

### Diseño y construcción de un biodigestor tubular a base de excretas de alpaca a una altura de 4200 msnm

*Design and construction of a tubular biodigester that works with alpaca manure at a height of 4200 MSL*

Oswaldo José Rojas Lazo\*, Daniel Humberto Mavila Hinojoza\*\*, Doris Gladys Rojas Carmona\*\*\*  
*Universidad Nacional Mayor de San Marcos*

#### RESUMEN

El proyecto se desarrolló en la puna del Distrito de Masma, Provincia de Jauja, Región Junín, Perú. El 23 de julio de 2015 se instaló y se cargó el reactor de PVC (policloruro de vinilo) de 6m<sup>3</sup> y se protegió con un invernadero semi enterrado totalmente cubierto. En la base se colocó un colchón de ichu (*Stipa ichu*) y tecnoport (poliestireno expandido), las paredes superiores fueron hechas de piedra y barro, el techo consta de: un plástico de invernadero, encima una geomembrana de polietileno y cubierto con calaminas. Se utilizó un cultivo inicial de bacterias de ganado vacuno. Se estimó un período de retención hidráulica de 70 días. El 05 de octubre del mismo año un ventarrón provocó que el techo colapsara. Se instaló un calentador solar de agua para elevar su temperatura. El 21 de diciembre del citado año se visitó el invernadero, el cual no estaba herméticamente cubierto y el ducto interno emanaba un olor a metano. A la fecha del artículo está pendiente de realizar las reparaciones correspondientes.

**Palabras clave:** Biodigestor tubular, Tratamiento de excretas de ganado, Biogas en los Andes del Perú, Bioabono en pastos naturales.

#### ABSTRACT

The project was carried out in the highlands of Masma District, Jauja Province, Junin Region. On the 23<sup>rd</sup> of July of 2015 the digester was installed and the reactor of PVC (polyvinylchloride) (6m<sup>3</sup>) was loaded and it was protected with a greenhouse semiburied fully covered. At the base, a mattress of ichu (*Stipa ichu*) and tecnoport (poliestireno expandido) was placed. The upper walls were made of stone and mud, the roof is a plastic greenhouse. Above it, there is a polyethylene geomembrane and covered with corrugated iron. Additionally, an initial culture bacteria of cattle was used. A period of 70 days hydraulic retention was estimated. On the 5<sup>th</sup> of October, the roof collapse by a gale. For that reason, a solar water heater was installed to raise its temperature. On the 21<sup>st</sup> of December the greenhouse was visited and was not tightly covered and in the internal pipe gave off a methane's smell. On the date of the article is written, the repairs need to be done.

**Keywords:** Tubular digester in the highlands of Peru, Digester Andes of Peru, Livestock waste treatment, Biogas in the highlands.

Recibido: 26/04/2016

Aprobado: 15/05/2016

\* Departamento de Diseño y Tecnología Industrial de la Facultad de Ingeniería Industrial, UNMSM. <orojasla@hotmail.com>

\*\* Departamento de Sistemas e Informática de la Facultad de Ingeniería Industrial, UNMSM. <daniel.mavila@industrial.unmsm.pe>

\*\*\* Facultad de Ingeniería Industrial, UNMSM. <doris.rojas@industrial.unmsm.pe>

## Introducción

**E**l biodigestor o digestor orgánico es un tipo de reactor dentro del cual se realiza un proceso de digestión anaeróbica (biometanización) permitiendo la transformación de la materia orgánica en un biocombustible (biogás) y bioabono (líquido – biol y sólido – biosol).

El proyecto se realizó en la Región Junín, Provincia de Jauja, Distrito de Masma, Paraje Hualay Chico, Estancia Picpish Tambo, a 4 212 msnm, aproximadamente a 40 km de la zona urbana del distrito de Masma y para llegar a la estancia se tiene que ir con una camioneta 4x4 durante 1½ horas por un camino de herradura empinado y en tramos abriendo camino sobre el pasto natural. El proyecto se desarrolla en la vertiente izquierda del río Mantaro.

El lugar posee suelos de baja fertilidad, siendo las hierbas gramíneas las más abundantes. El ichu es el vegetal de mayor tamaño (Gráfico 1). La fauna del lugar son auquénidos (llama y alpaca), ganado vacuno, muy poco ganado ovino y animales silvestres como aves y zorros.

Las viviendas se ubican cerca de algún manantial y son chozas circulares de paredes de piedra y barro, los techos tienen armazón de troncos de madera y cubierto por capas de ichu (Gráfico 2).

El clima es propio de la puna (según Javier Pulgar Vidal de 4000 a 4800 m s. n. m.) con lluvias estivales de diciembre a marzo e inviernos secos con heladas. Presenta grandes oscilaciones de temperatura en el día (-5 °C a 20 °C) y una elevada radiación solar.



**Gráfico 1.** El ichu, vegetal de mayor tamaño

Los beneficiarios del biodigestor son dos personas mayores de 65 años que se dedican al pastoreo de sus animales (alrededor de 50 alpacas, 100 ovejas, 2 vacas y un burro), viven en 4 chozas, dos son dormitorios, uno es cocina y el otro almacén. La comunicación vía telefonía móvil es deficiente, solo entran llamadas en determinados lugares y según las condiciones climáticas. El vecino más cercano se encuentra a 30 minutos de camino a pie.

El objetivo general del proyecto fue hacer funcionar un biodigestor tubular a base de una codigestión de excretas de alpacas, ovejas y ganado vacuno a una altura de 4200 msnm.

## Metodología y técnicas de investigación utilizadas

El estudio fue una investigación básica aplicada. La recolección de la información documentada fue a través de internet en especial de la plataforma electrónica Sciencedirect.

Se visitó e inspeccionó los biodigestores instalados en el Valle del Mantaro, detallados en el Cuadro 1.

Se tomó como referencia de instalación el biodigestor instalado en la zona urbana del distrito de Masma (3650 msnm) instalado por la UNMSM en el año 2014.

Para la construcción del invernadero se tomó en cuenta la opinión de expertos y se empleó ichu en la base, mientras que en la parte superior se utilizó geomembrana de polietileno # 12 y calamina galvanizada.



**Gráfico 2.** Vivienda de la beneficiaria

CUADRO 1. BIODIGESTORES VISITADOS EN EL VALLE DEL MANTARO

Distrito	Responsable de operación	Situación del biodigestor	Altura m s. n. m.
Iscos	ONG	No operativo por problemas judiciales de tierras.	3275
Molinos	Gobierno Regional	No operativo, fue desactivado porque una avalancha destruyó las instalaciones.	3430
San Lorenzo	Particular	No operativo, fue desactivado por no ser rentable, se tenía que calentar el agua a utilizar.	3308
Apata	Particular	No operativo, fue desactivado el biodigestor, fue roto por un roedor.	3340
Janjaillo	Gobierno Regional	Operativo, el biogás es usado para cocinar, el biol es usado en pastos naturales.	4200
Janjaillo	Gobierno Regional	No operativo, fue instalado en un colegio, no funciona por falta de personal e insumos.	4200
Masma	UNMSM	Usada en caso de necesidad, familia beneficiaria del Fondo de Inclusión Social Energético donde el gobierno subsidia los balones de gas.	3650

Fuente: Equipo de apoyo de la Investigación

Para la carga inicial se aplicó como cultivo de bacterias la del ganado vacuno trasladado del Distrito de Masma hasta la estancia.

Para calentar el agua para alimentar al biodigestor se utilizará un calentador solar.

Para la aplicación del flujo continuo del biodigestor se aplicará la co-digestión de las excretas de los ganados vacuno, ovino y alpacas así como residuos de grasa animal.

## Principios teóricos

### *Digestión anaeróbica*

La creación de energía renovable a partir de productos de desecho a través de los resultados de digestión anaerobia origina numerosas ventajas, incluyendo la captura y utilización de metano, un gas de efecto invernadero 21 veces más potente que el dióxido de carbono, disminuyendo la carga orgánica de las aguas receptoras, y la creación de un alto contenido de nutrientes, bajo sólido de fertilizantes (Archer y Kirsop, 1990).

Durante la digestión anaerobia, los patógenos se reducen considerablemente (Archer y Kirsop, 1990), la materia orgánica se reduce en un 50 a

90%, y se obtiene un fertilizante más eficaz debido a la transformación de los microorganismos orgánicos de los nutrientes disueltos (Lansing et al., 2008).

### *Digestores*

Los digestores de polietileno tubulares, son fáciles de implementar y de bajo costo; puede facilitar la expansión de esta tecnología en las zonas rurales (An BX et al., 1999). El uso de digestores tubulares de PCV (geomembrana), que son más resistentes, debería ampliar la vida útil del sistema, aunque a mayores gastos (Pedraza G et al., 2002).

Las metodologías reportadas para el diseño de un digestor tubular de bajo coste utilizan el volumen cilíndrico de las formas tubulares de plástico como el parámetro central. Este volumen total se separa en dos fases líquidas y de gas. Dependiendo del autor, el volumen de líquido se reporta como el 80% del volumen total cilíndrica (Bui et al., 1995; Sarwatt et al., 1995; Rodríguez y Preston, 1999; Poggio et al., 2009) o 75% (Botero y Preston, 1987; Aguilar, 2001; Martí-Herrero, 2008).

En un digestor anaeróbico, la energía en forma de biogás de metano enriquecido se produce a través de la degradación microbiana de varios tipos de entradas de materia orgánica, la más co-

mún es el estiércol del ganado. Durante la digestión anaeróbica, las moléculas orgánicas complejas tales como carbohidratos, proteínas y grasas son transformadas a través de una vía bioquímica microbiana mediada por múltiples pasos. Los productos finales de este proceso incluyen metano, gas dióxido de carbono y formas inorgánicas de nitrógeno y de fósforo (Gerardi, 2003). Los beneficios adicionales de la digestión anaerobia incluye la reducción de olores y patógenos asociados con el estiércol del ganado (Powers et al., 1999; USEPA, 2004; Lansing et al., 2010).

Los digestores de bajo coste utilizados en este estudio son de modelo taiwanés, que son sistemas de flujo de pistón construidos con polietileno tubular o geomembrana y no se calientan, ni tienen mecanismos de control mecánicos (Botero y Preston, 1987; Chará et al., 1999). Los sistemas de operar en la parte inferior de la gama de mesófilos (20-30°C) Y tienen un tiempo de retención de 20-50 días (Botero y Preston, 1987; Lansing et al., 2008).

El proceso de digestión anaerobia normalmente se clasifica en tres intervalos diferentes de temperatura, psicrófilos (<20 °C), mesófilas (20 a 40°C) y termófila (> 40°C) (El-Mashad et al., 2004). Los microorganismos implicados en la digestión anaerobia se caracterizan por una temperatura óptima así como por un límite superior que causaría la muerte inmediata del grupo considerado de bacterias (Chen, 1983).

#### *Biodigestores tubulares en los Andes del Perú*

En las comunidades rurales de los Andes del Perú, la economía se basa en la agricultura de subsistencia (agricultura autosuficiente). En la mayoría de los casos, todavía hay una falta de servicios básicos como agua potable, saneamiento o electricidad. El 42% de la población no tiene acceso a servicios de saneamiento y la mayoría de los hogares no tratan las aguas residuales de ganado, lo que lleva a la contaminación del agua y del suelo con riesgos para la salud de los concomitantes. La biomasa tradicional, incluyendo la leña y secado al aire del estiércol de ganado, se utilizan para cocinar (sin

cocinas mejoradas para los sistemas de control de humo), lo que genera contaminación del aire interior (materia particulada en especial) y ambientes insalubres (He et al. 2010; Visser y Khan, 1996).

En las comunidades rurales andinas ubicadas entre 3500 a 4500 msnm, se caracterizan por el aumento de la deforestación y los suelos tienen un contenido de fósforo muy bajos (alrededor de 0,5 ppm), pH ácido (3-4), por lo que la fertilidad del suelo es baja (Marianna Garfí et al. 2011).

Con el objetivo de mejorar las condiciones de vida de los hogares, durante los últimos años digestores tubulares de bajo costo adaptadas a las condiciones de la meseta andina se han aplicado para tratar las aguas residuales del ganado y generar biogás para cocinar. La producción de biogás a partir de estiércol de vaca y conejillo de indias a gran altura se ha caracterizado (Ferrer et al. 2011; Garfí et al. 2011)

Desde 2006 se han aplicado más de 30 digestores en las comunidades rurales de los Andes de Perú por medio de proyectos piloto de investigación y de cooperación para el desarrollo. La mayoría de ellos están ubicados en altitudes entre 3000 y 4000 msnm, donde las temperaturas medias anuales son alrededor de 10°C y la irradiación tan alto como 6.0 a 6.5 kWh m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. En tales condiciones, el uso de invernaderos está dirigido a aumentar la temperatura del proceso (a alrededor de 20°C) y reducir las fluctuaciones de temperatura durante la noche. Actualmente, el biogás se utiliza para cocinar, lo que lleva a un 50% de sustitución de los combustibles tradicionales (es decir, la leña o secado al aire estiércol de ganado) (Poggio D. et al. 2009). Sin embargo, la producción de biogás y contenido de metano aún no ha sido cuantificado. Esta información es necesaria con el fin de evaluar el rendimiento de los sistemas, mejorar la producción de gas y reducir los costos de capital; lo que ayudaría a cumplir con la fuerte demanda de los digestores de bajo coste por las familias y los agricultores de los Andes (Ivet Ferrer et al. 2011).

Martí - Herrero (2007, 2008), en el altiplano de Bolivia en el año 2003 se adaptó el diseño de Botero a los climas fríos aumentando el tiempo de retención hidráulica (TRH) a 90 días y la adición de

un invernadero con paredes de adobe y alta masa térmica de paja como aislante en la zanja. (Poggio et al. 2009), en el Perú, propuso añadir al modelo Martí-Herrero un simple sistema de calefacción solar, integrada en el diseño tomando ventaja de la estructura del digestor para climas fríos.

Ferrer et al. (2011), ha publicado los resultados de dos digestores de bajo coste tubulares supervisados en los Andes del Perú, obteniendo una tasa de producción de biogás de alrededor de  $0,35 \text{ m}^3 \text{ kg}_{\text{VS}}^{-1}$ , para la TRHs de 60 y 90 días, con una tasa de carga orgánica (TCO) por debajo  $0,75 \text{ kg}_{\text{VS}} \cdot \text{m}^{-3} \text{ día}^{-1}$ . Ferrer propone investigar el TRH menos de 60 días y TCO por encima de  $1 \text{ kg}_{\text{VS}} \cdot \text{m}^{-3} \text{ días}^{-1}$  con el fin de disminuir el volumen de los digestores (disminución de costos) y aumentar la tasa de producción de biogás.

Álvarez et al. (2006), informa de los resultados de la evaluación de los efectos de la presión (495 y 760 mm Hg), temperatura (11 y 35°C), la TRH (20 y 50 días), y el contenido de estiércol en la suspensión (10%, 20 % y 50%) respecto a la productividad y los rendimientos de metano procedentes de la digestión de la vaca y la llama. Estas condiciones se refieren a gran altitud condiciones de clima frío como Andes del Perú o el altiplano boliviano. Álvarez determinó que el efecto de la presión no es significativa, mientras que el factor principal para lograr una mejor productividad y el rendimiento de metano es la temperatura. La temperatura en los digestores de bajo coste se ha aumentado tomando ventaja de los dispositivos de calefacción pasiva como invernaderos, inercia térmica y aislamiento (Martí-Herrero, 2008).

Los rendimientos de metano razonables a partir de la digestión anaerobia se pueden esperar a bajas temperaturas (14-23 °C), si la velocidad de la COD se reduce adecuadamente mediante la ampliación del tiempo de retención hidráulica (Safley LM. 1990).

El altiplano, a una elevación desde 3000 a 4000 m s. n. m., abarca una superficie de más de 600 000 km<sup>2</sup>, barrida por vientos fuertes y fríos, y tiene un clima árido y frío, con grandes oscilaciones de la temperatura diaria. Las temperaturas diarias promedio oscilan entre 15°C a 20°C y las mínimas

promedio de -15°C a 3°C (con una presión atmosférica alrededor de 60-70 kPa (460-500 mm Hg) y una elevada radiación solar media de 5,5 kWh/(m<sup>2</sup> día). El grupo más importante de los animales domésticos son llamas, vacas y ovejas (Álvarez y Liden, 2008).

Según Álvarez R. (2006), las duras condiciones climáticas del altiplano y los forrajes tolerantes a las heladas dan una dieta especial a los animales. Los rendimientos de metano bajos obtenidos en la digestión anaerobia de estiércoles del altiplano sugieren la presencia de un alto contenido de compuestos poco solubles y recalcitrantes, y el estiércol de vaca desde el altiplano también contienen un bajo porcentaje de proteínas (~10%) y un alto contenido de la lignina (~25%).

En un estudio se evaluó a los digestores tubulares de plástico en relación a impactos técnicos, medioambientales y socioeconómicos en las comunidades rurales del departamento de Cajamarca. Los resultados mostraron cómo digestores mejoraron las condiciones de vida del hogar y de la economía, al tiempo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la biomasa tradicional. Sin embargo, los beneficios se restringieron por un pobre desempeño de la digestión anaerobia a gran altura. De hecho, bajo las duras condiciones climáticas de la meseta andina, digestores requieren el aislamiento adecuado y el TRH es más largo en comparación con los análogos digestores implementados en los trópicos. Desde un punto de vista medioambiental, el uso eventual de grandes cantidades de plástico es un motivo de preocupación. Optimizar el rendimiento, la economía y la sostenibilidad ambiental de los digestores domésticos en los Andes rural está considerado en la actualidad un fuerte desafío (Garfí M. et al. 2012).

Debido a las condiciones de clima frío del altiplano, la rentabilidad de la producción de biogás depende del mantenimiento de una temperatura de la suspensión del digestor superior a la temperatura ambiente promedio. Este efecto de las fluctuaciones diarias de temperatura en el proceso de digestión anaerobia rara vez se ha investigado. Varios métodos para aumentar la temperatura

del digestor se han propuesto: mezclar el material de alimentación de entrada con agua caliente, la construcción de un pozo de compost aeróbico alrededor del digestor y que se encierre la planta de biogás dentro de un invernadero (Kishore, 1989).

Singh et al. (1985) desarrollaron un modelo matemático en función del tiempo para estudiar los efectos de la inclusión de diferentes tipos de aislamiento en la superficie interior del soporte de gas de una cúpula fija y digestores de tipo domo flotante. El modelo supone que la mayoría de la transferencia de calor se produce entre la parte superior de la cúpula y el aire ambiente y que la transferencia de calor es de una sola dimensión. (Kishore, 1989) llevó a cabo un análisis de transferencia de calor en estado estacionario para-domo fija plantas de biogás. El análisis tiene en cuenta las pérdidas de calor desde la superficie de la suspensión en el interior del digestor, así como las pérdidas de calor a la tierra circundante (conducción, radiación térmica y convección).

Los sistemas de reactores anaeróbicos solares activos. (Axaopoulos et al. 2001) se investigaron en un sistema de calefacción solar que consistía en un digestor cubierta con colectores solares de placa plana conectados a un intercambiador de calor sumergido en la suspensión. (El-Mashad et al. 2004) estudiaron dos tipos diferentes de sistemas de reactores, completamente agitados, termófilos anaerobios. Un sistema consistía en un colector solar colocado fuera del reactor, y el otro con un colector solar montado en el techo del reactor. Las investigaciones experimentales se centraron en los efectos de las fluctuaciones de temperatura, tamaño del reactor, y características de aislamiento en la producción de metano. Este tipo de soluciones activas aumentan el coste y la complejidad de los digestores y se considera que son menos apropiadas para los pequeños agricultores de los países de bajos ingresos.

(Garfi et al. 2011) reportaron algunos datos de temperatura experimentales de un digestor tubular de bajo coste a 2800 m s. n. m. en Cajamarca (Perú) en un invernadero, que muestra cómo la suspensión mantiene una temperatura casi constante alrededor de 20°C, mientras que el efecto

invernadero alcanza temperaturas de hasta 60 °C durante el día y 15 °C durante la noche, con una temperatura ambiente de 10°C a 30°C, la conclusión de que "el efecto del invernadero de la temperatura del proceso es dudoso". (Ferrer et al. 2011) también informa resultados de este digestor, pero no se concentra en el rendimiento térmico.

El efecto invernadero de bajo costo implementado en los biodigestores fue desarrollado para las condiciones climáticas del altiplano (Martí-Herrero, 2007, 2008, 2012). En esta disposición, el digestor tubular está aislado de la tierra y se integra en un invernadero compuesta de paredes térmicamente masivas de adobe y cubierta con una lámina de plástico transparente. Las paredes de adobe almacenan calor durante el día y lo liberan durante la noche. (Poggio et al., 2009).

Varios estudios muestran que una disminución en la temperatura generalmente causa una menor eficiencia de la DQO, la menor producción de biogás, y la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV). Digestores anaeróbicos parados recuperan sus eficiencias por completo después de que la temperatura se ha ajustado (Ahn y Forster, 2002).

#### *Co-digestión en biodigestores*

Co-digestión es la digestión simultánea de una combinación de dos o más sustratos, es una técnica atractiva por el cual las características complementarias de los sustratos mejoran el proceso de la digestión. La co-digestión anaerobia de varios residuos agrícolas (Tafdrup, 1995).

Las mezclas de sustratos en procesos de co-digestión han demostrado ser más productivos en los procesos de digestión anaerobia que los sustratos puros (Mata-Álvarez et al., 2000). Existe escasa información sobre co-digestión a bajas temperaturas.

La temperatura y el tipo de materia prima son dos parámetros importantes en la digestión anaeróbica. La digestión anaerobia es fuertemente afectada por el tipo de materia prima, el rendimiento de metano y la posible reducción del contenido de sólidos. Co-digestión es una técnica

mediante la cual la tasa de bioconversión, así como el rendimiento de metano se puede aumentar. Los beneficios del proceso de co-digestión son la mejora en el equilibrio de los nutrientes, disminución del efecto de compuestos tóxicos en el proceso de digestión y mejora en las cualidades reológicas del sustrato (Mata-Alvarez. 2000, Murto M. 2004).

En la co-digestión de la llama-ovejas la digestión mezcla aumentó el rendimiento de metano a partir de la llama con el 56% y estiércol de llama-vaca-oveja aumentó el rendimiento de metano en un 35%. Sin embargo, la mezcla binaria vaca-llama aumentó el rendimiento sólo marginalmente (Álvarez R. 2006).

Estudios anteriores han demostrado que una mezcla de diferentes abonos puede resultar en un mejor rendimiento de la digestión a través de la mejora de la relación C/N, aumento asociado de la capacidad de amortiguación (Murto M. 2004), y disminución del efecto de compuestos tóxicos en el proceso de digestión (Ahring BK. 1992). La digestión de la llama-vaca-oveja dio como resultado un rendimiento mejorado ligeramente de metano. Los resultados indicaron que algunos aspectos de la llama, vaca, estiércol de oveja se beneficiaron de la digestión de la mezcla, por ejemplo, el contenido relativamente alto de nitrógeno procedente de estiércol de llama reduce la deficiencia de nitrógeno vaca. Además, la inhibición de amoníaco en una digestión de estiércol llama puro puede ser evitado por dilución (Álvarez R. 2006).

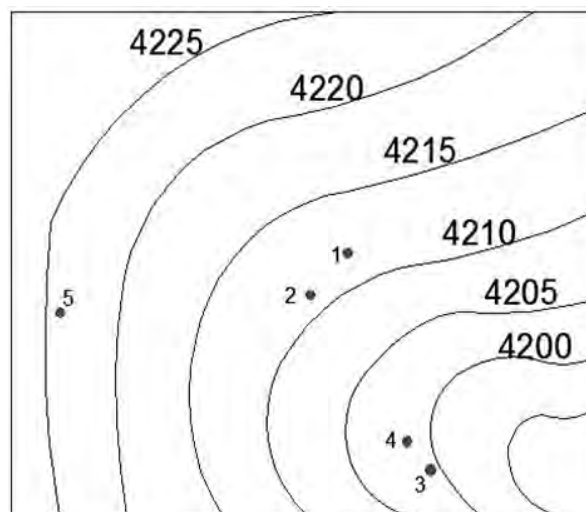
Estudios han demostrado que la digestión de materiales con alto contenido de lípidos aumenta el rendimiento de metano (Cirne et al., 2007), la eficiencia digestor (Jeyaseelan y Matsuo, 1995), y es más eficaz que la digestión de estiércol solo (Ghaly, 1996). A pesar de esta aparente ventaja, estudios previos que digieren materiales ricos en lípidos y sin co-digestión encontraron que los insumos químicos eran necesarios para evitar que el sistema se acidifique (Ugoji, 1997).

Se ha establecido que el estiércol es el mejor material para realizar co-digestión con residuos que tienen elevado contenido de grasa debido a la alta alcalinidad del estiércol, lo que aumenta la resistencia a la acidificación del digestor (Angelidaki

y Ahring, 1997). Además, el estiércol tiene altos niveles de amonio, que son importantes en el crecimiento bacteriano. Mladenovska et al. (2003) encontraron que la co-digestión de estiércol con materiales que contienen 2% de grasa mejora de la eficiencia de digestión sin un aumento de la acidez. Curiosamente, el proceso de biometanización respondió inmediatamente al repentino aumento de la temperatura. Esto sugiere que la actividad de las bacterias metanogénicas está bien conservada durante el período a baja temperatura.

### *Emplazamiento del biodigestor*

La vivienda de la beneficiaria se encuentra en una quebrada, donde por las tardes circula un fuerte viento. La ubicación del biodigestor debe estar cerca de la cocina, por lo que el emplazamiento será paralelo al cerro (ver croquis de la ubicación, Gráfico 3 y en el Gráfico 4 se presenta una fotografía del emplazamiento).



**Gráfico 3.** Croquis de la ubicación del biodigestor

1. Emplazamiento del biodigestor
2. Emplazamiento de la choza donde se encuentra la cocina
3. Ubicación del manantial
4. Lugar donde se instaló el invernadero
5. Corral del ganado

En el Cuadro 2, se presenta el calendario de actividades que se desarrolló en el lugar del emplazamiento del biodigestor y las actividades principales que se realizaron.

CUADRO 2. CALENDARIO DE ACTIVIDADES EN LA ESTANCIA PICPISH TAMBO

Fecha	Actividad
29/06/2015	Visita de inspección, se determinó el emplazamiento del biodigestor. Se llevó materiales básicos
21/07 al 24/07/2015	Preparación de la zanja, abastecimiento de ichu, instalación del reactor con su invernadero, carga del reactor, instalación del invernadero. Se llevó excretas de ganado vacuno (3 barriles) y materiales para el invernadero.
09/10/2015	Instalación de controles del sistema de biogas, instalación del calentador solar de agua, instalación de panel solar para carga de celular, instalación de block de vidrio para iluminación de la choza de la cocina. De la inspección visual al invernadero del reactor se observó que no se encontraba adecuadamente cubierto y al destapar la tubería de control se percibió un leve olor a metano. La beneficiaria informó que el 06 de octubre un fuerte ventarrón se llevó el techo del invernadero. No se encontraba presente el operador del biodigestor puesto que había sido trasladado de emergencia por motivos de salud a la ciudad de Huancayo.
21/12/2015	Inspección del invernadero no estaba totalmente cubierto y el gasómetro estaba en un 5% inflado.



Gráfico 4. Fotografía del emplazamiento del biodigestor

- Sobre el ichu y cubriendo toda la zanja se colocó planchas de tecnopor de 2» de espesor (base y paredes laterales).
- Encima se instaló el reactor.
- Para la cubierta, se colocó una capa de plástico para invernadero.
- Encima del plástico se colocó una lámina de geomembrana de polietileno # 12.
- Se colocaron las vigas (troncos de 10 cm de diámetro).
- Se colocaron las viguetas (listones de forma cuadrada de 4 cm de lado).
- Se techo con calaminas.
- Por las noches se debe cubrir el techo con una gigantografía para proteger del frío.

#### Características de los equipos

- El reactor y el gasómetro son de PVC y fue comprado a la empresa CIDELSA, el reactor tiene un volumen 6 m<sup>3</sup> y el gasómetro 2 m<sup>3</sup>.
- En el Gráfico 5, se presenta las dimensiones de la zanja (forma trapezoidal invertida), los muros de piedra (debido a que al hacer la zanja se encontró roca) y el canal de drenaje para las lluvias.
- Para el invernadero se usaron (Gráficos del 6 al 12):
  - Primero toda la superficie se recubrió con plástico grueso (gigantografía usada).
  - Encima del plástico en la base de la zanja se colocó ichu en forma cruzada en tres capas con una altura total de 15 cm.

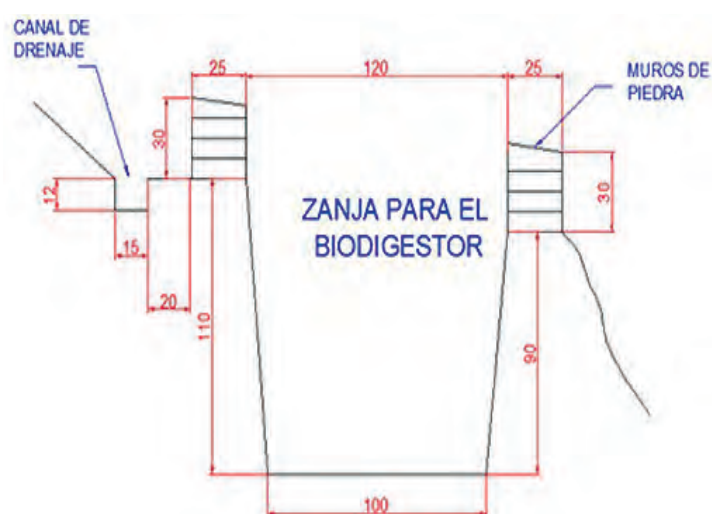


Gráfico 5. Corte transversal de la zanja donde irá el reactor del biodigestor





**Gráfico 6.** Roca en el fondo del invernadero



**Gráfico 7.** Construcción de muro de piedra y barro

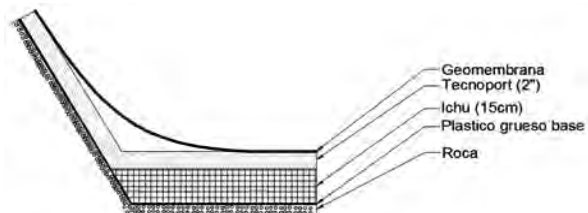


En la base plástico de banner

Sobre el plástico ichu

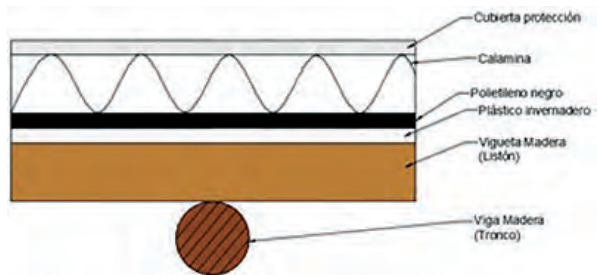
Zanja para el reactor de ichu

**Gráfico 8.** Base del invernadero (colchón de 15 cm de ichu)

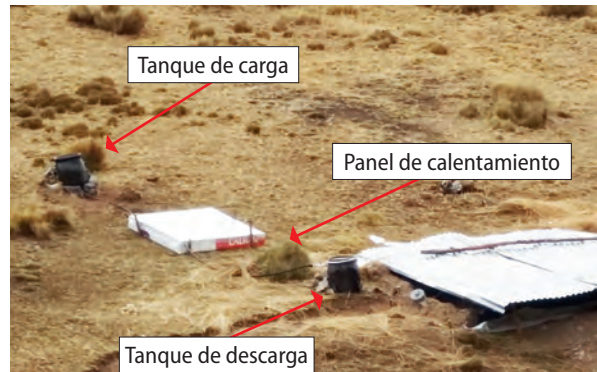


Geomembrana  
Technoport (2")  
Ichu (15cm)  
Plástico grueso base  
Roca

**Gráfico 9.** Sección transversal de la base del invernadero



**Gráfico 11.** Sección longitudinal del techo del invernadero



**Gráfico 12.** Componentes del calentador solar



Calaminas

Paredes de piedra y barro

Tubería de descarga  
de biogás

Talud del cerro

**Gráfico 10.** Techo de calamina del biodigestor

Para poder alimentar al biodigestor con agua tibia, se instaló un calentador solar de agua cuyas medidas son de un metro cuadrado, forrado con geomembrana de polietileno, tubería interna de tubo negro de riego por aspersión rodeado por botellas de plástico colocados en forma circular, la tapa es plástico de invernadero, los tanques son de plástico de color negro. En la única prueba que se pudo realizar en el lapso de 30 minutos (14.30 hrs – con poco sol) se pudo subir la temperatura en 8°C.

CUADRO 3. CUADRO COMPARATIVO ENTRE UN BIODIGESTOR RURAL Y EL DE LA PUNA

INFORMACIÓN GENERAL	Biodigestor rural urbana	Biodigestor puna
Altura donde se encuentra instalado el biodigestor	3650 msnm	4212 msnm
Zonificación de la vivienda	Rural urbana a 4 cuadras de la plaza de armas.	Rural puna aproximadamente a 40 km de la plaza de armas
Distancia a la vivienda más cercana	10 m	3 km
Labor común de los pobladores	Cultivo de terrenos y pastoreo de ganado vacuno	Pastoreo de ganado ovino y alpacas
Número de personas en la vivienda	6 personas	2 personas
Actualmente cocina con	Leña y gas (beneficiaria del programa de gas del gobierno – después de la instalación)	Bosta, ichu y rajada traída de la zona urbana, Esporádicamente con gas.
Cuenta con agua	Agua entubada	Manantial
Servicios higiénicos	Silo con paredes de plástico	Aire libre
Animales pequeños	Gallina 4, cuyes 10	Pollitos 3
Existencia de árboles	Eucalipto	No existen árboles
RELACIONADAS AL BIODIGESTOR		
Número de ganado	Vacuno 6, burro 1	Alpacas 50, ovejas 60. Vacuno 1
Excreta inicial	Ganado vacuno	Ganado vacuno
Proporción excreta/agua	1/3	1/3
Volumen biodigestor	8 m <sup>3</sup>	6 m <sup>3</sup>
Temperatura Referencia 8 Hs. (23/07/2015)	5°C	2°C
Temperatura Referencia 12 Hs. (23/07/2015)	20°C	17°C
Temperatura Referencia 18 Hs. (23/07/2015)	7°	9°C
Viento	2/6	6/6
Aislamiento base	Ninguno	15 cm de ichu
Aislamiento tecnopor	1.5»	2»
Cubierta plástico invernadero	Si	Si
Cubierta plástico negro	Plástico simple	Geomembrana 12
Techo calamina	Si	Si
Calentador solar de agua	No	si
Agua para el biodigestor tomado de	Acequia	Manantial
Cubierta plástica sobre la calamina por la noche	No	Si
Excreta de trabajo normal	Ganado vacuno	Oveja, alpaca y ganado vacuno
Uso del biol	Cultivos de pan llevar	Solo pastos naturales
Uso del biogás	Cocinar	Cocinar

Como trabajo adicional se plantó dos almácigos del árbol quinual (*Polylepis racemosa*) dentro de un invernadero, se colocó un panel solar para carga de celular e iluminación, también se colocó

en el techo de la choza de la cocina un block de vidrio para mejorar su iluminación.

En el Cuadro 3, se presenta un cuadro comparativo entre el biodigestor de referencia ubicado

en la zona rural urbana del distrito de Masma y el biodigestor del proyecto.

La información en la red sobre proyectos similares se encuentran en Bolivia a 3 900 m s. n. m. y en Puno a 3 800 m s. n. m. en estos lugares funciona con excretas de ganado vacuno y con invernadero.

### Resultados finales

- Se ha construido el biodigestor de PVC a 4 212 m s. n. m. teniendo al invernadero como un nuevo diseño.
- Se realizó la carga del biodigestor con caldo de cultivo de excretas de ganado vacuno y agua tibia en la proporción de 3 a 1.
- Se ha construido el calentador solar de agua tomando como base botellas de gaseosas usadas pintadas de negro y una cubierta de polietileno, se probó su funcionamiento.
- En la inspección del mes de diciembre se observó que el gasómetro solo estaba cargado en un 5%, se observó que el invernadero no estaba totalmente cubierto y que no se había seguido las recomendaciones impartidas por el diseñador.
- Para poder probar su funcionamiento se tendría que rehacer el techo del invernadero, colocar un muro cortaviento y los beneficiarios seguir las instrucciones dadas por los diseñadores.

### Conclusiones

- En toda la cañada corre por las tardes un viento fuerte por lo que es necesario asegurar bien el techo del invernadero y colocar un muro cortante.
- La familia seleccionada demuestran interés en el proyecto pero debido a su avanzada edad y las enfermedades que padece no se tiene continuidad con la atención del proyecto.
- No se pudo demostrar la hipótesis debido al accidente ocurrido con el invernadero.

- La dificultad del acceso al lugar de la instalación no permite un monitoreo continuo.
- El almacigo de quinal servirá de referencia para la forestación de la zona.
- La instalación de paneles solares para iluminación y carga de cámaras fotográficas son factibles a un bajo costo.
- Si el biodigestor funciona, podría ser una solución para mejorar la calidad de vida de las personas que viven sobre los 4 000 m s. n. m.

### Recomendaciones

- Las personas que tengan que trabajar en el lugar del emplazamiento del biodigestor deben ser personas acostumbradas a la altura. Los colaboradores que acompañaron a pesar de dos días de aclimatación a una altura de 3 600 m s. n. m. tuvieron dificultades a la altura de 4 200 m s. n. m.
- Debido al frío del lugar por las noches es conveniente llevar una carpa de campaña o construir un cuarto con el aislamiento apropiado.
- Es necesario un trabajo de sensibilización en los pobladores en lo referente a la tecnología de manera que permitan mejorar sus condiciones de vida.

### Referencias bibliográficas

- Aguilar, F.X. (2001). How to install a polyethylene biogas plant. United Kingdom: MSc Sustainable Agricultural Systems. The Royal Agricultural College Cirencester. <[http://journeytoforever.org/biofuel\\_library/digeste.pdf](http://journeytoforever.org/biofuel_library/digeste.pdf)>. Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012). Citado por J. Martí-Herrero (2011).
- Ahn, J.H., Forster, C.F. (2002). The effect of temperature variations on the performance of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating a simulated papermill wastewater. *Process Biochemistry* 37 (6), 589–594. Citado por René Álvarez (2008).
- Ahring, B.K., Angelidaki, I., Johansen, K. (1992). Anaerobic treatment of manure together with industrial waste.

- Water Science and Technology 25, 311–318. Citado en René Alvarez y Gunnar Lidén (2008). Citado por René Alvarez (2009).
- Alvarez, R., Villca, S., Liden, G. (2006). Biogas production from llama and cow manure at high altitude. *Biomass Bioenergy* 30, 66–75. Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012). Citado por René Alvarez (2009).
- Alvarez, R., Liden, G., 2008. The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude. *Bioresource Technology* 99, 7278–7284. Citado por Thibault Perrigault et al. (2012).
- An BX, Preston TR. Gas production from pig manure fed at different loading rates to polyethylene tubular digesters. *Livest Res Rural Dev* 1999;11(1), <http://www.lrrd.org/lrrd11/1>. Citado en Ivett Ferrer (2011).
- Angelidaki, I., Ahring, B.K. (1997). Co-digestion of olive mill wastewaters with manure, household waste or sewage sludge. *Biodegradation* 8, 221–226. Citado por Stephanie Lansing et al. (2010).
- Axaopoulos, P., Panagakakis, P., Tsavdaris, A., Georgakakis, D. (2001). Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester. *Solar Energy* 70, 155–164. Citado por Thibault Perrigault et al. (2012).
- De Baere, L. (2000). Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the-art. *Water Science and Technology* 41 (3), 283–290. Citado en René Alvarez y Gunnar Lidén (2008).
- 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. <<http://www.utafoundation.org/publications/botero%26preston.pdf>>. Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012). Citado por J. Martí-Herrero (2011).
- Bui, X.A., Ngo, M., Duong, N.K., Nguyen, D.A., Preston, T.R. (1995). Installation and performance of low-cost polyethylene tube biodigesters on small-scale farms in Vietnam. National Seminar-workshop “Sustainable Livestock Production On Local Feed Resources”. 1993 Nov 22–27; Ho Chi Minh City. Ho Chi Minh City: Agric. Pub. House, pp. 95–103. Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012).
- Chará, J., Pedraza, G., Conde, N. (1999). The productive water decontamination system: a tool for protecting water resources in the tropics. *Livestock Research for Rural Development* 11 (1). <[www.cipav.org.co/lrrd/lrrd11/cha111.htm](http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd11/cha111.htm)>. Citado por Stephanie Lansing et al. (2010).
- Chen, M. (1983). Adaptation of mesophilic anaerobic sewage fermentor population to thermophilic temperatures. *Applied and Environmental Microbiology* 45 (4), 1271–1276. Citado por René Alvarez (2008).
- Cirne, D.G., Paloumet, X., Björnsson, L., Alves, M.M., Mattiasson, B. (2007). Anaerobic digestion of lipid-rich waste – effects of lipid concentration. *Renewable Energy* 32, 965–975. Citado por Stephanie Lansing et al. (2010).
- El-Mashad, H.M., Zeeman, G., van Loon, W.K.P., Gerard, P.A.B., Lettinga, G. (2004). Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. *Bioresource Technology* 95 (2), 191–201. Citado por René Alvarez (2008).
- Ferrer, I., Gamiz, M., Almeida, M., Ruiz, A., (2009). Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru). *Waste Manag.* 29 (1), 168–173. Citado en Marianna Garfi et al. 2011
- Garfi, M., Ferrer-Martí, L., 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. Citado por Thibault Perrigault et al. (2012).
- Garfi, M., Ferrer-Martí, L., Velo, E., Ferrer, I., (2012). Evaluating benefits of low-cost household digesters for rural Andean communities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* Citado en Marianna Garfi et al. 2011. Citado por Marianna Garfi (2014) 2012;16:575e81.
- Gerardi, M.H. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.
- Archer, D.B., Kirsop, B.H., 1990. The microbiology and control of anaerobic digestion. In: Andrew, W. (Ed.), *Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology*. Critical Reports on Applied Chemistry. Elsevier Applied Science, cop., London, pp. 43–91. Citado por Richard J. et al. (2011).
- Ghaly, A.E. (1996). A comparative study of anaerobic digestion of acid cheese whey and dairy manure in a two-stage reactor. *Bioresource Technology* 58, 61–72. Citado por Stephanie Lansing et al. (2010).
- He, K., Lei, Y., Pan, X., Zhang, Y., Zhang, Q., Chen, D., (2010). Co-benefits from energy policies in China. *Energy* 35 (11), 4265–4272. Citado en Marianna Garfi et al. 2011.

- Jeyaseelan, S., Matsuo, T. (1995). Effects of phase separation anaerobic digestion on difference substrates. *Water Science and Technology* 31 (9), 153–162. Citado por Stephanie Lansing et al. (2010).
- Kishore, V.V.N. (1989). A heat-transfer analysis of fixed-dome biogas plants. *Biological Wastes* 30, 199–215. Citado por Thibault Perrigault et al. (2012).
- Lansing, S., Martin, J.F., Botero, R., Nogueira da Silva, T., Días da Silva, E., (2010<sup>b</sup>). Wastewater transformations and fertilizer value when co-digesting differing ratios of swine manure and used cooking grease in low-cost digesters. *Biomass and Bioenergy* 34 (12), 1711–1720. Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012).
- Lansing, S., Botero, R.B., Martin, J.F. (2008a). Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. *Bioresour. Technol.* 99 (13), 5881–5890. Citado por Richard J. et al. (2011). Citado por Stephanie Lansing et al. (2010).
- Marianna Garfí, Pau Gelman, Jordi Comas, William Carrasco, Ivet Ferrer (2011). Agricultural reuse of the digestate from low-cost tubular digesters in rural Andean communities. *Waste Management* 31 (2011) 2584–2589. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/wasman](http://www.elsevier.com/locate/wasman).
- Marianna Garfí, Erasmo Cadena, Irene Pérez, Ivet Ferrer. (2014). Technical, economic and environmental assessment of household biogas digesters for rural communities. *Renewable Energy* 62 (2014) 313e318. journal homepage: [www.elsevier.com/locate/renene](http://www.elsevier.com/locate/renene)
- Martí-Herrero J. (2007). Transfer of low-cost plastic biogas digester technology at household level in Bolivia. *Livestock Res Rural Dev* 2007;19(12). Article #192. [cited July 2011]. Available from: <http://www.lrrd.org/lrrd19/12/mart19192.htm>. Citado por J. Martí-Herrero (2011). Citado por Thibault Perrigault et al. (2012).
- Martí-Herrero, J. (2008). *Biodigestores Familiares. Guía de diseño y manual de instalación*. La Paz, Bolivia, Cooperación Técnica Alemana-GTZ. ISBN: 978-99954-0-339-3. <http://books.google.es/books?id=TsbrdcmKGGkC>. Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012). Citado por J. Martí-Herrero (2011). Citado por Thibault Perrigault et al. (2012).
- Martí-Herrero y J. Cipriano (2012). Design methodology for low cost tubular digesters. *Bioresource Technology* 108 (2012) 21–27. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/biortech](http://www.elsevier.com/locate/biortech). Citado por Thibault Perrigault et al. (2012).
- Mata-Alvarez, J., Macé, S., Llabrés, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology* 74, 3–16. Citado en René Alvarez y Gunnar Lidén (2008). Citado por René Alvarez (2009).
- Murto M, Björnsson L, Mattiasson B. (2004). Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. *Journal of Environmental Management* 2004;70:101–7. Citado por René Alvarez (2009). Citado en René Alvarez y Gunnar Lidén (2008).
- Pedraza G, Chará J, Conde N, Giraldo S, Goraldo L. Evaluation of polyethylene and PVC tubular biodigesters in the treatment of swine wastewater. *Livest Res Rural Dev* 2002;14 (1), <http://www.lrrd.org/lrrd14/1/Pedr141.htm>. Citado en Ivet Ferrer et al. (2011).
- Poggio, D., Ferrer, I., Batet, Ll. y Velo E. (2009). Adaptación de biodigestores tubulares de plástico a climas fríos. *Livestock Research for Rural Development* 21(9), Article #152. <<http://www.lrrd.org/lrrd21/9/pogg21152.htm>>. Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012).
- Powers, W.J., Van Horn, H.N., Wilkie, A.C., Wilcox, C.J., Nordstedt, R.A. (1999). Effects of anaerobic digestion and additives to effluent or cattle feed on odor and odorant concentrations. *J. Anim. Sci.* 77, 1412–1421. Citado por Richard J. et al. (2011).
- René Alvarez, Gunnar Lidén (2008). The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude. *Bioresource Technology* 99 (2008) 7278–7284. Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- Rodriguez, L., Preston, T.R. (1999). *Biodigester installation manual*. University of Tropical Agriculture Foundation, University of Agriculture and Forestry Thu Duc, Ho Chi Minh City, Vietnam. <<http://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/Recycle/biodig/manual.htm>> (cited September 2011). Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012).
- Safley LM, Westerman PW. (1990). Psychrophilic anaerobic digestion of animal manure: proposed design methodology. *Biological Wastes* 1990;34:133–48. Citado por René Alvarez (2009).
- Sarwatt, S.V., Lekule, F.P., Preston, T.R. (1995). *On-Farm Work with Low Cost Tubular Plastic Biodigesters for*

- Resource-poor Farmers in Tanzania. In: Dolberg, F., Petersen, P.H. (Eds.). "Agricultural science for biodiversity and sustainability in developing countries: proceedings of a workshop. 1995 April 3–7; Tune Landboskole, Denmark, pp. 199–205. Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012).
- Singh, D., Singh, K.K., Bansal, N.K. (1985). Heat loss reduction from the gas holder fixed gas dome of a community-size biogas plant. *Energy Research* 9, 417–430.
- Kishore, V.V.N., 1989. A heat-transfer analysis of fixed-dome biogas plants. *Biological Wastes* 30, 199–215. Citado por Thibault Perrigault et al. (2012).
- Tafdrup, S., (1995). Viable energy production and waste recycling from anaerobic digestion of manure and other biomass materials. *Biomass and Bioenergy* 9, 303–314. Citado en René Alvarez y Gunnar Lidén (2008).
- Ugoji, E.O. (1997). Anaerobic digestion of palm mill effluent and its utilization as fertilizer for environmental protection. *Renewable Energy* 10 (2/3), 291–294. Citado por Stephanie Lansing et al. (2010).
- USEPA (2004). In: Roos, K.F., Martin, Jr., J.H., Moser, M.A. (Eds.), *AgSTAR Handbook: A manual for Developing Biogas Systems at Commercial Farms in the United States*. 2nd ed., EPA 430-B0-97-015. Citado por Richard J. et al. (2011).
- Visser, A., Khan, H.R., (1996). When smoke gets in your eyes: kitchen air quality in rural Bangladeshi homes. *Energy sustain. Development* 3 (4), 52–57. Citado en Marianna Garfi et al. 2011.