

BIOFILM DE BAJO COSTO PARA MEJORAR LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA EN REGIONES DE CLIMA FRÍO CON DIGESTORES TUBULARES

Low cost carrier biofilm to improve anaerobic digestion in regions with cold weather with tubular digesters
Martí-Herrero Jaime¹, Alvarez Renéz, Rojas MR³, Aliaga Limbaniac⁴, Céspedes Rolando⁵, Carbonell Ja¹

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es evaluar el aumento de producción de biogas con digestores tubulares de bajo costo en los climas fríos usando anillos PET en el interior del reactor. Dos digestores similares han sido operados y monitoreados en condiciones de clima frío y han sido alimentados con estiércol de vaca. La diferencia entre los dos sistemas es que uno se llenó con anillos PET como un portadores de biofilm, llegando a ser el área «funcional» al interior del digestor 4,2 veces mayor. Los resultados muestran que 44% más de biogás por Kg_{SV} se ha producido al utilizar el portador de biofilm (0.33m³/kg_{SV}; 0.09 m³/m³/d) en relación a un digestor control (0.23m³/kg_{SV}; 0.06 m³/m³/d), el cual es operado en mismas condiciones climáticas de frío y con una tasa de carga orgánica de 0.26 kg_{SV}/m³/d. La calidad de biogás es similar en ambos casos, mientras que la reducción de los sólidos volátiles totales, así como la retención de sólidos minerales, es mayor en el digestor con el portador del biofilm. El rendimiento térmico revela que la adaptación del digestor tubular de bajo costo para un clima frío sin ningún dispositivo de calentamiento activo condujo a una temperatura de la suspensión de 16.6°C, cuando la temperatura ambiente media diaria en invierno es 6.1°C con varias noches por debajo de cero, debido al diseño pasivo solar apropiado.

Palabras Clave: Digestión Anaeróbica, Portador Biofilm, Tiempo de retención de sólidos, Clima frío, Digestor tubular de bajo coste

ABSTRACT

The aim of this research is to evaluate the increase of biogas production with low cost tubular digesters in cold climates using PET rings inside the reactor. Two similar digesters have been operated and monitored in cold weather conditions and have been fed with cow manure. Digester 1 was filled with PET – rings as

a biofilm carrier, Digester 2 was kept as a reference. Through the PET – rings the functional surface could be increased by a factor 4.2. The results show that 44% more biogas per Kg_{SV} has been produced with the biofilm carrier in use (0.33 m³/kg_{SV}) (reference digester 0.23 m³/kg_{SV}), at an organic load rate of 0.26 kg_{SV}/m³/d. The thermal performance shows that with an adaptation of the low cost tubular digester the slurry temperature can be raised up to 16.6 °C (average) by surrounding temperature of 6.1 °C (average) without using any active heating system.

Key Words: Anaerobic digestion, Biofilm carrier, Solids retention time, Cold climate, Low cost tubular digester

INTRODUCCIÓN

La digestión anaerobia es una técnica aplicada para el tratamiento de diferentes tipos de residuos, con el fin de tomar ventaja de la producción de biogás y biol. Se ha implementado tecnología digestora altamente sofisticada principalmente en los llamados países desarrollados, especialmente con el objetivo de producción de electricidad mediante un generador de biogás. Sin embargo, los sistemas más populares en el mundo utilizan tecnología más sencilla y están diseñados para uso doméstico. Más de 50 millones de este tipo de sistemas se han implementado, principalmente en los llamados países en vías de desarrollo (Ghimire, 2013; Bond y Templeton, 2011; Chen et al., 2012; Martí-Herrero, 2014). Para este caso de investigación, se estudiaron las tecnologías de digestión anaerobia de bajo costo que no requieren dispositivos para mezcla o calentamiento activo. El modelo de biodigestor de bajo costo más extendido en el mundo es el digestor de cúpula fija, seguido por el de cúpula flotante (Chen et al., 2012). Ambos son

¹ Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), Building Energy and Environment Group, Edifici GAIA (TR14), C/ Rambla Sant Nebridi 22, 08222 Terrassa, Barcelona, Spain.

² IIDEPROQ, UMSA, Plaza del Obelisco 1175, La Paz, Bolivia.

³ Energising Development Bolivia (EnDev-Bolivia/GIZ), Calle 12 de Calacoto, 7978, La Paz, Bolivia.

⁴ Estación Experimental Choquenaira, Facultad de Agronomía UMSA, Viacha, Bolivia

muy populares en Asia y ahora también en África. Estos dos modelos son los vectores de difusión en los programas nacionales de biogás que se han llevado a cabo en varios países de ambos continentes (Ghimire, 2013). Se construyen usando ladrillos y cemento y tienen una forma semiesférica en el caso de la cúpula fija, y una forma de cilindro en el caso del tambor flotante. En América Latina el modelo de tecnología de bajo costo más popular es el de digestor tubular (también conocido como globo flexible o de plástico). Actualmente en el continente se emplean diferentes modelos de digestores tubulares, aunque el más popular, y el estándar para otros modelos, es el digestor tubular de bajo costo (Martí-Herrero, 2014).

Los digestores tubulares familiares de bajos costo fueron desarrollados por Preston y compañeros de trabajo (Botero y Preston, 1987; Bui Xuan An, et al., 1994) como un modelo de menor precio que el 'barro rojo' los taiwaneses (Pound, et al., 1981). La China y la India tenían instalados antes del 2007 más de 10 millones de estos sistemas (Abraham et al., 2007). Vietnam es particularmente relevante dentro de Asia, con cerca de 20.000 unidades instaladas en 2006 (Zhu, 2006). Algunos países de América Latina como México, Nicaragua, Colombia, Costa Rica (Lansing et al. 2008), Perú (Ferrer et al. 2011) y Bolivia (Martí-Herrero, 2011, 2012) son los países en los que esta tecnología de bajo costo esta siendo implementada, desarrollada y adaptada a las regiones de clima frío a pesar de sólo estar haciendo uso de la calefacción solar natural [Martí-Herrero, 2007, 2011; Perrigault et al., 2012].

Martí-Herrero (2011) comunicó que "uno de los problemas reportados en los estudios de campo de este tipo de digestor es que los usuarios finales se quejan de que los rendimientos de biogás diarios son inferiores a los indicados por los diseñadores". Observó dos errores comunes en el diseño de digestores tubulares de bajo coste, que el verdadero HRT disminuye y, como consecuencia, también lo hace la producción de biogás. Las soluciones clave para optimizar la tecnología y la producción de biogás en digestores tubulares de bajo costo han sido un diseño exacto (Martí-Herrero y Cipriano, 2012), mejoras de rendimiento térmico (Perrigault et al., 2012) y mayores tasas de carga (Ferrer et al., 2011).

En esta investigación se presenta una nueva estrategia para mejorar el rendimiento de biogás utilizando compañías de bajo coste dentro del biofilm digestor, y un análisis térmico de los sistemas para las regiones de clima frío.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El Centro de Investigación en Biodigestores, Biogás y Biól(CIB3) está situado en Viacha (Bolivia), en el Altiplano, a 22km de la ciudad de La Paz. Se ubica a 3884 metros sobre el nivel del mar (msnm) en una región de clima frío barrido por vientos fuertes y fríos, y tiene un clima frío árido, con grandes diferencias de temperatura diaria. Las temperaturas promedio máximas durante el día varían entre 15 a 20 ° C y las mínimas promedio van desde -15 a 3 ° C, con una presión atmosférica de alrededor de 460-500 mm Hg (Alvarez y Liden, 2008).

Recolección de Datos

En el CIB3, 10 digestores tubulares pilotos de bajo costo, son operados y monitoreados en condiciones meteorológicas reales. Dos de ellos son los objetos de esta investigación.

Digestores tubulares piloto de bajo costo

Los digestores tubulares domésticos de bajo coste para climas fríos están diseñados para 81 días (90 para digestores piloto) de tiempo de retención hidráulica (TRH). Estos, son semienterrados en una zanja que por lo general está aislada con paja, y cubiertas por un pequeño invernadero (un paso) con enormes muros de adobe (20 cm de ancho), orientadas de este a oeste, con el cobertizo del invernadero orientado al sol de invierno en el norte.

Los digestores tubulares piloto de bajo costo fueron diseñados siguiendo la metodología reportada por Martí-Herrero y Cipriano (2012). Se utilizó el mismo material, diseño y metodología de instalación que los 300 sistemas caseros instalados en granjas del Altiplano boliviano (Martí-Herrero et al., 2014). Los digestores piloto tienen aproximadamente 1m³ de volumen de líquido y una longitud de 4.7 m, mientras que los sistemas de uso doméstico tienen 6.4m³ de volumen de líquido y son 7m de largo. En la Tabla 1 se presenta una comparación entre el piloto y los digestores tubulares de bajo coste para el hogar. El aislamiento de paja utilizado en la trinchera fue de 3 cm de grosor cuando fue instalado, pero dos años después no había paja en la trinchera izquierda por lo que es de suponer que se había descompuesto.

Tabla 1. Comparación entre el modelo hogar y el modelo piloto de digestores tubulares de bajo costo para clima frío

	Digestor modelo familiar	Digestor modelo piloto
Circunferencia de plástico tubular	4	2
Volumen total (m ³)	8.1	1.06- 0.87
Volumen líquido (m ³)	6.47 (80%)	0.85- 0.7 (80%)
Volumen de Biogás (m ³)	1.62 (20%)	0.21-0.17 (20%)
HRT (días)	80.9	90
Longitud (m)	7	4.75
Ancho de la zanja superior(m)	1,05	0.3
Ancho de la zanja inferior (m)	0,8	0.5
Profundidad (m)	1	0.6
Longitud / diámetro	5.5	7.5
Grosor del aislamiento de paja (m)	0 a 10 cm	3 cm
Invernadero de paredes de adobe	Si	Si
Modelo de invernadero	Nave tipo tejado	Nave tipo tejado
Orientación Longitudinal E-W	Si es posible	Si
Orientación del invernadero	Norte	Norte

SopORTE de Biofilm

En esta investigación se presentaran dos digestores. El Digestor D90 representa el digestor típico de hogar que trabaja en las granjas del altiplano boliviano. Sera monitoreado y servirá como un valor de referencia para la investigación. El segundo, D90B, se ha cargado con 4 kg de Anillos de Polyethyleneterephthalate, (PET) que se cortan a partir de botellas de soda. Estos anillos se han introducido al D90B al inicio del estudio, incrementando el área funcional por 23.1m², considerando ambos lados de los anillos. Como resultado, la superficie interior del digestor D90 en contacto con la suspensión es de alrededor 7.1m², por lo que el digestor D90B presenta un incremento total de su área funcional capaz de formar biofilm 4.2 veces más grande que en el caso del biodigestor D90.

Análisis

Se tomaron datos diarios de la producción de biogás in situ, utilizando un medidor comercial de diafragma para gases de baja presión (G2.5 Metrix). Los datos de la carga inicial de los digestores, que comenzó en mayo de 2011, se han registrado durante 300 días, finalizando en abril de 2012. Se recogieron muestras de biogás en bolsas Tedlar para examinar las concentraciones de metano y dióxido de carbono, un cromatógrafo de gases (Shimadzu Modelo GC14B, Japón) equipado con un detector de conductividad térmica (TCD) y una columna capilar Carboxen-1010

30 mx 0,53 mm ID (Supelco, EE.UU.). El inyector, detector y las temperaturas del horno fueron 130, 200, y 100 ° C, respectivamente. Se utilizó Helio como gas portador a una presión de 300 kPa.

Para la caracterización del afluente y el efluente, se han recogido muestras una vez que los digestores llegaron a un rendimiento estable. Se determinaron sólidos totales (TS), sólidos volátiles (VS) y el pH de acuerdo a métodos estándar (CLESCERI et al., 2000). El contenido total de sólidos (TS) se determinó después de calentamiento (105 ° C durante 1 h), refrigeración, desecación, y procedimientos de pesaje que se repitieron hasta que el cambio de peso fue inferior al 4%. Los sólidos volátiles se determinaron mediante la ignición del residuo producido en el análisis TS hasta conseguir un peso constante en horno de mufla a una temperatura de 550 ° C.

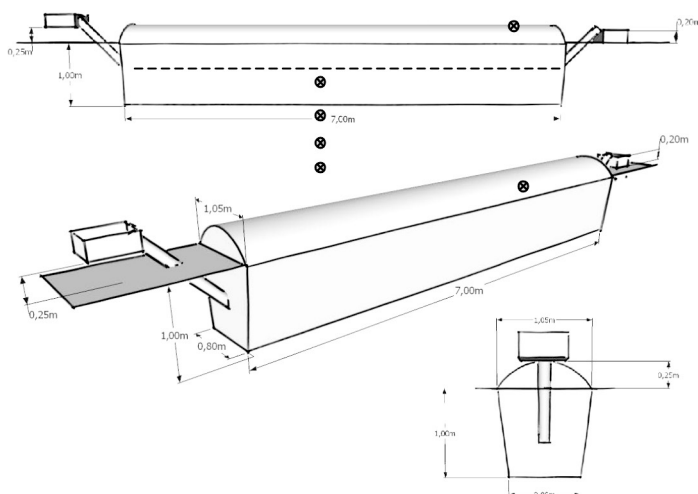


Figura 1. Izquierda: Diseño de un digestor de hogar (Martí-Herrero, et al, 2014), y la ubicación de los sensores de temperatura. Derecha: Biodigestor tubular de bajo coste adaptado para el clima frío dentro de un invernadero con paredes de adobe.

Control de la temperatura

Se ha controlado la temperatura de uno de los digestores en 5 puntos diferentes: (1) invernadero, (2) biogás, (3) 10 cm por debajo del nivel de suspensión, (4) 30 cm por debajo del nivel de suspensión y (5) en el tubo de salida tubo, tal como se muestra en la figura 1-izquierda. Además, se han registrado la temperatura ambiente y la temperatura del suelo a una profundidad de 1 m cada hora. Los registros de temperatura del digestor corresponden a la temporada de verano, desde noviembre 2011 a marzo 2012 (104 días). Mientras que la temperatura ambiente se provee durante todo el período de producción de biogás (300 días) que incluye la temporada de invierno.

Operación de los digestores

Los digestores piloto son cargados en la misma forma que los agricultores cargan sus sistemas. Esto significa que la frecuencia, la cantidad y la dilución no son exactas para el período evaluado. Los digestores son alimentados con estiércol fresco de vaca, el cual es recogido cada mañana de una lechería cercana, y diluido con agua en una proporción 1:3 (una parte de estiércol en tres partes de agua). Las características

del estiércol fresco se muestran en la Tabla 2. La cantidad de agua y estiércol no se mide cada día, en lugar de ello se mide con un recipiente que tiene una marca en un nivel específico que muestra la carga de referencia. El horario para la carga de los digestores se ha trazado conscientemente, lo que permite al operador local cierta libertad para cargar los digestores de acuerdo con su disponibilidad de tiempo. El operador, así como el usuario del digestor, sabe que si no se puede cargar un día, al día siguiente se puede cargar con el doble de estiércol. Por lo tanto, el perfil de carga de más de 300 días de seguimiento, resultó en 223 cargas, que corresponden a un 75%.

Esto es muy similar a la carga real de los digestores operados por los agricultores. Esta “carga baja” de los digestores causa un HRT más largo que lo originalmente diseñado (90 días), con un resultado de 120,7 días para el total del periodo monitoreado: 114.7 para los primeros 100 días, y 124.2 para los últimos 200 días. Este horario de carga de digestor condujo a una tasa media de carga orgánica (ORL) de $0.264 \text{ Kg}_{\text{sv}}/\text{m}^3/\text{d}$ para ambos digestores y para todo el período monitoreado: 0.278 para los primeros 100 días y $0.26 \text{ Kg}_{\text{sv}}/\text{m}^3/\text{d}$ para los últimos 200 días.

Tabla 2. Parametros de los digestores piloto

	D90	D90B
Área apta para portar biofilm (m ²)	7.1	30.2
Volumen Liquido (m ³)	0.85	0.7
Cantidad de estiércol (kg/día)	2.3	1.9
Cantidad de agua (l/día)	7.1	5.8
Relación de estiércol: agua		1:3
Sólidos Totales (%)estiércol		17
Sólidos Volátiles (%)peso húmedo estiércol		13
% de las cargas totales posibles		74.6
OLR (kg _{SV} /m ³ /d) y HRT real (días) por el período completo evaluado	0.264; 120.7	
OLR (kg _{SV} /m ³ /d) y HRT real (días) para los primeros 100 días	0.278; 114.2	
OLR (kg _{SV} /m ³ /d) y HRT real (días) para los últimos 200 días	0.26; 124.2	

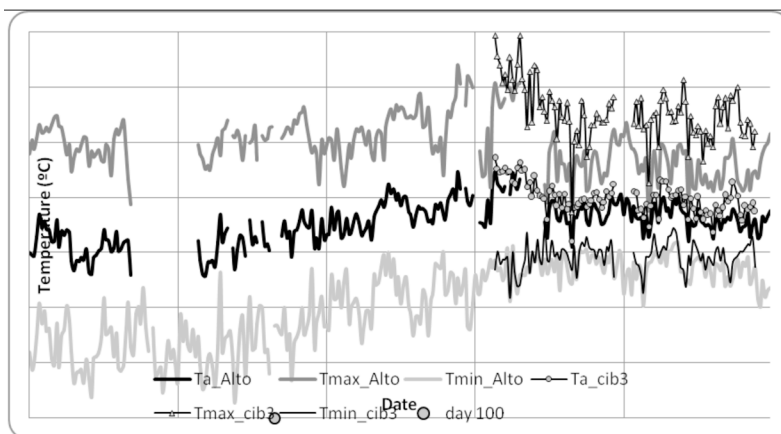
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El clima y el comportamiento térmico de los digestores

La temperatura ha sido objeto de seguimiento desde noviembre 2011 hasta abril 2012, pero la producción de biogás se inició seis meses antes, en mayo del 2011. Para determinar la temperatura ambiente antes del período objeto de examen, se utilizaron datos de la ciudad de El Alto brindados por el Servicio de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI). El Alto está situado a 20km de CIB3, también en el Altiplano. La mínima diaria y la temperatura ambiente máxima es proporcionada por SENAMHI, y la temperatura ambiente media diaria pueden extrapolarse a partir de estos datos como un valor medio. En el período en que se realizó el monitoreo, la temperatura mínima diaria de CIB3 a El Alto tiene un error típico de 0.78°C, 0.59°C para la media y 1.13°C para la temperatura ambiente máxima diaria. La temperatura brindada por SENAMHI para El Alto puede ser usada para describir la temperatura ambiente en el laboratorio CIB3. La única diferencia estaría en las temperaturas más altas, debido a la

posibilidad de un sobrecalentamiento del sensor de temperatura CIB3 ambiente por radiación solar durante el mediodía. En este caso, la temperatura máxima El Alto será considerada como la temperatura apropiada para CIB3.

La Figura 2 muestra la temperatura ambiente mínima, máxima y media diaria reportada para El Alto por SENAMHI y los datos recogidos desde el laboratorio CIB3. Durante la temporada de invierno (de marzo a septiembre), la temperatura media fue de alrededor de 7.8°C, mientras que los valores obtenidos de las mínimas están bajo -5°C en varias noches, con un máximo en torno a 15°C. Durante el verano y la temporada de lluvias (de septiembre a marzo), las temperaturas mínimas fueron casi siempre por encima de 0 ° C, la media en torno 9°C y la máxima alrededor de 13°C. Por lo tanto la amplitud térmica diaria es mayor en invierno (de -5°C a 15°C) que en verano (de 4°C a 13°C). Para el período que se examina en el laboratorio CIB3 que corresponde a la temporada de verano, la temperatura ambiente media diaria es 9.9°C, la temperatura media diaria mínima es 4.7°C y la máxima es 13.4°C desde El Alto.

**Figura 2.** Temperatura ambiente de CIB3 y El Alto durante el período objeto de examen

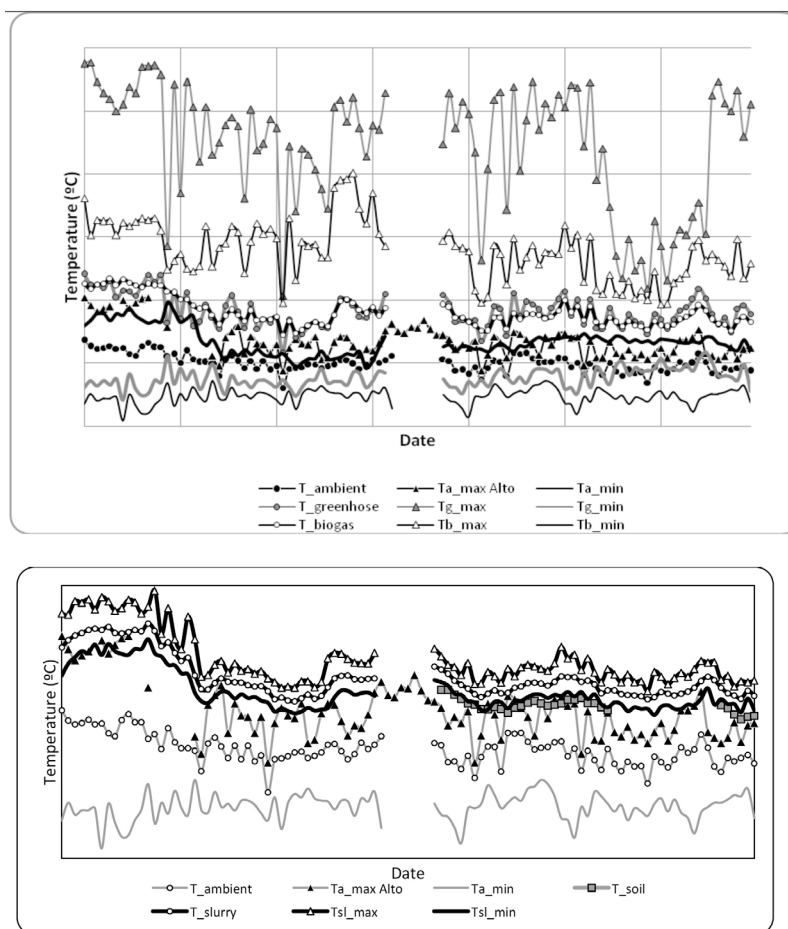


Figura 3. Arriba: temperaturas ambiente, de efecto invernadero y de biogás de un digestor en el CIB3
Abajo: Temperaturas ambiente, lodo y tierra (1 m de profundidad).

En la parte inferior de la Figura 3 se muestra la temperatura de la suspensión. Las tres temperaturas de suspensión se han promediado ya que no existen diferencias significativas entre ellos (menos de 0.2°C para los valores medios), similar al caso reportado por Terradas-III et al., (2014). La temperatura de suspensión muestra una amplitud media diaria de 3°C , debido a su masa térmica. La suspensión tiene una temperatura media de 16.6°C , y está constantemente por encima de la temperatura ambiente (9.9°C). Incluso la temperatura mínima de suspensión está por encima de la temperatura ambiente máxima. Al final del período monitoreado, algunos datos de temperatura a 1m de profundidad del suelo se presenta (temperatura media diaria media), demostrando que la temperatura de la suspensión también está por encima de esta temperatura.

El período de invierno (marzo a septiembre) se caracteriza por días soleados, por lo tanto, el digestor gana alta radiación solar. En este período

de tiempo, los datos de temperaturas del digestor no se recogieron, pero se pueden extrapolar de la temperatura ambiente máxima diaria más 1.5°C , tal como sucedió en la temporada de verano como una rutina común. En consecuencia, la temperatura de la suspensión en el invierno podría tener un valor medio de aproximadamente 16.4°C , $+10.3^{\circ}\text{C}$ por encima de la temperatura ambiente promedio para el mismo período de invierno (6.1°C).

Cuando las cinco temperaturas del sistema se comparan entre sí con una frecuencia de cada hora, como en la Figura 4, se puede comprender el comportamiento del digestor. La temperatura del invernadero está por encima de la temperatura ambiente con valores similares cuando la temperatura ambiente es menor a 10°C y se multiplica por el doble cuando la temperatura ambiente es mayor a 10°C . La temperatura de biogás es paralela a la temperatura ambiente pero 8°C superior. Y la temperatura del suelo a 1 m de profundidad es plana, insensible a

la temperatura ambiente, manteniéndose a 14°C. A la derecha de la figura 4 se muestra la temperatura de la suspensión frente a la temperatura del suelo, presentando un comportamiento muy disperso. En este caso debe tenerse en cuenta la escala de los ejes. La temperatura del suelo se mueve en un rango de 13°C a 15.5 °C y la temperatura de la suspensión se mueve en un rango de 14°C a 18,5°C, y se ve

más afectada por la radiación solar acumulada por el efecto invernadero. La temperatura de la suspensión estuvo constantemente por encima de la temperatura del suelo durante todo el período monitoreado, con diferencias que a veces alcanzan los 4°C. La temperatura media de la suspensión para el todo el período monitoreado es de 6.6°C + por encima de la temperatura ambiente media.

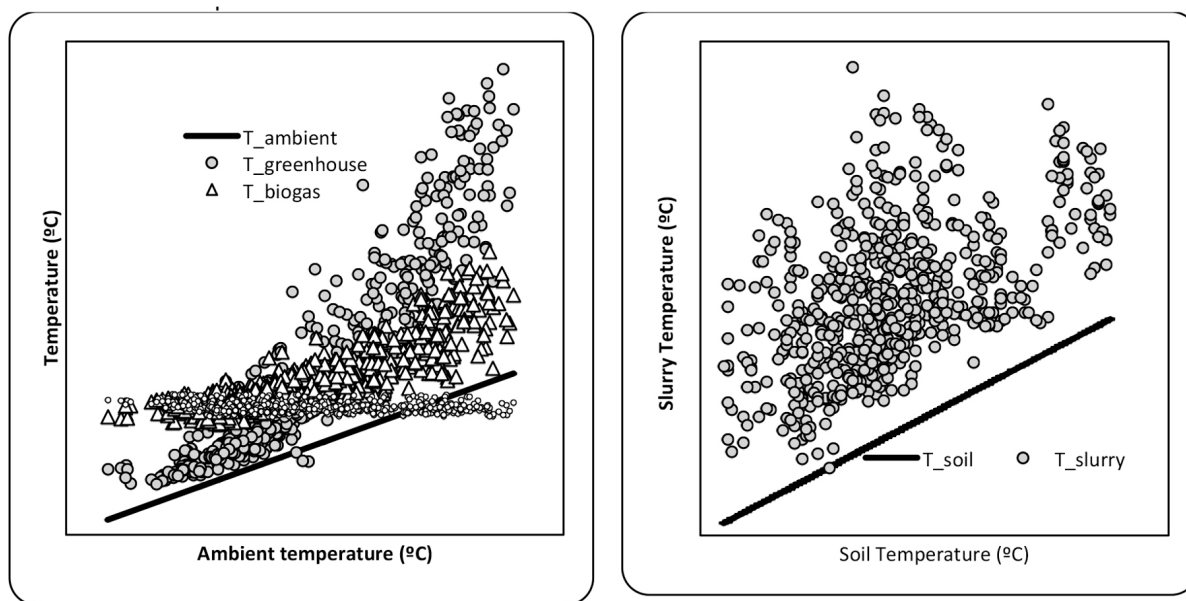


Figura 4. Izquierda: temperaturas por hora, de invernadero, biogás y de suelo respecto a la temperatura ambiente. Derecha: temperatura por hora de la suspensión respecto a la temperatura del suelo. Figura 4. Izquierda: temperaturas por hora, de invernadero, biogás y de suelo respecto a la temperatura ambiente. Derecha: temperatura por hora de la suspensión respecto a la temperatura del suelo.

Para un digestor tubular similar de bajo costo adaptado a clima frío, Garfi et al., (2011) reportaron una temperatura media de 20 °C en la suspensión, la cual es + 2.1°C más alta que la temperatura ambiente media (17.9°C). También, Perrigault et al., (2012) reportaron temperaturas medias de suspensión de 24.5°C + 8.4°C superiores a la temperatura ambiente media (16.1°C), para un digestor similar en clima frío. Estos dos casos muestran temperaturas ambiente más altas que las que en la presente investigación (6.1°C para el invierno y 9.9°C para la temporada de verano), y en ambos casos, el incremento de temperatura de la suspensión por encima de la temperatura ambiente es inferior a los resultados que se presentan en este estudio (+ 10.3°C para el invierno; + 6.7°C verano y + 8,5°C para todo el año), lo que significa que es más fácil obtener la temperatura en climas más fríos y soleados que en climas cálidos. Perrigault et al., (2012) indica que “la diferencia en el aumento de la

temperatura de la suspensión sobre la temperatura ambiente (...) sólo puede explicarse por el aislamiento de paja”, pero en el presente trabajo no se encontró presencia de paja en la zanja después de dos años, por lo que la masa y el grosor de las paredes de adobe del invernadero (más pequeños que en el caso Garfi et al. y la orientación este-oeste de los invernaderos y los digestores (norte-sur para el caso Garfi et al. podrían ser factores adicionales que realmente puede aumentar la temperatura de la suspensión y deben ser considerados en el futuro.

Producción de biogás

La producción de biogás acumulativo fue objeto de seguimiento durante 300 días. Esta se muestra junto con la temperatura ambiente máxima, mínima y media en la Figura 5. Al inicio, la producción de biogás fue lenta y tardó tres meses para que su comportamiento

se estabilice. En los primeros tres meses los valores mínimos de temperatura estaban por debajo de -5°C y la media de la temperatura ambiente fue de alrededor de 5°C . Más tarde, la producción de biogás continuó con una temperatura mínima por debajo de 0°C después de los primeros 100 días, pero posteriormente se elevó a 0°C a 5°C .

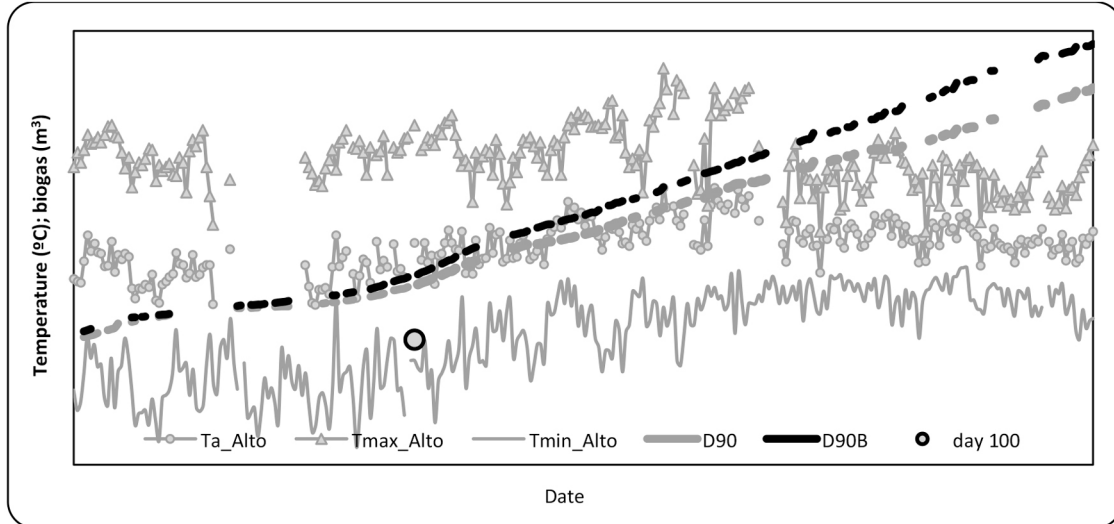


Figura 5. Producción acumulativa de biogás (condiciones locales) para D90 y D90B con temperatura ambiente mínima, máxima y media diaria.

Con el fin de caracterizar la producción de biogás del digestor, se han considerado sólo los datos de los días 100 a 300, como se muestra en la Figura 5. Para estimar la producción de biogás específica (SBP) [$\text{m}^3_{\text{biogas}}/\text{Kg}_{\text{SV}}$], la producción de biogás acumulativo (Figura 6) se normaliza a 1 atm y 0°C , dividido por el

OLR [$\text{kg}_{\text{SV}}/\text{d}/\text{m}^3$] y por el volumen del digestor [m^3], con el fin de obtener el eje Y normalizado en los $\text{m}^3_{\text{biogas}} \cdot \text{d}/\text{Kg}_{\text{SV}}$, y los días en el eje X, de modo que si se calcula la pendiente se obtiene el SBP. Los resultados para SBP y la Tasa de Producción de Biogás (BPR) [$\text{m}^3_{\text{biogas}}/\text{m}^3_{\text{digestor}}/\text{d}$] se presentan en la Tabla 3.

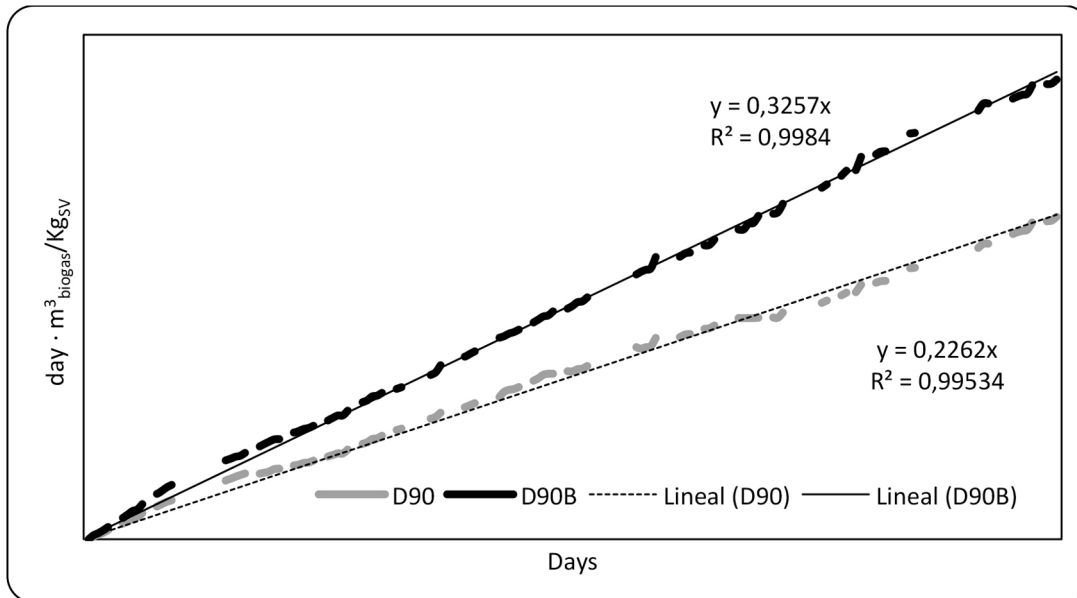


Figura 6. Producción de biogás acumulativo por Kg_{SV} para D90 y D90B para el período estabilizado, y en forma lineal para ambos casos que muestran la pendiente SBP (condiciones normales: 1 atm, 0°C)

Tabla 3. Comparación de rendimiento entre D90 y D90B y otros digestores similares

	Temperatura de solución de referencia [°C]	OLR [kg _{SV} /d/m ³]	SBP* [m ³ _{biogas} /Kg _{SV}]	BPR* [m ³ _{biogas} /m ³ _{digester} /d]
D90	16.6	0.26	0.23	0.06
D90B	16.6	0.26	0.33	0.09
Adaptado de Garfi et al (2011)	16.3	0.34	0.335	0.11
Adaptado de Ferrer et al (2011)	<25	0.22	0.30	0.065
* Condiciones normales (1atm, 0°C)				

El SBP resultante del digestor D90, 0.23 m³_{biogas}/kg_{SV}, es inferior a los valores reportados por Garfi et al. (2011) 0.34 m³_{biogas}/kg_{SV} y Ferrer et al (2011) 0.30 m³_{biogas}/kg_{SV}, para digestores tubulares en alta altitud, clima frío, con carga de estiércol de vaca y temperatura similar de la suspensión (los datos de los artículos originales se han normalizado a 1 atm y 0°C). El digestor D90 BPR 0.06 m³_{biogas}/m³_{digester}/d, también está cerca del rango de 0.11-0.07 m³_{biogas}/m³_{digester}/d reportado por Garfi et al y Ferrer et al (normalizado a 1 a 0°C).

Para el digestor D90B los resultados son muy prometedores: el SBP es de 0.33 m³_{biogas}/kg_{SV}, el BPR es 0.09 m³_{biogas}/m³_{digester}/d y el OLR igual al de D90. De esta manera los anillos PET en el interior del digestor D90B, conducen a 4.2 veces más portadores de biofilm que un digestor normal, dando como resultado un 44% más de producción de biogás por Kg_{SV} y 50% más de biogás por metro cúbico de digestor. Vartak et al., (1997) reportan un incremento del 21% de la producción de biogás utilizando poliéster como soporte de biofilm a 10°C de temperatura de la suspensión, pero sin encontrar diferencias con un reactor de control cuando se trabaja a 37°C. Gong et al., (2011) reporta la utilización de diferentes portadores de biofilm para mejorar la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de estiércol de vaca en condiciones de laboratorio, logrando un aumento del 43% de la producción de biogás cuando se utiliza una fibra de carbono activado en un reactor en blanco. Estos resultados muestran que en esta investigación se presenta un gran aumento de la producción de biogás utilizando sólo anillos PET de botellas de soda como portadores de biofilm.

Composición del biogás

La composición de biogás es muy similar para D90 y D90B (Tabla 4), con valores de CO₂ similares a los reportados por Ferrer et al (2011) - en torno al 40%, y más altos en comparación con los de Garfi et al (2011) - 34-36 % para digestores y condiciones similares. Mientras Ferrer et al. suponen que el %CH₄ se puede deducir como de 100-% CO₂, en los presentes resultados otros gases tienen más de un 10% de presencia en el biogás por lo tanto también deben ser tomados en cuenta.

Tabla 4. Composición del biogás para D90 y D90B

	D90	D90B
%CH ₄	47.22 (3.46)	47.54 (2,83)
%CO ₂	39.08 (3.54)	39.63 (5,01)
%Otros	13.70 (4.33)	12.83 (5,52)

Calidad de Bio – solución

El efluente del digestor D90 tiene 35% menos de TS y 36% menos VS que el influente, mientras que el efluente D90B muestra que este sistema elimina el 57% del TS y el 60% del VS (Tabla 5). Estos datos están de acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la producción de biogás y además reafirman al demostrar (como se esperaba) que se eliminan más sólidos para producir más biogás. El 34% de los sólidos minerales del influente se retiene en el interior D90, mientras que el 51% se retiene en D90B. La duda es si los anillos de PET en el interior del D90B condujeron a más actividad bacteriológica a causa de la biofilm, o si son los anillos PET los que retienen los

sólidos en el interior del digestor aumentando así el tiempo de retención de sólidos sobre la HRT, o si es una mezcla de ambos fenómenos.

Tabla 5. Comparación del biosuspensión de D90 y D90B con el afluente

	Influente	Efluente D90	Efluente D90B
%TS	4.13	2.69 (0.27)	1.79 (0.38)
%VS (dw)	77.04	76.90 (7.18)	73.89 (14.44)
%VS(ww)	3.18	2.05 (0.00)	1.28 (0.04)
PH	7.18	7.15 (0.02)	7.44 (0.03)
(dw): peso seco			
(ww): peso húmedo			

(dw): peso seco

(ww): peso húmedo

CONCLUSIONES

Los digestores tubulares de bajo costo adaptados a climas fríos tienden a producir menos biogás de lo esperado. Se ha evaluado una nueva estrategia añadiendo anillos de botellas PET en el interior del digestor con el fin de aumentar el área que funciona como portador de biofilm y aumentar el tiempo de retención de sólidos sobre el hidráulico. Los resultados muestran que con los anillos de PET dentro de un digestor tubular de bajo costo en clima frío, se incrementa el área interna 4,2 veces, y se produce 44% más de biogás por Kg_{sv} y 50% más por m³ de digestor. El comportamiento térmico de la suspensión indica que la ganancia solar pasiva puede conducir a una temperatura de la suspensión de 8,5°C por encima de la temperatura ambiente media diaria.

AGRADECIMIENTOS

El apoyo financiero para llevar a cabo esta investigación fue proporcionado por el Programa EnDev-Bolivia de la GIZ e Hivos, así como la colaboración de la Red de Biodigestores de América Latina y el Caribe (RedBioLAC).

BIBLIOGRAFÍA

- Abraham, R.E., Ramachandran, S., y Ramalingam, V., 2007. Biogas: can it be an important source of energy? *Environ. Sci. Pollut. Res.* 14 (1), 67–71.
- Alvarez, R., Lidén, G., 2008. The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude. *Bioresour. Technol.* 99, 7278–7284.
- Botero R.B., Preston T.R., 1987. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas: Manual para su instalación, operación y utilización. Cali, Colombia: CIPAV; 1987. 20p [cited March 2013]. Available from www.utafoundation.org/publications/botero%26preston.pdf.
- Bond T, Templeton MR. 2011. History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development* 15. pp 347-354.
- Bui Xuan An, Ngo Van Man, Duong Nguyen Khang, Nguyen Duc Anh y Preston T R. 1994. Installation and Performance of low-cost polyethylene tube biodigesters on small scale farms in Vietnam. *Proc. National Seminar-workshop in sustainable Livestock Prod. on local feed resources. Agric. Pub. House Ho Chi Minh*, pp.95-103.
- Chen I., Zhao L., Ren C., Wang F. 2012. The progress and prospects of rural biogas production in China. *Energy Policy* 51. 58-63
- Clesceri LS, Greeberg AE, Eaton AD. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th ed. Washington, DC, USA: American Public Health Association (APHA); 2000.
- Lansing S., Botero R., Martin J.F., 2008. Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. *Bioresour. Technology*; 99(13):5881-5890
- Ferrer I., Garfí M., Uggetti E., Ferrer-Martí L., Calderon A., Velo E., 2011. Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass and Bioenergy*;35:1166-1674
- Garfí M, Ferrer-Martí L, Irene Perez I, Flotats X, Ferrer I. 2011. Codigestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude. *Ecological Engineering* 37. 2066–2070
- Ghimire P.C., 2013, SNV supported domestic biogas programmes in Asi and Africa. *Renewable Energy* 49. 90- 94
- Gong W., Liang H., Li W, Wang Z. 2011. Selection

- and evaluation of biofilm carrier in anaerobic digestion treatment of cattle manure. *Energy* 36: 3572-3578
- Martí-Herrero J., 2007. Transfer of low-cost plastic biodigester technology at household level in Bolivia. *Livestock Research for Rural Development*; 19(12), Article #192. [cited March 2013]. Available from <http://www.lrrd.org/lrrd19/12/mart19192.htm>
- Martí-Herrero J., 2011. Reduced hydraulic retention times in low-cost tubular digesters: Two issues. *Biomass and Bioenergy*, 35 (10), pp:4481-4484
- Martí-Herrero, J., Cipriano, J., 2012. Design methodology for low cost tubular digesters. *Bioresource Technology* 108, 21–27.
- Perrigault, V Weatherford, J Martí-Herrero, D Poggio. 2012. Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: a heat transfer model. *Bioresource Technology* 124. 259–268
- Martí-Herrero J, Chipana M, Cuevas C, Paco G, Serrano V, Zymla B, Heising K, Sologuren J, Gamarra A. 2014. Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia. In Press. *Renewable Energy*.
- Pound B., Bordas, F. and Preston, T. R., 1981. Characteristics of production and function of a 15 cubic metre Red-Mud PVC biogas digester. *Tropical Anim. Prod.* 6: 146-153.
- Terradas-III, Cuong H. Pham CH, Triolo JM, Martí-Herrero J, Sommer SG. 2014. Thermic Model to Predict Biogas Production in Unheated Fixed-Dome Digesters Buried in the Ground. *Environmental Science & Technology*. Article ASAP. dx.doi.org/10.1021/es403215w
- Vartak DR, Engler CR, McFarland MJ, Riche SC. Attached-film media performance in psychrophilic anaerobic treatment of dairy cattle wastewater. *Bioresour Technol* 1997;62:79e84.
- Zhu, Tracy, 2006. Assessment of Small-Scale Biogas Systems and Their Widespread Dissemination in Can Tho City, Viet Nam. Independent Study Project (ISP) Collection. Paper 303.