias son un amplio y heterogéneo grupo que incluye bacterias anaerobias y bacterias anaerobias - facultativas.

Las bacterias acetogénicas, responsables de la segunda etapa, también constituyen un amplio y heterogéneo grupo. Generan ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono cuando el ácido graso volátil que consumen contiene un número impar de átomos de carbono. Estas bacterias pueden también consumir compuestos aromáticos que contengan oxígeno (p.ej., ácido benzoico y fenoles), pero no hidrocarburos aromáticos (p.ej. benceno y tolueno)

Las bacterias metanogénicas, responsables de la tercera etapa, son obligatoriamente anaerobias y requieren potenciales REDOX muy bajos. Un grupo, las hidrogenofílicas, convierten hidrógeno y dióxido de carbono en metano, mientras que otro grupo, las acetofílicas, convierten principalmente ácido acético en metano y dióxido de carbono.

Las bacterias metanogénicas también pueden convertir ácido fórmico y metanol. La conversión de ácido acético en metano es considerada la fuente más importante de metano.

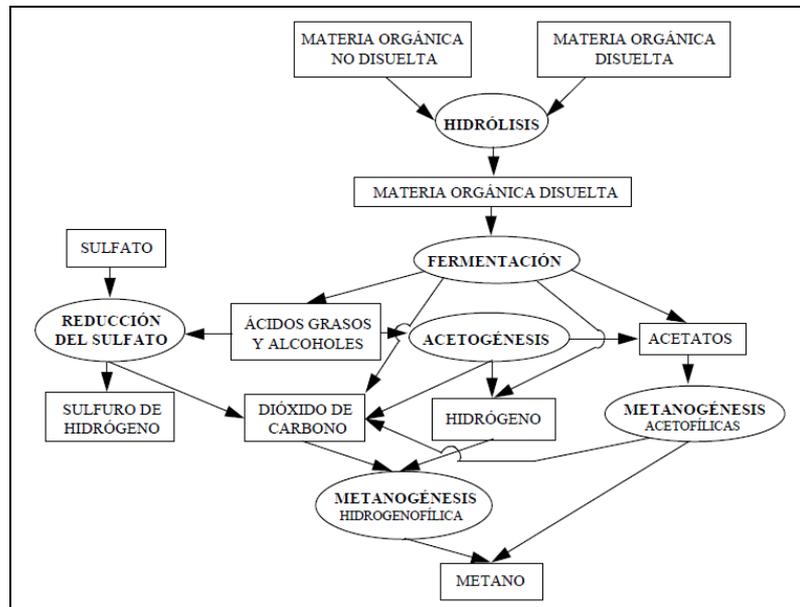


Fig. 1. Etapas de degradación anaeróbica de los RSU.

Finalmente, las bacterias sulfato-reductoras juegan un importante papel, similar al de las metanogénicas, ya que los sulfatos son componentes mayoritarios en muchos tipos de residuos (de construcción, de incineradoras, etc.). Las bacterias sulfato-reductoras son anaerobias siempre y pueden transformar hidrógeno, ácido acético y ácidos grasos altamente volátiles durante la reducción de los sulfatos. El carbono orgánico se oxida siempre a dióxido de carbono de forma opuesta a lo que ocurre con las bacterias metanogénicas. Una actividad alta de las bacterias sulfato-reductoras puede entonces hacer decrecer la cantidad de productos orgánicos disponibles para la generación de metano

Principales reacciones de conversión en el ecosistema anaerobio - Bacterias Fermentativas

Bacterias Fermentativas		
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O$	→	$2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2$
$C_6H_{12}O_6$	→	$CH_3C_2H_4COOH + 2H_2 + 2CO_2$
$C_6H_{12}O_6$	→	$2CH_3CH_2OH + 2CO_2$
Bacterias Acetogénicas		
$CH_3CH_2COOH + 2H_2O$	→	$CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$
$CH_3C_2H_4COOH + 2H_2O$	→	$2CH_3COOH + 2H_2$
$CH_3CH_2OH + H_2O$	→	$CH_3COOH + 2H_2$
$C_6H_5COOH + 6H_2O$	→	$3CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$
Bacterias Metanogénicas		
$4H_2 + CO_2$	→	$CH_4 + 2H_2O$
CH_3COOH	→	$CH_4 + CO_2$
$HCOOH + 3H_2$	→	$CH_4 + 2H_2O$
$CH_3OH + H_2$	→	$CH_4 + H_2O$
Bacterias Sulfato-Reductoras		
$4H_2 + SO_4^{-2} + H^+$	→	$HS^- + 4H_2O$
$CH_3COOH + SO_4^{-2}$	→	$CO_2 + HS^- + HCO_3^- + H_2O$
$2CH_3C_2H_4COOH + SO_4^{-2} + H^+$	→	$4CH_3COOH + HS^-$
<p>HCOOH, ácido fórmico; CH₃COOH, ácido acético; CH₃CH₂COOH, ácido propiónico; CH₃C₂H₄COOH, ácido butírico; C₆H₁₂O₆, glucosa; CH₃OH, metanol; CH₃CH₂OH, etanol; C₆H₅COOH, ácido benzoico; CH₄, metano; CO₂, dióxido de carbono; H₂, hidrógeno; SO₄⁻², sulfato; HS⁻, sulfuro de hidrógeno; HCO₃⁻, carbonato de hidrógeno; H⁺, protón; H₂O, agua</p>		

1.1.4. Parámetros ambientales y operacionales del proceso

Sabiendo que la digestión anaerobia es un proceso bioquímico complejo, es necesario mantener las condiciones óptimas para la realización tanto de las reacciones químicas en el biodigestor, como las reacciones bioquímicas intracelulares siendo algunas de estas condiciones las siguientes:

a) Temperatura

La mayoría de los digestores convencionales funcionan en la gama mesofílica, es decir, entre 12 y 35° C, optimizándose el proceso entre los 29 y 33°C. Ambas poblaciones anaerobias psicrófilas y mesofílicas son encontradas en naturaleza, en los sedimentos inferiores de los lagos y zonas pantanosas o en los estómagos de animales herbívoros. Las poblaciones termofílicas no son tan comunes en el ambiente natural, aunque la digestión anaerobia puede ocurrir en la gama termofílica de entre 37-65 °C, con un óptimo en las proximidades de los 55°C. Realmente un factor importante, para la determinación del volumen de los digestores, es la temperatura. De tal manera que la digestión termofílica permite una permanencia menor en los tanques, pero, debido a su excepcional sensibilidad a los cambios de temperatura, exige un gran control.

Es preferible por tanto, la digestión mesofílica, con temperatura controlada.

b) Concentración de los sólidos

Otro de los parámetros es los sólidos totales que en la decantación primaria, se consigue reducir en un 30% de Demanda bioquímica de Oxígeno y un 60% de sólidos en suspensión del agua residual.

Los productos residuales del proceso serán sólidos inorgánicos, líquidos y gases. Los líquidos deberán ser recirculados al proceso de tratamiento del agua residual con el objeto de disminuir el volumen de fango a la salida de la digestión. Los gases deberán ser extraídos del digestor y procesados para obtener energía y la materia inorgánica sólida, por su carácter inerte, no deberá presentar problemas de evacuación.

c) pH

Los organismos que intervienen en cada fase son diferentes, y debe establecerse un equilibrio entre la producción de ácidos y su regresión, para que ambos tipos de organismos puedan coexistir dentro del biodigestor y encuentren las posibilidades ambientales para su desarrollo. Esta es la razón de que el pH en los lodos en digestión sea indicio de que la digestión si está realizando en condiciones adecuadas, ya que, si los organismos productores de metano son inhibidos o destruidos, no se degradan los ácidos producidos y el pH dentro del digestor disminuirán progresivamente. Por debajo de pH 6.2 la supervivencia de los microorganismos productores de metano es imposible.

El control del pH determinara si los distintos procesos se realizan satisfactoriamente. El lodo digerido tiene pH comprendido entre 7 y 8. La reacción alcalina constituye la base de que el tratamiento es correcto y se está llevando a cabo.

d) El mezclado Homogéneo

En el proceso notamos que era fundamental un mezclado homogéneo de una forma más o menos continua para reducir el tiempo de producción de gas. Con ello, se conseguía reducir el tiempo de digestión.

Por tal razón, han surgido muchas formas de mezclado como el mezclado con bomba y agitación mecánica del contenido de la instalación. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas siendo las mejores razones para el mezclado las siguientes:

- Tener mayor contacto los microorganismos activos con el alimento suministrado.
- Mantener una homogeneidad térmica, previniendo la estratificación por este concepto.

e) El tiempo y la temperatura

El tiempo para la producción de gas está en función de la temperatura de digestión. Estando entre 14°C a 65 °C, las bacterias mesófilas mantienen su actividad hasta los 35°C. A partir de esta temperatura, dan paso a las bacterias que se adaptan más al calor, llamadas termófilas. Por lo que las mejores condiciones de funcionamiento, para el proceso termófilico, se dan entre los 50°C y 60°C.

f) Ácidos volátiles

La concentración de ácidos volátiles, producto de la fermentación, tiene una gran importancia en el proceso de la digestión, pues puede llegar a acidificar la materia prima del proceso. Los valores óptimos están comprendidos entre 50 y 500 mg/l como ácido acético, siendo un valor extremo 2,000 mg/l.

El aumento de la concentración de ácidos volátiles puede producirse por sobrecarga de alimentación, o por una inhibición de las metano bacterias.

g) Alcalinidad

Según Evans la mayor parte de la alcalinidad de los lodos de digestión están formados por bicarbonato amónico, provenientes de la combinación del amoniaco con el dióxido de carbono generado en la fermentación ácida. Las respectivas concentraciones de alcalinidad y ácidos volátiles dan como consecuencia la capacidad tampón del sistema. Por ello, el verdadero parámetro de control del proceso, que engloba los parámetros anteriores, (pH y ácidos volátiles), es la llamada relación ácidos volátiles/alcalinidad.

h) Diseño del estanque de biodigestión

La norma API 650 considera el diseño del manto del estanque, de cabezales, soportes, flanches y boquillas para la operación de este componente, en la Figura 2 se observan las dimensiones básicas del estanque y un diagrama simplificado que muestra la localización de los momentos máximos identificables en el eje del estanque.

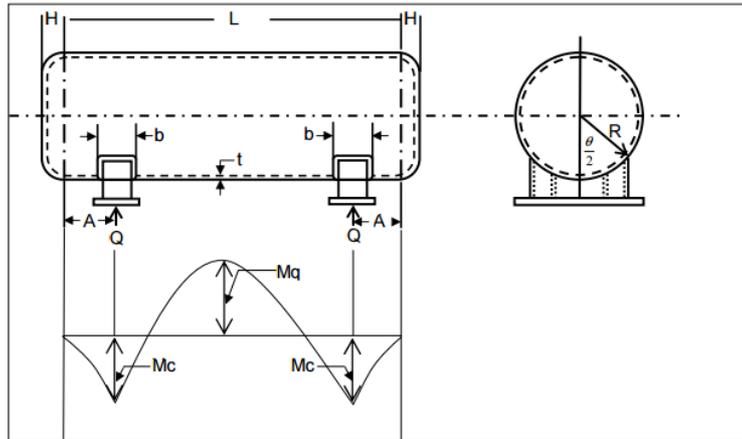


Fig. 2. Esquema de un estanque de almacenamiento

Donde:

H = Profundidad del cabezal [m]

L = Largo tangencial del estanque [m]

A = Distancia entre el centro del soporte y la línea tangente [m]

b = Ancho de la plancha de refuerzo [m]

R = Radio interno del estanque [m]

θ = Arco donde actúa el soporte [°]

Q = Carga a soportar por cada soporte [kgf]

Mc = Momento máximo en los soportes [kgfm]

Mq = Momento máximo en el centro del estanque [kgfm]

Volumen requerido del biodigestor

El volumen requerido por el biodigestor debe ser considerado utilizando la carga volumétrica (Volume Load, VL) a soportar o por el tiempo de retención hidráulico (Hydraulic retention time, HRT).

i) Carga volumétrica:

La carga volumétrica representa el volumen necesario para biodigerir 1kg de materia orgánica seca y se estima que del orden de 3,5 kg de odm utilizan 1 m³ del biodigestor, este método es muy dependiente de la correcta estimación de la carga volumétrica.

$$V = \frac{\phi odm}{VL}$$

Donde:

V = Volumen requerido del biodigestor

φodm = Flujo de materia orgánica seca diaria [kg/d]

VL = Carga volumétrica considerada [kg_{odm}]/m³ d

Estos datos y su resultado se resumen en la Tabla.

Tabla 3. Resumen del cálculo de volumen según método de carga volumétrica

Parámetro	Unidad	Valor
Flujo odm anual	t/a	7.074
Flujo odm diario	kg/d	83,9
Carga volumétrica	kg _{odm} /m ³ d.	1,5
Volumen del biodigestor	m ³	20,4

j) Tiempo hidráulico de retención:

El estanque opera durante 25 días la mezcla que contiene posee densidad similar al agua 1000[kg/m³], dado esto el estanque debe cumplir con un volumen de diseño según alguno de los dos criterios presentados a continuación:

$$V = \varphi_s \cdot \text{HRT}$$

Dónde: φ_s = Carga diaria ajustada a un contenido de materia seca del 13[%]

HRT = Tiempo hidráulico de retención.

Estos datos y su resultado se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen del cálculo de volumen según método HRT

Parámetro	Unidad	Valor
Carga diaria de sustrato	t/d	1,132
Porcentaje de Materia Seca	%	13
Contenido deseado de Materia Seca	%	13
Suministro diario	m ³ /d	0,784
Tiempo de retención	D	25
Volumen del Biodigestor	m ³	20,1

1.2. El Biogás

1.2.1. El Biogás

El biogás también llamado gas natural, presenta como principal componente el metano, el cual fue utilizado por los pueblos persas y chinos para generar calor (Kaiser *et al.*, 2002). En el año 1776, según Kaiser *et al.* (2002), el científico italiano Volta descubrió que el principal componente del biogás era el metano, 100 años después se descubrió el origen microbiológico de la formación del metano. En el año 1887, el científico Hoppe-Seyler comprobó la formación de metano a partir de acetato; lo mismo fue encontrado por Omelianski en 1886. Así mismo, fue en el año 1888 que el científico Gayon obtuvo biogás mezclando excremento de vacunos o de caballerías con agua, a una temperatura de 35°C. En 1906 Soehngen descubrió la formación de biogás (metano) a partir de hidrógeno y dióxido de carbono (Kaiser *et al.*, 2002). Luego de la segunda guerra mundial, la utilización de la tecnología del biogás aumentó, debido al alto costo de las fuentes de energía fósil.

En la actualidad, el uso del biodigestores para la producción de biogás, está muy difundido en China (con más de 5 millones de unidades instaladas) y en India (con más de 300 mil instalados). En los países desarrollados, el biogás es usado para la producción de energía eléctrica. En América latina algunos países como, Costa Rica y Colombia usan el biogás para la cocción de alimentos y producción de energía para instalaciones agropecuarias (Botero y Preston, 1987).

1.2.2. Composición y características del biogás

El biogás es la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica, realizada por acción de microorganismos (bacterias) en un medio anaeróbico (Zapata, 1998). Compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, el biogás posee un poder calorífico, de 4500 a 6500 kcal/m³. Un metro cúbico de biogás es el equivalente de 0,6 litros de gasolina o 0,58 litros de queroseno (IIT 1987).

En la Tabla se muestra algunas de las características generales del biogás, las principales características están detalladas.

Tabla 05: Características del Biogás

Parámetros	Características
Temperatura adecuada de operación	45°C
Tiempo de retención	entre 40 y 100 días
Contenido energético del biogás	unos 23000 KJ/m ³ (6Kwh/m ³)
	aproximadamente la mitad que el gas natural
Generación de Biogás	De 0.3 m ³ a 0.5 m ³ de biogás por m ³ de digestor /día Entre 0,2 m ³ y 0,4 m ³ de biogás por kg de biomasa seca

Fuente: Universidad Politécnica de Cataluña (Departamento de Máquinas y Motores Térmicos)

1.2.3. Los principales componentes del biogás.

El biogás tiene como componentes el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂). No obstante la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada en su generación.

a) El metano

El metano es el principal componente del biogás, y le confiere la capacidad calorífica que este tiene. El valor energético del biogás, por lo tanto, estará determinado por la concentración de metano - alrededor de (20 – 25) MJ/m³, comparado con (33 – 38) MJ/m³ para el gas natural (Zapata 1998).

El metano es un gas a temperatura ambiente. La combustión de este hidrocarburo sólo se efectúa a temperaturas elevadas, como las que proporcionan una llama o una chispa. Sin embargo, una vez iniciada, la reacción desprende calor, que es suficiente para mantener la alta temperatura y permitir que la combustión continúe. La cantidad de calor que se genera al quemar un mol de un hidrocarburo a dióxido de carbono y agua se llama calor de combustión, para el caso del metano, el calor de combustión es de 213 kcal (UNAM 2000).

b) El dióxido de carbono

El dióxido de carbono es común en la naturaleza. Es un gas importante del proceso metabólico de los organismos y es uno de los componentes más importantes en el biogás. Ocupa entre el 30% a 40% del volumen total de este último. El dióxido de carbono es un compuesto incoloro e inodoro que en concentraciones bajas no es tóxico y en concentraciones altas provoca alta frecuencia respiratoria.

c) El ácido sulfhídrico

El ácido sulfhídrico (H₂S) es un gas inflamable, incoloro, con un olor característico a huevos podridos. Se le conoce comúnmente como ácido hidrosulfúrico o gas de alcantarilla. La gente puede detectar su olor a niveles muy bajos (ATSDR 2004). Según Botero y Preston (1987), el ácido sulfhídrico es un compuesto que se encuentra en concentraciones próximas al 1% en el biogás, pero esta baja concentración es suficiente para que pueda ocasionar daños graves a estructuras de metal o equipos.

1.2.4. Usos del biogás

El biogás se ha utilizado para generar calor desde 1770 en China e India (Alkalay y Szantó 1996). Además del uso para calentar, el biogás se ha utilizado para cocinar, en la producción de electricidad y refrigeración (Eggeling *et al.* 1984). El uso es determinado por los usuarios de la tecnología: Si el biogás es mezclado en una proporción de 1:20 con aire, es un gas altamente explosivo, por eso su uso en la industria tiende a crecer (GTZ e ISAT 1999).

Se utiliza como combustible para motores fijos y móviles, que trabajan con ignición a diesel o gasolina. En el caso específico de los motores diesel, una vez en movimiento se reduce el ingreso del combustible inicial al 35% y se introduce el biogás a un 65%, a través del purificador del aire o directamente dentro de la cámara.

Debido a eso, muchos países han impulsado el uso de este gas (Kaiser *et al.* 2002). A finales del año 1993, cerca de 5,25 millones de hogares en todo el mundo contaban con digestores, con una producción de aproximadamente 1200 millones de m³ de metano, con una capacidad de generación eléctrica instalada de 3500 kW.

1.1.3. El compost

En la Antigüedad desde hace miles de años, los chinos han recogido y compostado todas las materias de sus jardines de sus campos y de sus casas, incluyendo materias fecales. De forma tradicional, durante años, los agricultores han reunido los desperdicios orgánicos para transformarlos en abono para sus tierras. Compostar dichos restos no es más que imitar el proceso de fermentación que ocurre normalmente en un suelo de un bosque, pero acelerado y dirigido. El abono resultante contiene materia orgánica así como nutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio y hierro, necesarios para la vida de las plantas.

El desarrollo de la técnica de compostaje a gran escala tiene su origen en la India con las experiencias llevadas a cabo por el inglés Albert Howard desde 1905 a 1947. Su éxito consistió en combinar sus conocimientos científicos con los tradicionales de los campesinos se basaba en fermentar una mezcla de desechos vegetales, excrementos humanos y animales humedeciéndolo periódicamente. En Europa comenzó a estudiarse la posibilidad de descomponer a gran escala las basuras de las ciudades en la ciudad holandesa de Hanmer se instaló en 1932 la primera planta de compost hecho con las basuras urbanas.

Esencialmente la producción de compost trata de enriquecer la tierra y al mismo tiempo, defender el medio ambiente. Se enriquece y aporta un suelo más vivo en microbios e invertebrados y más rico en minerales.

II. MATERIALES Y METODOS

Procedimiento de recolección de datos

- Toma de muestras y caracterización de la materia orgánica.
- Procesamiento de la muestra en laboratorio
- Procesamiento de datos

Procedimiento y Análisis Estadístico de datos

- Diseño del instrumento
- Aplicación
- Resultados específicos para contrastar

2.1. Ubicación.

El trabajo de investigación se realizó en el proyecto arqueológico Huacas del Sol y de la luna que está ubicado en la costa norte del Perú, se ubican a 10 Km. al sur de Trujillo en el distrito de Moche, en la margen izquierda del río Moche considerándolos como un santuario mochica constituido por un conjunto de monumentos.

2.2. Muestra

La muestra tomada fue del pozo séptico del parador turístico de la Huaca de la Luna, en un volumen de 20 litros de agua residual, los cuales se utilizaron en los biodigestores de vidrio y de polietileno en tres repeticiones. Dichas aguas residuales se les realizaron sus análisis físicos químicos respectivos para su caracterización.

2.3. Caracterización de los lodos y/o aguas residuales.

En un inicio se recopiló la información literaria para la caracterización tomando como referencia trabajos de investigación anteriores, paralelamente se buscó parámetros de control que intervienen

en la digestión anaeróbica para la producción del biogás siendo estos el pH, temperatura, alcalinidad, ácidos grasos, Demanda bioquímica de oxígeno, sólidos totales y volátiles.

En la **Tabla 6** mostramos los métodos utilizados para la caracterización de la materia orgánica inicial (aguas residuales).

Determinaciones	Unidad	Método
pH		Potenciometrico - pH-metro
Temperatura	°C	Termómetro
Sólidos totales	mg/L	Secado - Evaporación a 105 °C
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	Método volumétrico – Método de Winkler
Demanda química de oxígeno	mg/L	Método del Dicromato de potasio.
Nitrógeno total	g/Kg.	Destilación – Método de Kjeldahl
Carbono orgánico total	g/Kg.	Método volumétrico
Aceites y grasas	%	Extracción
Alcalinidad	mg/L	Método potencio métrico

Elaborado: Propia del Investigador.

2.4. PUESTA EN MARCHA

La producción de biogás y compost se realizó en Laboratorio utilizando dos biodigestor de vidrio y polietileno de 10 litros de capacidad.

Digestor anaeróbico

En el digestor utilizado se agregó 10 litros agua residual con un agitador mecánico para su homogenización y un termómetro en la parte superior para el registro de la temperatura.

Ensayo en Marcha

En esta parte del trabajo se procedió a instalar el biodigestor teniendo cuidado de algunas fugas de los lodos y/o gas; al mismo tiempo se hizo el control de las variables como el pH y la temperatura. Los digestores se alimentaron con 10 litros de Materia orgánica (agua residual) cada uno controlando las variables diarias durante un periodo de 25 días.

Después de que se dejó aclimatar el biodigestor durante 25 días se procedió a finalizar el proceso, almacenando el gas en una manta para posteriormente caracterizar este gas.

III. RESULTADOS

En la **Tabla 07** mostramos los resultados obtenidos de los análisis de la materia orgánica utilizados en los biodigestores.

PARÁMETROS	UNIDADES	PRIMERA	SEGUNDA	TERCERA
DBO	mg/L	2156,3	1692,5	1956,3
DQO	mg/L	8673,5	10472,5	12941,7
pH.		7,24	7,53	7,61
Temperatura	°C	21,5	22,6	21,8
Sólidos totales	mg/L	30671	33410	39326
Sólido en suspensión	mg/L	27834	29673	35492
Fosfatos	mg/L	17,34	15,98	22,5
Nitrógeno	%	0,023	0,017	0,021
Aceites y grasas	mg/L	0,067	0,071	0,068

En la **Tabla 08** mostramos los resultados de la producción de biogás obtenido por los biodigestor de vidrio y polietileno.

DETERMINACIONES	UNIDAD	10 LITROS VIDRIO	10 LITROS POLIETILENO	Diferencia en mL	Diferencia % vidrio	Diferencia % de Polietileno
PRIMERA PRUEBA	mL	160	210	50	31	24
SEGUNDA PRUEBA	mL	184	218	34	18	16
TERCERA PRUEBA	mL	188	212	24	13	11
PROMEDIO	mL	174,7	213,3	38,6	21	17

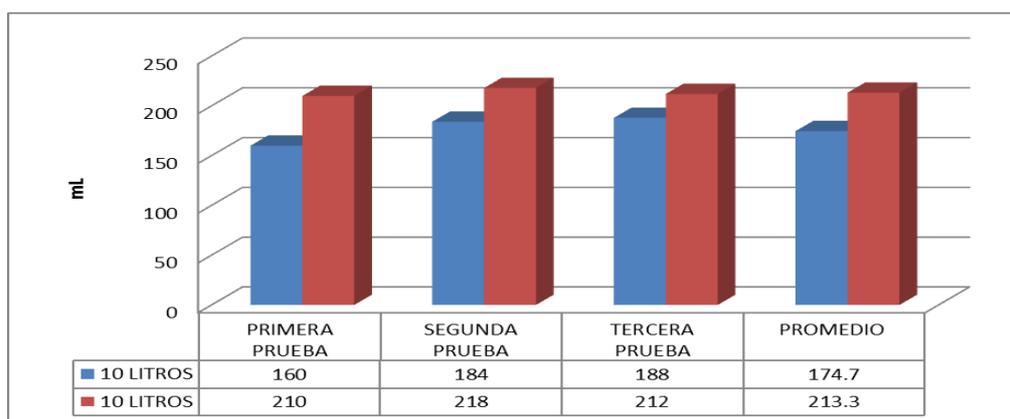


Fig. 3. Observamos la tendencia de la producción de biogás

En la **Tabla 09** mostramos los resultados obtenidos del compost después de los 25 días del proceso.

PARÁMETROS	UNIDADES	BIODIGESTOR DE VIDRIO	BIODIGESTOR DE POLIETILENO
Humedad	%	22,97	32,48
Nitrógeno	%	1,34	1,83
Fosforo	%	0,18	0,23
Materia orgánica	%	57,00	62,32
Ph		7,19	7,12
Potasio	mg/Kg	0,56	1,18
Densidad	Kg/L	1,21	1,38

IV. DISCUSIÓN

En la Tabla 01 se muestran el aumento de visitantes por año al complejo arqueológico Huaca de la Luna, las cuales están en función directa del aumento de las aguas residuales en los pozos sépticos.

En la Tabla 08 observamos que la producción de biogás, en el biodigestor de polietileno se obtuvo 213,3 mL a comparación del biodigestor de vidrio que alcanzó 174,7 mL, teniendo una diferencia de producción de biogás 17 % más en el biodigestor de polietileno, confirmando que en este biodigestor se obtiene una mayor producción.

En la Tabla 09 mostramos los resultados obtenidos del compost por los biodigestores de polietileno y vidrio, teniendo mayor porcentaje de Nitrógeno el biodigestor de polietileno con 1,83 % y 1,34 % respectivamente, para el Fosforo con 0,23 % en el biodigestor de polietileno y 0,18 % para el

biodigestor de vidrio y para el Potasio 1,18 mg/kg para biodigestor de polietileno y 0,56 % para el biodigestor de vidrio.

V. CONCLUSIONES

De los resultados conseguidos en laboratorio para la producción de biogás y compost podemos concluir que el biodigestor de polietileno es más eficiente que el biodigestor de vidrio en la producción de biogás con un 17 % más de producción. Y para el compost obtenido encontramos la mayor concentración de nitrógeno fosforo y potasio en el biodigestor de polietileno con respecto al de vidrio siendo esto favorable para su uso agrícola.

Y finalmente la construcción e instalación de un biodigestor de polietileno en proyectos arqueológicos que estén ubicados en zonas alejadas de la ciudad, para la obtención de biogás y compost es positiva en el ámbito económico, ambiental y social, debido a que se reducen la contaminación y los gastos de mantenimiento de los pozos sépticos

Con la experiencia adquirida en el desarrollo del trabajo de investigación podemos decir que el tratamiento de las aguas residuales de los proyectos arqueológicos si se pueden realizar en biodigestor de polietileno, proponiendo diseñar y/o construir estos en función del flujo de turistas por año, siendo nuestro caso un biodigestor de 20 m³ de capacidad para una acumulación de 3 años promedio.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKALAY, D. (1997). Aprovechamiento de desechos agropecuarios para la producción de energía (en línea) In Reunión Regional sobre Biomasa para la Producción de Energía y Alimento (1997, La Habana, CU). Memoria. La Habana, CU. Consultado 20 oct. 2006. Disponible en <http://www.fao.org/DOCREP/006/AD098S/AD098S08.htm>
- ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, US) (2004). Reseña toxicológica de ácido sulfhídrico (en línea). Atlanta, US. Consultado 12 set. 2006. Disponible en http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts114.html.
- BOTERO, R.; AGUILAR, F.X.; PRESTON, T.R. (2000). The Biodigester. In: Towards a better management of our natural resources. EARTH University. Guácimo, CR.
- BROWN B.B., YIRIDOE E.K., GORDON, R. (2007). "Impact of single versus multiple policy options on the economic feasibility of biogas energy production: Swine and dairy operations in Nova Scotia". Energy Policy 35:4597-4610.
- GTZ (German Agency for Technical Cooperation, DE); ISAT (Information and Advisory Service on Appropriate Technology, DE). (1999). Biogás digest: application and product development (en línea). Eschborn, DE, v.2 80 p. Consultado 14 jul. 2006. Disponible en <http://www2.gtz.de/dokumente/bib/04-5365.pdf>
- KAISER F.; BAS, F.; GRONAUER, A. (2002). Producción de biogás a partir del guano animal: el caso de Alemania (en línea). Santiago, CL, Universidad Católica de Chile. Consultado 15 jun. 2004. Disponible en http://www.uc.cl/agronomia/c_extension/Revista/Ediciones/16/tecnologia.pdf
- MARCHAIM, U. (1992). Biogas processes for sustainable development (on line). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Agricultural Services Bulletin.
- MORA CHINCHILLA, R.; MORA AMADOR, R. (2003). Reseña histórica del relleno sanitario Río Azul y consideraciones sobre los metales pesados tratados en él y los presentes en nuestros hogares (en línea). Revista Reflexiones 82(2):47-58. Consultado 08 oct. 2006. Disponible en http://reflexiones.fcs.ucr.ac.cr/documentos/82_2/resena.pdf#search=%22relleno%20rio%20azul%20Bproducci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s%22
- UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México) 2000. Metano (en línea). México, DF. Consultado 12 set. (2006). Disponible en http://organica1.pquim.unam.mx/qo1/MO-CAP2.htm#_Toc476376054

- XUAN AN, B.; PRESTON, T.R.; DOLBERG, F. (1997). The introduction of low-cost polyethylene tube biodigesters on small scale farms in Vietnam (online). *Livestock Research for Rural Development*. Volume 9, Number 2. Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV). Cali, CO.
- ZAPATA, A. (1998). Utilización del biogás para generación de electricidad (en línea). Cali, CO, CIPAV. Consultado 10 jun. 2006. Disponible en <http://www.cipav.org.co/cipav/resrch/energy/alvaro1.htm>