

A. DATOS GENERALES DEL ESTUDIO

1. Título: DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR TUBULAR A BASE DE EXCRETAS DE ALPACA A UNA ALTURA DE 4200 msnm.
2. Código del estudio: 151701031
3. Facultad: Ingeniería Industrial
4. Programa y línea de investigación:
5. Instituto: Ingeniería Industrial
6. Miembros del equipo de investigación

Responsable: Rojas Lazo Oswaldo José (060917)

Miembros: Mavila Hinojoza Daniel (042331) – Recolección información
Lavado Soto Mooner Aurelio (03701A) – Análisis de la información

Colaboradores: Ponce Benites Wiler Arturo (054461) – Contactos distrito de Masma
Jaramillo Urquiaga Luis (10170048) – Instalación equipos
Rojas Carmona Doris (13170127) – Información de campo
Tacuchi Perea David (13170221) – Información de campo
Aponte Hurtado Rosa (14170242) – Información de campo
Bobadilla Pumacayo Peter (13170149) - Instalación equipos
Atencio Guerrero Cesar (12170002) - Instalación equipos
Ayala Alfaro Diana (12170003) - Información de campo
Rojas Rojas Jorge (Prof. Contratado) - Información de campo

B. CONTENIDO DEL INFORME EN EXTENSO

1. Resumen

El proyecto “Diseño y construcción de un biodigestor tubular a base de excretas de alpaca a una altura de 4212 msnm”, se desarrolló en la puna del Distrito de Masma, Provincia de Jauja, Región Junín. El 23 de julio se instaló y cargó el reactor de policloruro de vinilo de 6m³ con un invernadero totalmente cubierto en cuya base se colocó un colchón de ichu, paredes de piedra y barro, techo con polietileno y cubierto con calaminas. Se utilizó un caldo de bacterias de ganado vacuno. Se estima un periodo de retención hidráulica de 70 días. El 05 de octubre un ventarrón se llevó el techo del invernadero. El 09 de octubre se terminó de instalar el gasómetro y los accesorios de control, se instaló un calentador solar de agua, y en el ducto interno se notó olor a metano. El 21 de diciembre se visitó el invernadero no estaba totalmente cubierto y el gasómetro estaba en un 5% inflado.

2. Palabras Clave

Biodigestor tubular en la puna del Perú, Tratamiento de excretas de ganado, Biogas, Bioabono.

3. Introducción – objetivos

Los biodigestores o digestor orgánico es un tipo de bioreactor dentro del cual se realiza un proceso de digestión anaeróbica permitiendo la transformación de la materia orgánica en biogas (biol) 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, se encuentra 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 1.30 horas por un camino de herradura empinado y abriendo camino sobre el pasto natural (se contó con la colaboración de la comunidad y la municipalidad al facilitarnos su camioneta, el costo por viaje fue de S/. 100 soles).

Los beneficiarios son: la señora Mercedes De La Cruz Chamorro y el señor Rigoberto Granados Bueno. En una charla dictada en la Municipalidad de Masma en el año 2014, la señora Mercedes se inscribió en la lista de interesados en que se instalara un biodigestor. Ellos se dedican al pastoreo de sus animales (alrededor de 50 alpacas, 100 ovejas, 2 vacas y un burro).

El lugar donde se realiza el proyecto es un lugar donde solo crecen pastos naturales, siendo el ichu el único vegetal grande. La fauna del lugar son auquénidos (llama y alpaca), ganado vacuno, muy poco ganado ovino, animales silvestres como aves y zorros.

Las viviendas se ubican cerca de manantiales y sus viviendas son chozas de paredes de piedra y barro, los techos son de icho, el vecino más cercano se encuentra a 30 minutos de camino a pie. Los beneficiarios viven en 4 chozas, 02 son dormitorios, 01 cocina y el otro almacén. La comunicación vía telefonía móvil es deficiente, solo entra llamadas en determinados lugares y según las condiciones ambientales.

En similares condiciones se encuentran muchas familias que viven con las mínimas comodidades.

La hipótesis ¿es posible hacer funcionar adecuadamente un biodigestor con excretas de alpaca a una altura de 4 200 msnm, no se pudo demostrar la hipótesis debido a la deficiencia del invernadero (el 06 de octubre un fuerte ventarrón se llevó el techo del invernadero), 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.

El objetivo general del proyecto fue hacer funcionar un biodigestor tubular a base de una co-digestión de excretas de alpacas y ganado vacuno a una altura de 4 200 msnm.

Los objetivos específicos:

- Selección de materiales apropiados para trabajar con las temperaturas de la puna. Se seleccionaron en base a la experiencia de expertos.
- Evaluar las condiciones topográficas, ambientales y sociales del lugar donde se instalará el biodigestor. Se determinó el emplazamiento del biodigestor en función a la topografía del lugar y las necesidades de la familia que vive en el lugar.
- Evaluar el rendimiento de las excretas de las alpacas, respecto a la producción del biogás.
- Evaluar la co-digestión de las excretas de alpacas, ganado vacuno y ovino.
- Diseñar el invernadero apropiado.
- Determinar la forma de carga inicial del reactor con bacterias aclimatadas.
- Evaluar el funcionamiento del biodigestor a 4200 msnm.

4. Metodología y técnicas e investigación utilizadas

El estudio fue una investigación básica aplicada.

La recolección de la información documentada fue a través de internet en especial de la base Sciencedirect.

Se visitó e inspeccionó a los biodigestores instalados en el Valle del Mantaro. Se entrevistó a los beneficiarios.

Se tomó como referencia de instalación el biodigestor instalado en la zona urbana del distrito de Masma (3 650 msnm).

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.

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

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

Para la aplicación de las excretas se aplicará la co-digestión de los ganados vacuno, ovino y alpacas.

5. Exposición estructurada

5.1 Principios teóricos

Digestión anaeróbica

La creación de energía renovable a partir de productos de desecho a través de los resultados de digestión anaerobia en 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).

La digestión anaeróbica, también conocida como la biometanización, es una tecnología apropiada para mejorar el uso de la energía tradicional de recursos de biomasa, especialmente en las zonas rurales de los países en desarrollo; trayendo beneficios ambientales, económicos y sociales. Velo et al. (2006).

La digestión anaeróbica es una reconocida tecnología sostenible que contribuye a una gestión integrada de estiércol en la agricultura. En los digestores anaeróbicos los residuos orgánicos se transforman en biocombustibles (biogas), mientras que el resultado efluente (digestato) pueden ser reutilizados en la agricultura como biofertilizantes o acondicionador de suelo (Ferrer et al. 2009).

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 (Thy et al., 2003; Lansing et al., 2008).

Biodigestores

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

Lansing et al. (2010a), informó de un estudio en el que una pequeña cantidad de grasa de cocina usada (2,5% en volumen) al añadir al estiércol de cerdo la producción de CH₄ aumento, lo que demuestra una buena oportunidad para que estos digestores puedan mejorar su rendimiento. (Lansing et al., 2010b).

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 común 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). Beneficios de la utilización de la digestión anaerobia incluyen la producción de energía renovable y un fertilizante líquido, así como una reducción del 50-90% de los contaminantes orgánicos (Archer y Kirsop, 1990; Lansing et al., 2008a). La utilización del biogás metano enriquecida también reduce la cantidad de este gas de efecto invernadero (21 veces el potencial de calentamiento más global que el dióxido de carbono) que se libera en el medio ambiente frente a los sistemas tradicionales de manejo del estiércol. 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 taiwanés-modelo, que son sistemas de flujo de pistón construidos con polietileno tubular o geomembrana y no se calientan, mezclado, o contiene 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).

Digestores de bajo coste se caracterizan por la ausencia de dispositivos de mezcla activos y/o sistemas de calefacción activos. Como consecuencia no necesitan una supervisión sofisticada. Están hechas de materiales disponibles localmente, bolsas de plástico por lo general para el tanque principal y tubos de PVC para transportar el biogás. Esta tecnología funciona, con una adaptación adecuada, en los climas tropicales, continentales y calientes. (J. Martí-Herrero. 2011).

Generalmente un digestor tubular de bajo costo está dimensionado utilizando el volumen cilíndrico formado por el plástico tubular. Este volumen se separa en dos fases líquidas y de gas. Dependiendo del autor del volumen de líquido se reporta como el 80% del volumen total cilíndrica [8-12] o el 75% (Botero RB. 1987, Martí-Herrero J. 2008, Aguilar FX. 2001).

La fermentación anaerobia de estiércol para la producción de biogás no reduce su valor como un suplemento de fertilizantes, como disponibles nitrógeno y otras sustancias permanecen en el lodo tratado (Robertson et al., 1975).

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).

Estos estudios muestran que una disminución en la temperatura generalmente causa una menor eficiencia de la demanda química de oxígeno (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).

Biodigestores tubulares en los Andes

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; GARFI et al. 2011); Pero las propiedades digestato para la aplicación a la tierra están aún por determinar.

Martí-Herrero, en el altiplano de Bolivia en 2003, adaptó el diseño de Botero a los climas fríos con la adición de un invernadero con una elevada masa térmica, el material

de aislamiento y el aumento del tamaño del digestor (Martí-Herrero J. 2007, Martí-Herrero J. 2008).

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 (IN, 2008) 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).

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⁻² día⁻¹. 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 HRTs de 60 y 90 días, con una tasa de carga orgánica (OLR) por debajo $0,75 \text{ kg}_{\text{VS}}\text{m}^{-3} \text{ día}^{-1}$. Ferrer propone investigar la HRT menos de 60 días y OLR por encima de $1 \text{ kg}_{\text{VS}}\text{m}^{-3} \text{ días}^{-1}$ 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) informaron de los resultados de la evaluación de los efectos de la presión (495 y 760 mm Hg), temperatura (11 y 35°C), la HRT (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, ya que no hay dispositivos de calentamiento activo en digestores de bajo coste (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 carga orgánica del digestor (OLR) se reduce adecuadamente mediante la ampliación del tiempo de retención hidráulica (Safley LM. 1990).

El altiplano, a una elevación desde 3000 a 4000 msnm, abarca una superficie de más de 600 000 km², 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/(m² día). El grupo más importante de los animales domésticos son llamas, vacas y ovejas (Álvarez y Liden, 2008, René Álvarez. 2009).

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 tiempo de retención hidráulica más largo (TRH) en comparación con los análogos digestores implementados en los trópicos, donde fueron desarrollados originalmente. 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).

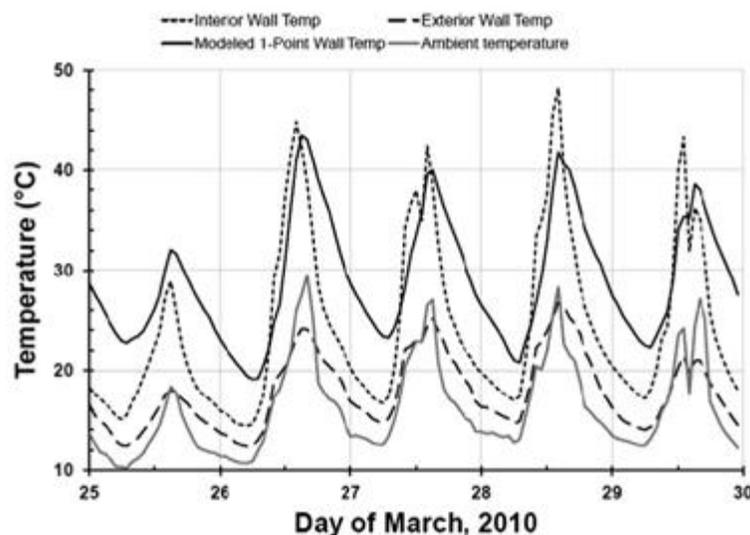
Debido a las condiciones de clima frío del altiplano, la rentabilidad de la producción de biogás depende del mantenimiento de una temperatura de la suspensión del digestor superior a la temperatura ambiente promedio. Este efecto de las fluctuaciones diarias de temperatura en el proceso de digestión anaerobia 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).

Un nuevo concepto de un PTD integrada de efecto invernadero bajo costo fue desarrollado específicamente para las condiciones climáticas del altiplano (Martí-Herrero, 2007, 2008, 2012; Poggio, 2007). 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. Los informes preliminares sobre la aplicación de esta tecnología pone de relieve el impacto sobre la tasa de producción de biogás debido a la temperatura de funcionamiento (Poggio et al., 2009), el diseño geométrico del digestor (Martí-Herrero, 2011, 2012) y su velocidad de carga orgánica (Ferrer et al. 2011).

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).

Otros informes tratan de los sistemas de reactores anaeróbicos solares activos. (Axaopoulos et al. 2001) investigaron 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 msnm. 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.

Gráfico 1. Variación de las temperaturas en un invernadero de un biodigestor



Fuente: Thibault Perrigault et al. (2012).

La temperatura del aire de efecto invernadero tenía la mayor amplitud diaria medida: hasta 48 °C, con temperaturas que alcanzaron máximas de hasta 60° C. Durante la noche, la temperatura del aire de efecto invernadero cayó a valores inferiores a las superficies de pared interiores, pero todavía mayor que la temperatura ambiente. Esto significa que el aire dentro del invernadero pierde energía a la cubierta de invernadero,

por convección. La cubierta, a su vez, pierde calor por radiación hacia el cielo nocturno claro y por convección al aire de la noche, pero las ganancias de calor de la pared. GARFI et al. (2011) informan de las temperaturas en el interior de un invernadero digestor (con condiciones similares a las del presente estudio) entre 15 a 60°C, también constantemente por encima de la temperatura ambiente.

El espesor de la paja fue de 20 cm a lo largo de la parte inferior de la zanja y 10 cm a lo largo de los lados. Los valores calibrados corresponden a 50% de los que se puede suponer que la compactación de la paja una vez que el digestor está lleno de líquido.

Teniendo en cuenta las condiciones ambientales muy similares y actuaciones de efecto invernadero, la diferencia en el aumento de la temperatura de la suspensión sobre la temperatura ambiente durante el período de referencia (8,4° C para el presente trabajo, y 2,1°C durante GARFI et al., 2011) sólo pueden ser explicados por el aislamiento de paja. Como se ha mencionado antes, la cantidad de aislamiento afecta temperatura de la suspensión que, naturalmente, tiene muy poca amplitud media diaria debido a su gran inercia térmica. No hay información sobre el uso de aislamiento en GARFI et al. (2011) o Ferrer et al. (2011), lo que sugiere que se ha de utilizar ninguno.

Por lo tanto, 5-10 cm de aislamiento de paja se compacta en la zanja puede aumentar la temperatura de la suspensión por encima de la temperatura ambiente media.

Además, la conclusión de Garfield et al. sobre el efecto "dudoso" del invernadero en la temperatura de proceso puede ser al menos parcialmente desacreditada por los datos experimentales de este estudio que muestra la temperatura elevada de la superficie interna de la pared durante las noches, lo que indica que el efecto invernadero protege la parte superior del digestor de las bajas temperaturas nocturnas, lo que reduce la pérdida de calor y mantener caliente la suspensión.

El digestor tubular de bajo coste ha sido adaptado a los climas fríos, la adición de un invernadero con enormes muros de adobe, y el aislamiento de la paja en la zanja. Este diseño actúa como un colector de calor solar con una masa térmica. Gana calor a través de la cubierta y, la acumulación en las paredes y en suspensión, reduce las pérdidas de calor en el suelo con aislamiento de paja y al ambiente debido al efecto invernadero. Éstos dan lugar a mantener la suspensión de 8,4°C por encima de la temperatura ambiente media. Este comportamiento térmico se puede simular un modelo de transferencia de calor unidimensional uno con un error estándar de 0,47°C para la temperatura de la suspensión (Thibault Perrigault et al. 2012).

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), varios residuos sólidos municipales (Ahring et al, 1992; De Baere, 2000), y varios otros residuos orgánicos específicos (Kaparaju y Rintala, 2005; Mshandete et al. 2004; Rosenwinkel y Meyer, 1999) se está convirtiendo en una técnica atractiva para la producción de energía en forma de biogás. También produce un lodo que es rico en nutrientes y que a menudo es utilizable como fertilizante después de compostaje u otro tratamiento.

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). Sin embargo, los resultados negativos se han obtenido debido a las características específicas de los residuos co-digerido (Murto et al., 2004, Banks y Humphrey, 1998). Co-digestión en condiciones mesófilas y termófilas han sido objeto de estudio y de comparaciones (Salminen y Rintala, 1999; Kaparaju y Rintala, 2005). Sin embargo, existe escasa información sobre co-digestión a bajas temperaturas.

La temperatura y el tipo de materia prima son dos de los 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 (depende de la composición del material de desecho). Co-digestión, es decir, la digestión simultánea de una mezcla de dos o más sustratos, es una técnica mediante la cual la tasa de bioconversión, así como el rendimiento de metano se pueden aumentar. Los beneficios del proceso de co-digestión de efectos tales como un equilibrio de nutrientes mejorada, disminución del efecto de compuestos tóxicos en el proceso de digestión, o mejoran las cualidades reológicas del sustrato (Ahring BK. 1992, Mata-Alvarez. 2000, Murto M. 2004).

Una digestión anaerobia mejorada se observó como resultado de la mezcla de los abonos, se encontró un llamado efecto de co-digestión. Llama-ovejas 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 [30], 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 (Alvarez R. 2006).

Los resultados del presente estudio apoyan que el estiércol de llama es una posible materia prima para la digestión anaerobia en el altiplano de Bolivia [29], y se mejora la productividad mediante la mezcla con la vaca y/o estiércol de oveja.

Todos los experimentos de digestión de estiércol de llama-vaca-ovejas demostraron que el sistema es fiable, con suficiente capacidad de amortiguación para ser utilizado en el altiplano sin riesgo de inestabilidades como resultado de la mezcla de estos abonos. Aspectos que merecen más estudios son las condiciones ambientales especiales en el altiplano, con grandes fluctuaciones de temperatura entre la noche y el día (René Álvarez. 2009).

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; Murto et al, 2004; Gelegenis et al., 2007). 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.

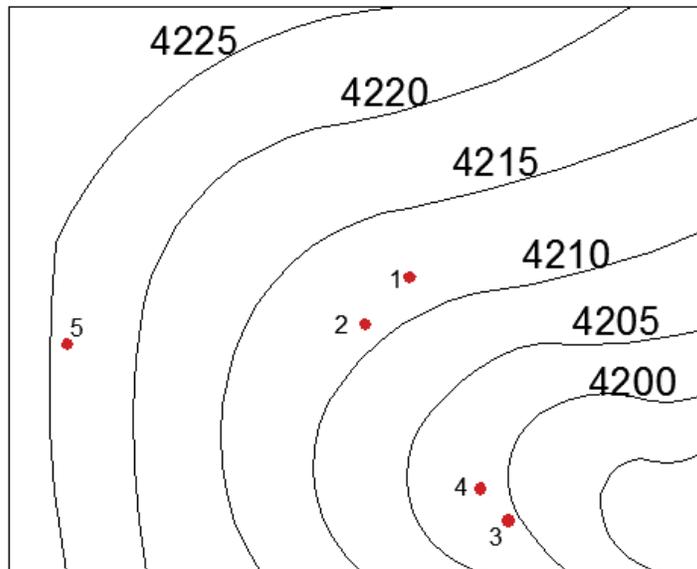
La investigación demostró que la co-digestión de la grasa de cocina se utiliza con estiércol de cerdo en los digestores de bajo costo es una forma sencilla de duplicar la producción de energía. Para grasa mayores que 2,5% ocasiona una disminución en el rendimiento específico de CH₄, y una disminución en el pH del medio de digestión (Stephanie Lansing et al. 2010).

Una mezcla de estiércol de llama, vaca y oveja ha demostrado ser una materia prima adecuada para la producción de biogás en el altiplano boliviano. Un contenido de metano en el biogás de 55% y una tasa de producción de biogás volumétrica entre 0,2 y 0,3 L d⁻¹ L⁻¹ se obtuvieron a un HRT de 30 días para las condiciones investigadas. 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.

5.2 Emplazamiento del biodigestor

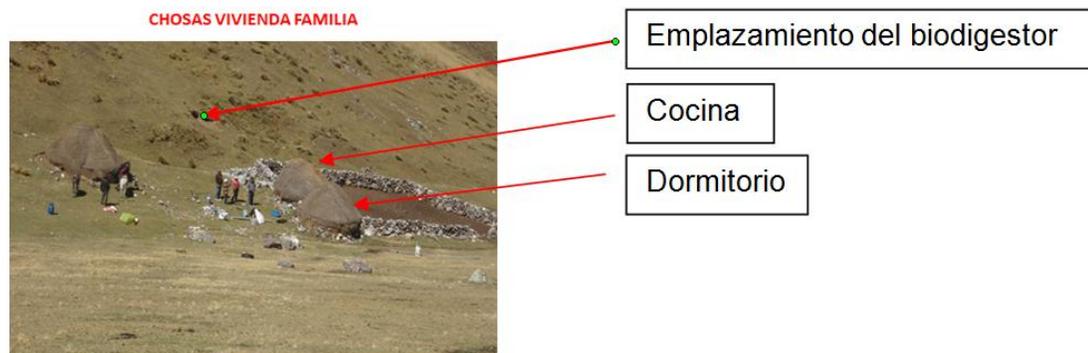
La vivienda de la beneficiaria se encuentra en una quebrada, la ubicación del biodigestor debe estar cerca de la cocina, por lo que el emplazamiento será paralelo al cerro (ver croquis de la ubicación).

Gráfico 2. 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

Gráfico 3. Fotografía del emplazamiento del biodigestor



En el Cuadro 1, se presenta el calendario de actividades que se desarrolló en el lugar del emplazamiento del biodigestor y las actividades principales que se realizaron.

Cuadro 1. 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	<p>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.</p> <p>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.</p> <p>La beneficiaria informó que el 06 de octubre un fuerte ventarrón se llevó el techo del invernadero.</p> <p>No se encontraba presente el operador del biodigestor puesto que había sido trasladado de emergencia por motivos de salud a la ciudad de Huancayo.</p>
21/12/2015	Inspección del invernadero no estaba totalmente cubierto y el gasómetro estaba en un 5% inflado.

5.3 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 m³ y el gasómetro 2 m³.
- En el Gráfico 2, 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:
 - Primero toda la superficie se recubrió con plástico de gigantografía reusada.
 - Encima de la gigantografía en la base de la zanja se colocó ichu en forma cruzada en tres capas con una altura total de 15 cm.
 - Sobre el ichu y cubriendo toda la zanja se colocó planchas de tecnopor de 2" de espesor.
 - 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 (truncos 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.

Gráfico 4. Corte transversal de la zanja donde irá el reactor del biodigestor

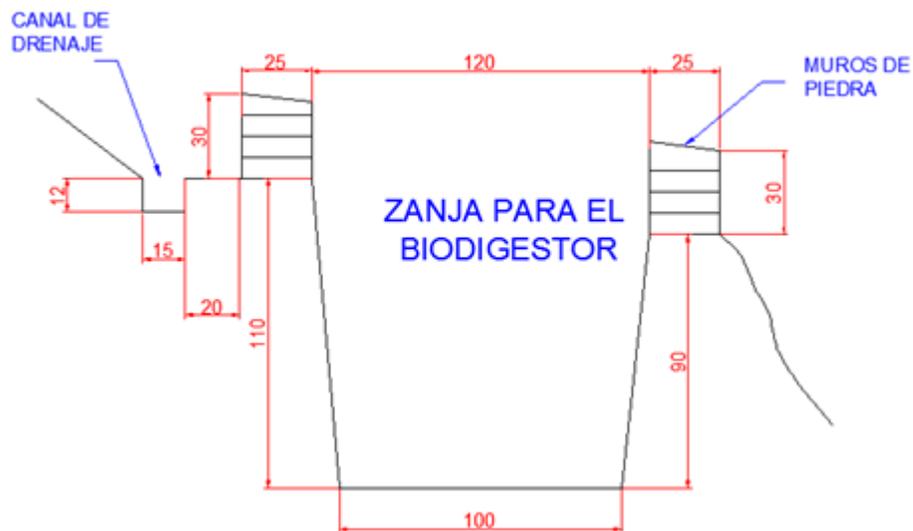
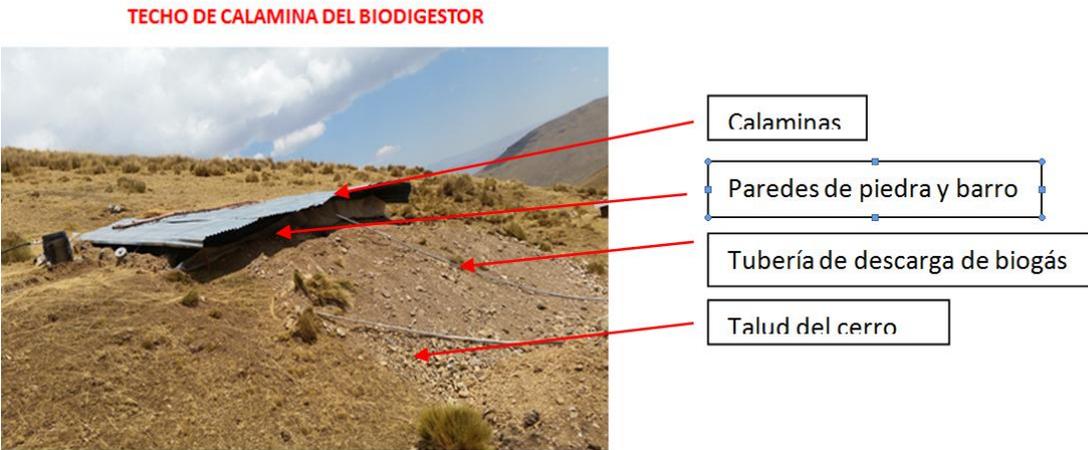


Gráfico 5. Base del invernadero



Gráfico 6. Techo del biodigestor



El techo del invernadero está conformado por

- Cubierta de plástico de gigantografía (se coloca por las noches).
- Cubiertas con planchas galvanizadas
- Cubierta con polietileno grueso #12
- Cubierta con plástico para invernadero
- Vigas de madera

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.



En el Cuadro 2, 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.

	Biodigestor rural urbana	Biodigestor puna
INFORMACIÓN GENERAL		
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 ³	6 m ³
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°C	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	Acequia	Manantial

tomado de		
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

6. Interpretación de datos

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

Resultados finales

Se ha construido el biodigestor de pvc a 4 212 msnm.

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.

7. 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.
- La continuidad del proyecto depende de la posibilidad económica y la salud de los beneficiarios.

- Se debería instalar paneles solares para iluminación y carga de cámaras fotográficas.
- Si el biodigestor funciona, podría ser una solución para mejorar la calidad de vida de las personas que viven sobre los 4 000 msnm.

8. 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 3600 msnm tuvieron dificultades a la altura de 4200 msnm.
- Debido al frío del lugar por las noches es conveniente llevar una carpa de campaña o construir un cuarto con el aislamiento apropiado.
-

9. 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. 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 Alvarez (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).

Archer, D.B., Kirsop, B.H. (1990). The microbiology and control of anaerobic digestion. In: Andrew Wheatley (Ed.), *Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology*. Critical Reports on Applied Chemistry 31, 43–91. Citado por Stephanie Lansing et al. (2010).

Axaopoulos, P., Panagakis, 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).

Banks, C.J., Humphrey, P.N. (1998). The anaerobic treatment of a lignocellulosic substrate offering little natural pH buffering capacity. *Water Science and Technology* 38 (4–5), 29–35. Citado en René Alvarez y Gunnar Lidén (2008).

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>. 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., van Loon, W.K.P., Zeeman, G., Bot, G.P.A., Lettinga, G. (2004). Design of a solar thermophilic anaerobic reactor for small farms. *Biosystems Engineering* 87, 345–353. Citado por Thibault Perrigault et al. (2012).

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 Garfí et al. 2011

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 Bioenergy* 35 (5), 1668–1674. Citado en Marianna Garfí et al. 2011. Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012) 1166–1674. Citado por Thibault Perrigault et al. (2012).

Garfí, 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).

Garfí, 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 Garfí et al. 2011. Citado por Marianna Garfí (2014) [2012;16:575e81](#).

Gelegenis, J., Georgakakis, D., Angelidaki, I., Christopoulou, N., Goumenaki, M., (2007). Optimization of biogas production from olive-oil mill wastewater, by codigesting with diluted poultry-manure. *Applied Energy* 84, 646–663. Citado por Stephanie Lansing et al. (2010).

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 Garfí et al. 2011.

Ivet Ferrer, Marianna Garfí, Enrica Uggetti, Laia Ferrer-Martí, Arcadio Calderon, Enric Velo (2011). Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *biomass and bioenergy* 35 (2011) 1668 a 1674
<http://www.elsevier.com/locate/biombioe>

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).

Kaparaju, P., Rintala, J. (2005). Anaerobic co-digestion of potato tuber and its industrial by-products with pig manure. *Resources Conservation and Recycling* 43, 175–188. Citado en René Alvarez y Gunnar Lidén (2008).

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., Dias da Silva, E., (2010^a). Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. *Bioresource Technology*; 101 (12), 4362–4370. Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012). Citado por Richard J. et al. (2011).

Lansing, S., Martin, J.F., Botero, R., Nogueira da Silva, T., Dias da Silva, E., (2010^b). 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.

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

Martí-Herrero J. (2007). Transfer of low-cost plastic biodigester 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=TsbrdcmKGKoC>. Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012). Citado por J. Martí-Herrero (2011). Citado por Thibault Perrigault et al. (2012).

Martí-Herrero, J. (2011). Reduced hydraulic retention times in low-cost tubular digesters: two issues. *Biomass and Bioenergy* 35 (10), 4481–4484. <http://www.elsevier.com/locate/biombioe>. Citado en J. Martí-Herrero y J. Cipriano (2012). 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. 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).

Mladenovska, Z., Dabrowski, S., Ahring, B.K. (2003). Anaerobic digestion of manure and mixture of manure with lipids: biogas reactor performance and microbial community analysis. *Water Science and Technology* 48 (6), 271–278. Citado por Stephanie Lansing et al. (2010).

Mshandete, A., Kivaise, A., Rubindamayugi, M., Mattiasson, B. (2004). Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish wastes. *Bioresource Technology* 95, 19–24. Citado en René Alvarez y Gunnar Lidén (2008).

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). Anaerobic co-digestion of aquatic flora and quinoa with manures from Bolivian Altiplano. *Waste Management* 28 (2008) 1933–1940. www.elsevier.com/locate/wasman.

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.

René Alvarez, Gunnar Lidén (2009). Low temperature anaerobic digestion of mixtures of llama, cow and sheep manure for improved methane production. *biomass and bioenergy* 33 (2009) 527 – 533. <http://www.elsevier.com/locate/biombioe>

Richard J. Ciotolaa, Stephanie Lansingb, Jay F. Martina (2011). Emergy analysis of biogas production and electricity generation from small-scale agricultural digesters. *Ecological Engineering* 37 (2011) 1681– 1691. journal home page: www.elsevier.com/locate/ecoleng.

Robertson, A.M., Burnett, G.A., Hobson, P.N., Bousfield, S., Summers, S. (1975). Bioengineering aspects of anaerobic digestion of piggery wastes. In: *Third International Symposium on Livestock Waste*, 21–24. Citado por René Alvarez (2008).

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).

Rosenwinkel, KH., Meyer, H. (1999). Anaerobic treatment of slaughterhouse residues in municipal digesters. *Water Science and Technology* 40 (1), 101–111. Citado en René Alvarez y Gunnar Lidén (2008).

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).

Salminen, E.A., Rintala, J.A. (1999). Anaerobic digestion of poultry slaughtering wastes. *Environmental Technology* 20, 21–28. Citado en René Alvarez y Gunnar Lidén (2008).

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).

Stephanie Lansing, Jay F. Martin, Raúl Botero Botero, Tatiana Nogueira da Silva c, Ederson Dias da Silva (2010). Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. *Bioresource Technology* 101 (2010) 4362–4370.
journal homepage: www.elsevier.com/locate/biortech

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).

Thibault Perrigault, Vergil Weatherford, Jaime Martí-Herrero, Davide Poggio (2012). Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates A heat transfer model. *Bioresource Technology* 124 (2012) 259–268. journal homepage: www.elsevier.com/locate/biortech

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).

Velo E, Sneij J, Delclós J, editors. (2006). *Energía, participación y sostenibilidad. Tecnología para el desarrollo humano*. Barcelona: Ingeniería Sin Fronteras - ISF. p. 131-144, <http://grecdh.upc.edu/publicacions/lilibres/documents/eps.pdf>. Citado en Ivet Ferrer 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 Garfí et al. 2011.

10. Anexos

Galería de fotos

CARGA DE CAMIONETA CON INSUMOS – PARTIDA A LA ESTANCIA



CARGA DE CAMIONETA CON INSUMOS – PARTIDA A LA ESTANCIA



VISTA DEL DISTRITO DE MASMA DESDE LA CUMBRE



CAMINO CARROSABLE A LA PUNA



CHOSAS VIVIENDA FAMILIA



POBLADORA DE LA ESTANCIA



DORMITORIO DE LA CHOSA



MANANTIAL POR LAS MAÑANAS CONGELADO (AGOSTO 2015)



DEFINIENDO UBICACIÓN DEL BIODIGESTOR



ESCARBANDO LA ZANJA PARA EL INVERNADERO



AL ESCARBAR LA ZANJA SE ENCONTRÓ ROCA



CONSTRUCCIÓN DE MURO DE PIEDRA Y BARRO



ZANJA PARA EL REACTOR DEL BIODIGESTOR



ICHU EN LOS ALREDEDORES DEL BIODIGESTOR



PREPARANDO LA BASE DE ICHU PARA EL REACTOR



INFLANDO EL REACTOR PARA PROBAR POSIBLES FUGAS



REACTOR INSTALADO



PREPARANDO CUBIERTA DEL TECHO DEL BIODIGESTOR



TECHO DE CALAMINA DEL BIODIGESTOR



INSTALACIÓN DEL CALENTADOR SOLAR



COMPONENTES DEL CALENTADOR SOLAR



INVERNADERO CERCA AL PUQUIAL



ALMACIGO DE QUINUAL DENTRO DE INVERNADERO



INSTALACIÓN DEL PANEL SOLAR EN LA CHOSA PARA CARGAR BATERIA DE CELULAR



INSTALACIÓN DEL BLOCK DE VIDRIO PARA LA ILUMINACIÓN DE LA CHOSA



DENTRO DE LA CHOSA ILUMINACIÓN CON EL BLOCK DE VIDRIO

