

Miguel Á. Barrena | Jorge L. Maicelo | Oscar A. Gamarra | Manuel Oliva
Santos T. Leiva | Luis A. Taramona | Milton A. Huanes | Carla M. Ordinola

BIOGÁS: PRODUCCIÓN Y APLICACIONES



Dr. Miguel Á. Barrena

Ingeniero Químico, Maestro en Ciencias con mención en Microbiología Industrial y Biotecnología, Doctor en Ciencias e Ingeniería. Profesor Principal a Dedicación Exclusiva de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), donde ha sido Responsable de la Carrera de Ingeniería Agroindustrial, Vicerrector Académico, Vicerrector Administrativo, Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Decano de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Actualmente es Vicerrector Académico de la UNTRM. Ejerció la docencia universitaria durante 17 años en la Universidad Privada Antenor

Orrego de Trujillo (UPAO) y cuatro años en la Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional de Trujillo. Ha dictado cursos de maestría en las Universidades UNTRM y Agraria de la Selva; de doctorado en las Universidades Nacionales de Tumbes, Huaraz y UNTRM. Ha sido Presidente de la Comisión Organizadora de la Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma, Región Junín. Tiene publicados artículos científicos en el área de ingeniería y de energías renovables. Ha realizado ponencias y conferencias en eventos académicos nacionales e internacionales. Hizo pasantías de especialización en energías renovables en Colombia (2008), Cuba (2010), Brasil (2012 y 2018) y Alemania (2013).



Ph. D. Jorge L. Maicelo

Ph.D. en Agricultura Sustentable, Profesor Principal de la Facultad de Ingeniería Zootecnista, Agronegocios y Biotecnología de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Ha desempeñado cargos en la Universidad pública como Rector, Director de Escuela de Posgrado, Decano, Docente de Posgrado en maestría y doctorado. Ha sido Presidente del Consejo Directivo del Instituto de Investigación en Ganadería y Biotecnología (IGBI), Director del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES); asimismo, ha liderado programas, proyectos y círculos de investigación, con fondos nacionales e internacionales. Es asesor de tesis de maestría y doctorado, Docente Investigador con registro del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-RENACYT-CONCYTEC. "Carlos Monge".

fondos nacionales e internacionales. Es asesor de tesis de maestría y doctorado, Docente Investigador con registro del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-RENACYT-CONCYTEC. "Carlos Monge".



Dr. Oscar A. Gamarra

Biólogo - Universidad Nacional de Trujillo. Maestro en Ecología y Gestión Ambiental - Universidad Ricardo Palma. Doctor en Ciencias Biológicas - Universidad Nacional de Trujillo. Actualmente es Profesor Principal a Tiempo Completo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM). Past docente de la Universidad Nacional de Ancash Santiago Antunez de Mayolo y de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Coordinador de Proyectos e Investigador del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES). Entre las funciones directivas en la UNTRM, se

mencionan: Decano de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Director de la Escuela de Postgrado. Past Vicerrector Académico. Past Director de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental. Autor de diversos libros y artículos científicos en revistas indizadas. Miembro del Comité Editorial y Comité Revisor de Revistas Científicas. Participación como Ponente o Expositor en certámenes científicos, tecnológicos y humanístico en el ámbito nacional e internacional.



M. Sc. Manuel Oliva

Ingeniero Agrónomo, con Maestría en Innovación Agraria para el Desarrollo Rural, Candidato a Doctor en Ciencias para el Desarrollo Sustentable, Docente de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza y actualmente Director Ejecutivo del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES CES). Especialista en diseño, formulación y ejecución de proyectos I+D+I y proyectos bajo el Sistema Nacional de Inversión Pública. Especialista en gestión de sistemas sostenibles de producción.



Miguel Á. Barrena | Jorge L. Maicelo | Oscar A. Gamarra | Manuel Oliva
Santos T. Leiva | Luis A. Taramona | Milton A. Huanes | Carla M. Ordinola

BIOGÁS: PRODUCCIÓN Y APLICACIONES



PROCICEA
PROYECTO DE CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN CLIMATOLOGÍA Y ENERGIAS SOSTENIBLES

Biogás: producción y aplicaciones

Miguel Á. Barrena, Jorge L. Maicelo, Oscar A. Gamarra, Manuel Oliva, Santos T. Leiva, Luis A. Taramona, Milton A. Huanes, Carla M. Ordinola.

E-mail del autor de correspondencia: miguel.barrena@untrm.edu.pe
Teléfono: (+51) 996 819 584

Primera edición electrónico - Octubre de 2019

Libro electrónico disponible en : www.untrm.edu.pe / www.indes-ces.edu.pe
ISBN: 978-612-47087-9-4
INDECOPI - Derecho de Autor: Partida Registral N° 01386-2019

Todas las imágenes de la obra son autoría de Miguel Ángel Barrena, excepto la imagen de la página 38 y 57, cortesía de CIDELSA.

Copyright © 2019: UNTRM FONDO EDITORIAL en la presente edición.

Edita:
Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM)
Fondo Editorial
Campus Universitario: Calle Higos Urco N° 342-350-356
Chachapoyas - Amazonas, Perú

Referencia sugerida:
Barrena, M. A., Maicelo, J.L., Gamarra, O.A., Oliva, M., Leiva, S.T, Taramona, L.A, Huanes, M.A, Ordinola, C.M.. (2019). *Biogás: producción y aplicaciones*. Chachapoyas, Perú: UNTRM

Cualquiera de las opiniones expresadas en el presente libro son de responsabilidad de los autores, y no reflejan necesariamente las de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.

Derechos Reservados. Prohibida la reproducción total o parcial de esta publicación por cualquier sistema conocido sin la autorización escrita del autor, UNTRM en la presente edición.

DISTRIBUCIÓN GRATUITA - PROHIBIDA SU VENTA

Diagramación por Jesús Rascón Barrios (jesus.rascon@untrm.edu.pe)

BIOGÁS: PRODUCCIÓN Y APLICACIONES

Miguel Á. Barrena

Jorge L. Maicelo

Oscar A. Gamarra

Manuel Oliva

Santos T. Leiva

Luis A. Taramona

Milton A. Huanes

Carla M. Ordinola

Dedicatoria

A mi familia, desde la raíz más profunda hasta el fruto más tierno
Miguel A. Barrena

*Con razón de mi existencia para Santiago, Jorge Luis y Yecenia; niño,
adolescencia y juventud*
Jorge L. Maicelo

*A mis Amazonas. Rocío de los Milagros; mí mujer. Rosa Floresmila, Amarilis de
los Milagros, Andrea del Rocío y Cibeles Maia; mis hijas*
Oscar A. Gamarra

*A toda mi familia, en especial para Lizeth, Manuel y Enzo, con el aprecio de
siempre*
Manuel Oliva

*Dedicado con amor a Nayelhi Almendra, Esther y Rouzany y a todos aquellos
que estuvieron al inicio y a quienes siguen hasta hoy*
Santos T. Leiva

A mi esposa y mis hijos
Luis A. Taramona

A mi esposa Alla, mis hijas Flor Katherin e Irina y a mi nieto Marcelo
Milton A. Huanes

A mi familia, razón de todas mis metas
Carla M. Ordinola

ÍNDICE

	Pág.
Prólogo	9
Prefacio	10
Agradecimientos	12
Capítulo 1. Biogás	14
1.1. Definición y composición del biogás	14
1.2. Experimentos para producir biogás	19
1.3. Conclusiones	29
Capítulo 2. Sistema para producción de biogás y bioabonos	31
2.1. Sistemas para la producción de biogás y bioabonos.....	31
2.2. Biodigestor chino	36
2.3. Biodigestor hindú	37
2.4. Biodigestor tubular o de flujo pistón	37
2.5. Biodigestor laguna cubierta	38
Capítulo 3. Biodigestor tubular	40
3.1. Diseño del biodigestor tubular	40
3.2. Materiales para hacer el biodigestor.....	43
3.3. Biodigestor tubular de manga de polietileno.....	45
3.4. Biodigestor tubular de manta de geomembrana de PVC	57
3.5. Productos del biodigestor tubular	84
Capítulo 4. Aplicaciones del biogás	91
4.1. Cocina a biogás	91
4.2. Lámpara a biogás	99
4.3. Motores a biogás	102
4.4. Calefacción a biogás.....	124
4.5. Acciones para incrementar la presión del biogás	127
4.6. Agitación en el biodigestor	128
4.7. Jühnde, primer pueblo bioenergizado de Alemania.....	129
Capítulo 5. Diseño del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)	144
5.1. Biodigestor tipo laguna cubierta.....	144
5.2. Componentes del biodigestor tipo laguna cubierta.....	145
5.3. Variables de diseño de la laguna cubierta	146
5.4. Dimensiones de la cámara del biodigestor	149
5.5. Cúpula del biodigestor	154

5.6. Área de geomembrana para el biodigestor	Pág. 156
5.7. Laguna secundaria para almacenamiento del efluente	159
5.8. Cámara para secado de lodos de fondo (biosol)	164
5.9. Sedimentador	164
Capítulo 6. Operación del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)	168
6.1. Carga del BTLC	168
6.2. Recirculación y extracción de biosol	171
6.3. Extracción de biosol	171
6.4. Parchado de la geomembrana del biodigestor	173
Referencias bibliográficas.....	176

PRÓLOGO

En el ámbito del manejo de los ambientes montanos es muy importante generar soluciones técnicas a problemas complejos, y que se lo haga localmente con pericia y destreza en la búsqueda de energías alternativas no convencionales. Al proporcionar una opción económicamente rentable que limite el uso del combustible de leña, deforestando la poca biomasa remanente que se encuentra amenazada en la Ceja de Selva peruana, la utilización del biogás, gracias a la construcción de digestores anaeróbicos que aprovechen la materia prima de desecho de las operaciones agrícolas y ganaderas, es una solución acertada para mantener el agroecosistema operando eficientemente sin aumentar el uso de combustibles fósiles y sin contribuir al calentamiento global.

Son pocas las oportunidades de tener un texto tan claro, bien ilustrado y explicativo de la técnica y la teoría de uso de recursos del paisaje rural en los Andes. Me es muy grato comprobar una vez más la seriedad con que se manejan los temas de aplicación al desarrollo sustentable andino y el fructífero trabajo en equipo de los profesores de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), liderados por los objetivos de investigación de climatología y energías alternativas junto a las aplicaciones para el desarrollo sustentable de la Ceja de Selva. Con las 178 páginas de este libro se llena un vacío dejado por similares proyectos en Honduras (la Escuela Agrícola Panamericana, Universidad Zamorano) y en Costa Rica (la Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda, Universidad EARTH) y ciertos organismos internacionales como el CATIE y el CIAT, concentrados en la franja tropical de selvas bajas. El esfuerzo liderado por el Prof. Barrena y colaboradores, trae a primera plana la necesidad de trabajar en proyectos de biocombustibles en la zona de los flancos cordilleranos y las zonas transicionales de selvas altas, como Chachapoyas, donde la topografía y la fisiografía han jugado un papel importante junto a las prácticas ancestrales de ocupación y uso de la tierra. Además, refuerza merecidamente la oferta bibliográfica técnica de consulta fácil para los usuarios del campo en Amazonas.

Felicitaciones a los autores y al Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES) y al Proyecto PROCICEA, que llevan a reconocer a la UNTRM como el baluarte académico para la investigación y la aplicación de alternativas ambientalmente amigables en favor de los paisajes tropandinos.

*Ph.D. Fausto O. Sarmiento
Profesor de Ciencias de Montaña
Director del Laboratorio de Montología Neotropical
Departamento de Geografía
Universidad de Georgia, Athens, EE.UU.*

PREFACIO

El crecimiento de la población mundial a más de siete mil millones de personas, las exigencias crecientes de transporte, el abastecimiento de electricidad y calor y la creciente producción de bienes, conducen al incremento continuo del consumo de combustibles fósiles o biogénicos, asimismo al consumo de materias primas.

Estos procesos están acompañados por inmensos y crecientes daños ecológicos, y las consecuencias son la contaminación del aire, suelo y agua, que contribuyen al cambio climático; constituyen una fuerte amenaza para la humanidad. Los objetivos internacionales, nacionales y regionales relacionados a la conservación de los recursos y a la reducción de los gases de efecto invernadero son iniciativas importantes para acceder a estos desafíos. Las soluciones únicamente se pueden alcanzar a través del desarrollo de propuestas regionales adoptadas con el apoyo de la cooperación internacional. En este escenario, Universidades e Institutos de Investigación juegan un rol importante para desarrollar conceptos y procesos técnicos para el tratamiento de subproductos y de efluentes, para generar energía y producir bienes de manera amigable con el medio ambiente; además, transferir estos conocimientos a los estudiantes, implementarlos en pilotos demostrativos y de esta manera, en función del escalamiento de procesos, promover el desarrollo sostenible.

La Universidad de Ciencias Aplicadas y Arte (Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst: HAWK) en Alemania, y la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM) en Perú, vienen desarrollando trabajos de investigación en cooperación desde hace muchos años. El intercambio de estudiantes y la implementación de proyectos conjuntos para el establecimiento de pequeñas centrales generadoras de electricidad en base a la energía eólica y solar, o la construcción de viviendas eficientes en energía, muestran cómo a través del fortalecimiento de diferentes competencias técnicas se pueden encontrar soluciones para un desarrollo sostenible, que incorporan condiciones técnicas, económicas y culturales; recibiendo una alta aceptación por la población.

La producción de biogás a partir de residuos biogénicos como el estiércol o desechos de la producción de alimentos para consumo humano o animales, tiene un alto potencial, porque convierte la problemática del tratamiento de desechos en una solución para la generación y el aprovechamiento de energía con ahorro de recursos y al mismo tiempo disminuye la emisión de gases de efecto invernadero. También en este sector se debe desarrollar e implementar en Latinoamérica procesos técnicos conceptualmente adaptados, que se diferencien de biodigestores empleados en Europa. En esto la HAWK seguirá aportando a través de su cooperación para beneficiarse mutuamente del intercambio de conocimientos,

asimismo del aprovechamiento de las oportunidades para los estudiantes de ambos países.

Celebramos que el presente libro del experto distinguido Profesor Dr. Miguel Barrena y su equipo de investigación conformado por docentes de la UNTRM, aporta a la planificación e implementación de proyectos de biogás para contribuir al desarrollo sostenible global. Ofrece a tomadores de decisiones y productores agropecuarios, una ayuda valiosa para adaptar sus biodigestores en forma óptima a las condiciones y necesidades del lugar de instalación y con esto asegurar un funcionamiento exitoso por largo plazo. Tenemos la expectativa que el libro motivará a uno u otro lector, a andar por nuevos caminos y considerar la tecnología del biogás como una solución que preserva los recursos naturales, lo cual no tenía en vista anteriormente.

*Prof. Dr. Dres. h. c. Martin Thren, Prof. Dr.-Ing. Achim Loewen
Universidad de Ciencias Aplicadas y Arte (Hochschule für Angewandte
Wissenschaft und Kunst: HAWK)
Hildesheim/ Holzminden/ Göttingen, Alemania*

Agradecimientos

A la **Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas** (UNTRM), por su apoyo económico para realizar investigación científica en producción y aplicaciones de biogás y bioabonos.

Al **Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva** (INDES-CES) de la UNTRM, por su apoyo económico y logístico para realizar investigación y transferencia de tecnología en producción de biogás y bioabonos; y para pasantías de fortalecimiento de capacidades en centros de investigación del país y del extranjero.

A los Ingenieros Agroindustriales formados en la UNTRM que instalaron sistemas de producción de biogás y bioabonos en sus pueblos de origen: **Nemecio Chauca Rituay** y **Jóhmer Julca Noriega**; emplearon el biogás para cocina y lámpara y los bioabonos para alfalfa, frutales y café. **Evans Tejedo Soberón** aplicó sus conocimientos de mecánica de motocicletas junto con **Edwin Yopán Chocaca**, para adaptar exitosamente el motor a gasolina de 2,4 hp de un grupo electrógeno de 1 kW y el motor a gasolina de 9 hp de una picadora de pasto para que funcionen a biogás, en la Estación Experimental de Pomacochas del INDES.

Al Ingeniero Mecánico **Meregildo Silva Ramírez**, a los Ingenieros Agroindustriales **Segundo Victor Olivares Muñoz**, **Jorge Purizaca Jiménez** y **Evans Tejedo Soberón** por su apoyo y sugerencias para hacer realidad el mini automóvil β -150 a biogás.

A los estudiantes de Maestría en Recursos Naturales y Energías Renovables de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Arte (Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst: HAWK) de Göttingen – Alemania: **Monika Hellenthal** que hizo su tesis sobre producción de biogás empleando el sistema instalado en el Campus de la UNTRM. **Thies Fellenberg**, **Max Knösel** y **Jasper Starke** que hicieron tres meses de práctica en producción de biogás, incluyendo la instalación del sistema completo con biodigestor tubular en la Estación Experimental de Pomacochas del INDES y **Johann Schulteis** que instaló un sistema similar en el fundo de un beneficiario en Gualulo (Pomacochas).

Al Dr. **Martin Thren**, profesor de la HAWK, por su apoyo para visitar Jühnde, el primer pueblo bioenergizado de Alemania, y por la traducción especializada para el perfecto entendimiento de los procesos biotecnológicos y de ingeniería que realizan.

A los Ingenieros Ambientales formados en la UNTRM: **Perci Salazar Salazar** y **Franklin Cubas Alarcón** que realizaron su tesis en producción de biogás en el BTLC y en un biodigestor tubular, respectivamente, para generar nuevo conocimiento; a **Henry Carrasco Guevara** y **Wildor Gosgot Angeles** por su apoyo en estas labores en su afán de aprender para complementar su formación profesional.

A todas las personas e instituciones que nos convocaron para instalar sistemas de producción de biogás y bioabonos, por la oportunidad para difundir esta tecnología, ganar experiencia y seguir aprendiendo.

*Dr. Miguel A. Barrena Gurbillón
Coordinador General*

Capítulo 1: Biogás

1.1 Definición y composición del biogás

El biogás es una mezcla de diferentes gases producidos por la descomposición anaeróbica de materia orgánica como el estiércol y la basura orgánica. El principal componente del biogás es el metano (CH_4 : primer hidrocarburo de la serie de los alcanos) conocido también como “gas de pantano” (Tabla 1). La mezcla de metano con el aire es comburente y arde con llama azul (indicador de combustión total), que permite tener la cocina y sus utensilios libres de tizne y humos irritantes (Figura 1).

Tabla 1. Composición química del biogás

Componente	Fórmula	Porcentaje (v/v)
Metano	CH_4	40 – 70
Dióxido de carbono	CO_2	30 – 60
Hidrógeno	H_2	0,1
Nitrógeno	N_2	0,5
Monóxido de carbono	CO	0,1
Oxígeno	O_2	0,1
Sulfuro de hidrógeno	H_2S	0,1

Fuente: Blanco *et al.*, 2011, citado por Cepero *et al.*, 2013



Figura 1. Combustión del biogás en la hornilla de una cocina.

En el biogás hay trazas de sulfuro de hidrógeno (H_2S) que le da olor desagradable a desagüe, por lo que debe eliminarse del flujo de biogás antes de emplearlo como combustible, para ello es suficiente hacer pasar el flujo de biogás a través de un cartucho relleno con viruta, esponja o clavos de hierro. El sulfuro ferroso (FeS) queda adherido al hierro dentro del cartucho y el hidrógeno (H_2) producido se incorpora al flujo de biogás. La reacción química que se produce es la siguiente:



Figura 2. Fuentes naturales de biogás.

El biogás se produce de manera natural en las siguientes fuentes (Figura 2):

- **Vegetación:** cuando se descompone, libera gas metano.
- **Cultivos sumergidos:** plantaciones de arroz y totorales.

- **Pantanos y humedales:** pudrición de la vegetación en su fondo.
- **Estiércol de animales de granja:** de vacuno, ovino, equino, cerdos, pollos, cuyes; al descomponerse produce metano.
- **Desagües:** su tratamiento en digestores anaerobios produce metano.
- **Relleno sanitario:** la basura orgánica produce metano cuando se descompone.

Los sistemas agropecuarios emiten significativamente a la atmósfera tres gases de efecto invernadero (GEI): metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O). Estos gases provocan un calentamiento de la superficie terrestre y la destrucción de la capa de ozono en la estratósfera. El metano presenta un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el CO₂ y su tiempo de vida en la atmósfera es de 9 a 15 años, con una tasa anual de crecimiento de 7%. El metano proveniente del suelo de los sistemas pecuarios se puede generar por la fermentación anaeróbica de la materia orgánica, deposición de excrementos en las pasturas, tratamientos anaeróbicos de los residuos animales y quema de biomasa (Silva *et al.*, 2013).

Por este motivo, el biogás que contiene entre 40 a 70% de metano debe utilizarse como combustible para cocinas, lámparas o motores; caso contrario, se lo debe quemar en una antorcha para atenuar su efecto negativo (Figura 3 y 5). La combustión de una molécula de metano produce una molécula de dióxido de carbono, con esto se reduce en 25 veces su poder de gas de efecto invernadero.



Figura 3. Biogás producido en un biodigestor usado como combustible en una lámpara, un grupo electrógeno y una antorcha.

Un relleno sanitario es el lugar donde la basura recolectada en la ciudad es esparcida por un tractor en forma de una capa, sobre la cual esparcirá una capa de tierra. Los restos orgánicos presentes en la basura se descompondrán en anaerobiosis produciendo biogás. Para coleccionar el biogás se debe enterrar, junto con la basura, tubos de policloruro de vinilo (PVC) perforados y conectados entre si hacia la superficie del relleno sanitario (Figura 4).

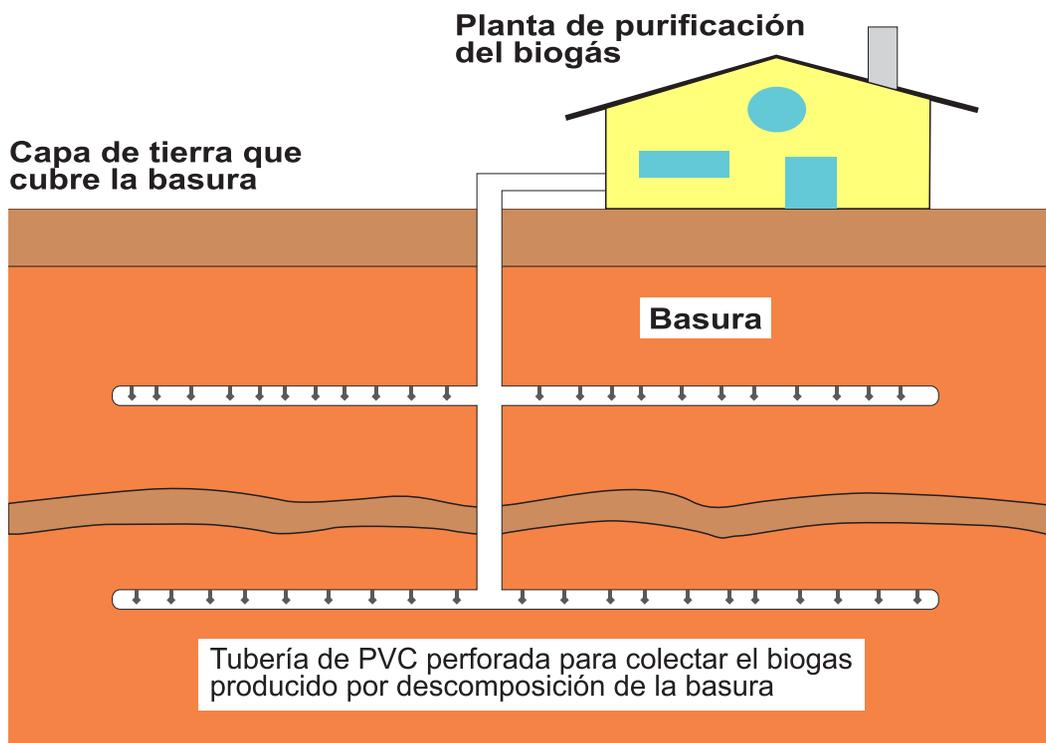
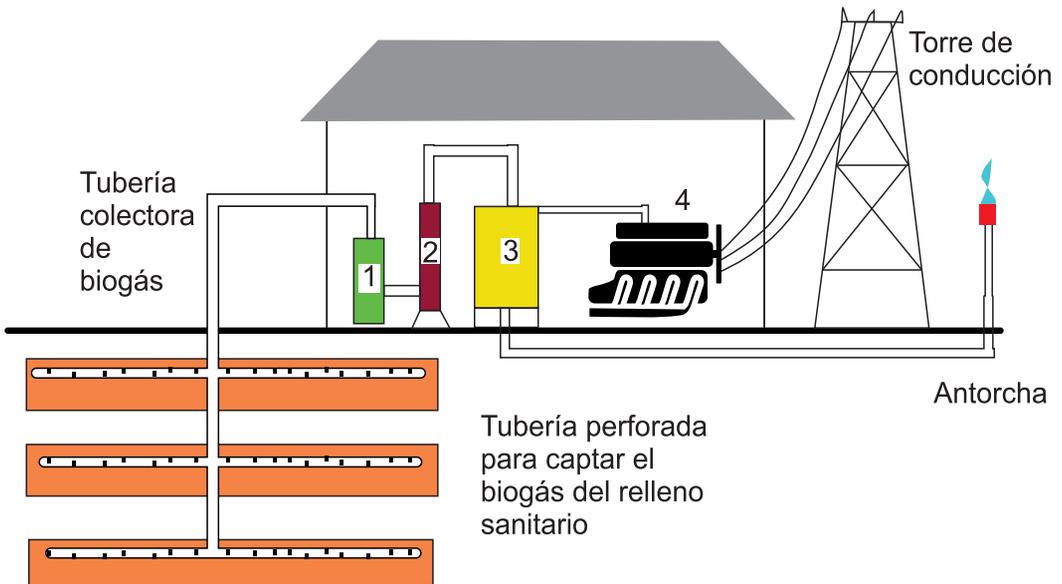


Figura 4. Sistema para coleccionar el biogás de un relleno sanitario.

El biogás producido en los rellenos sanitarios se puede coleccionar, deshumidificar, eliminar el H_2S y el CO_2 , para emplearlo como combustible de grupos electrógenos y vender energía eléctrica a las poblaciones cercanas, o quemarlo en una antorcha (Figura 5). El metano producido en los rellenos sanitarios que no se colecciona, no permite que se desarrolle vegetación y puede inflamarse espontáneamente, por este motivo, de noche puede observarse llamas en estos lugares y humareda producida por la quema de la basura. En las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas también se produce metano que se puede coleccionar para quemarlo en antorchas, o purificarlo para combustible de grupos electrógenos, similar a lo mencionado para relleno sanitario.

El biogás es un combustible ecológico porque permite reciclar o cerrar el ciclo del dióxido de carbono (CO_2) producido en su combustión, es decir, realizar la captura de carbono. El sustento se muestra en la Figura 6 y consiste en que las plantas absorben agua y nutrientes del suelo, mediante sus raíces; con sus hojas captan el CO_2 del aire y la energía solar a través de la clorofila para realizar la fotosíntesis, que permite a la planta producir monosacáridos y luego polisacáridos para su crecimiento. Las plantas sirven de alimento a los animales, los que al final de su digestión excretan estiércol, que puede ser colectado para procesarlo en un recipiente cerrado (biodigestor) en condiciones anaeróbicas (ausencia de oxígeno) para producir biogás y bioabonos (biol y biosol). El biogás se emplea como combustible en la cocina, en lámparas, en motores o para calefacción; produciendo CO_2 y vapor de agua que se descargan a la atmósfera, de donde el CO_2 será reciclado por las plantas. Los bioabonos servirán para retornar nutrientes al suelo de manera que la producción de los cultivos sea mayor y se fomenta la agricultura orgánica.



1: Medición del volumen y presión del biogás

2: Purificación del biogás

3: Almacenamiento del biogás

4: Grupo electrógeno a biogás

Figura 5. Sistema de purificación del biogás de relleno sanitario para producir energía eléctrica mediante grupos electrógenos a biogás.

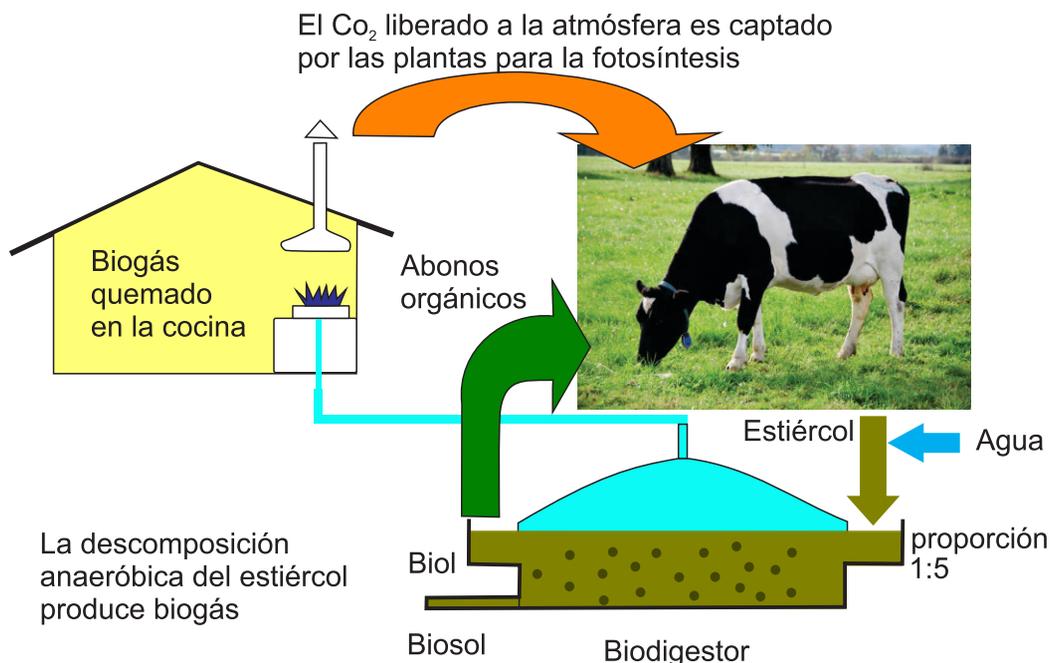


Figura 6. Biogás: combustible ecológico.

1.2. Experimentos para producir biogás

En la búsqueda de fuentes de energías renovables, limpias, económicas, factibles de aplicar y amigables con el medio ambiente que, además, contribuyan a mejorar la calidad de vida de las personas y evitar la tala de árboles para convertirlos en leña; los autores realizaron investigaciones para demostrar que se puede producir un combustible ecológico a partir de estiércol de ganado.

La primera investigación para producir biogás se realizó en el establo de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo - Perú. Se empleó los materiales indicados en la Figura 7. Se mezcló 3 L de estiércol fresco de vaca con 14 L de agua y se le agregó 1 L de agua de desagüe (proporción 1:5) como inóculo. Con esta mezcla se llenó el botellón de plástico hasta la altura de su hombro. El botellón se cerró herméticamente con un tapón de jebe conectado a un tubo o conexión te, a una de cuyas ramas se conectó con manguera un globo de mylar nuevo completamente vacío. La otra rama se conectó con manguera a una llave de paso, la cual se mantuvo cerrada durante todo el bioproceso, a esta llave se conectó un tubo de fierro a manera de quemador para realizar la prueba de combustión del biogás. El botellón fue cubierto con una bolsa de plástico negro para evitar que se desarrollen algas en su interior y se lo dejó a la intemperie.

Transcurridas dos semanas, el biogás producido infló ligeramente el globo. A la tercera semana, la producción de biogás se incrementó, habiéndose llenado un

tercio del volumen del globo. A la quinta semana, el globo estuvo lleno de biogás y se procedió a realizar la prueba de combustión, con lo que quedó demostrado que es factible producir un combustible ecológico a partir de estiércol de ganado vacuno.

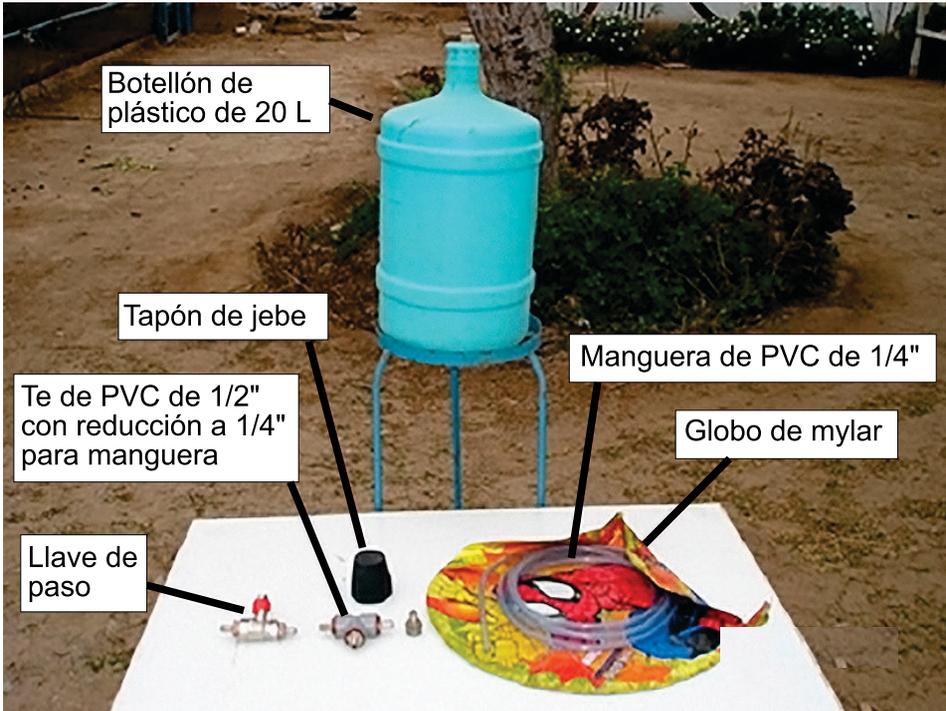


Figura 7. Materiales para ensamblar un biodigestor para producir biogás.



Figura 8. Biodigestor y volumen de biogás producido en tres semanas.

La segunda investigación para producir biogás se realizó en el Laboratorio de Ingeniería de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), Chachapoyas - Perú. Se empleó estiércol fresco de ganado vacuno recolectado en el Camal Municipal y agua de desagüe, ambos de la ciudad de Chachapoyas; y cáscara de papa cortada finamente que se empleó como fermentador adicional, para demostrar que la basura orgánica también produce biogás.

Las variables independientes fueron relación estiércol: agua, %(volumen/volumen) de agua de desagüe con respecto al volumen del biodigestor y %(peso/volumen) de cáscara de papa con respecto al volumen de estiércol. Los rangos de sus valores se muestran en la Tabla 2, en base a los que se calculó la cantidad de estiércol, agua de desagüe y cáscara de papa. La variable dependiente fue el volumen de biogás producido. Cada experimento se realizó de acuerdo a la Tabla 3, que es la distribución de los valores de las variables según el diseño estadístico de Box-Behnken (Greasham y Inamine, 1989).

Tabla 2. Valor de las variables independientes a evaluar con el diseño estadístico de Box-Behnken

Concentración	Relación estiércol:agua	Agua de desagüe (% (vol/vol))	Cáscara de papa (%(peso/vol))
Alta (+)	1:1	6	9
Media (0)	1:2	4	6
Baja	1:3	2	3

Tabla 3. Distribución de los valores de las variables según el diseño estadístico de Box-Behnken para tres variables independientes

N° de experimento	Variables		
	X1	X2	X3
1	+	+	+
2	+	+	0
3	+	0	+
4	0	+	+
5	+	+	-
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	0	0
9	0	0	0
10	0	-	-
11	-	-	0
12	+	0	-
13	-	0	+
14	0	-	+
15	-	-	-

Se empleó bajas relaciones estiércol:agua porque el estiércol se recolectó de los intestinos del ganado vacuno sacrificado, por ello estaba más fluido. Los biodigestores fueron botellas descartables de 1,75 L, cargadas con la mezcla de componentes de acuerdo a la distribución de la Tabla 3, para obtener el mejor valor de las variables, cada columna representó una variable y cada fila un experimento. Los símbolos +, 0, -, representaron los niveles alto, medio y bajo, respectivamente de cada variable. El volumen se completó con agua potable reposada; luego se taparon los biodigestores con tapones de jebe microporoso atravesados por una manguera de PVC de 1/4", el otro extremo de cada manguera se introdujo en una botella descartable de 260 mL, calibrada y marcada cada 50 mL, llena de agua, libre de burbujas de aire y colocada invertida en una tina con agua (Figura 9), sujeta a un soporte de hierro.

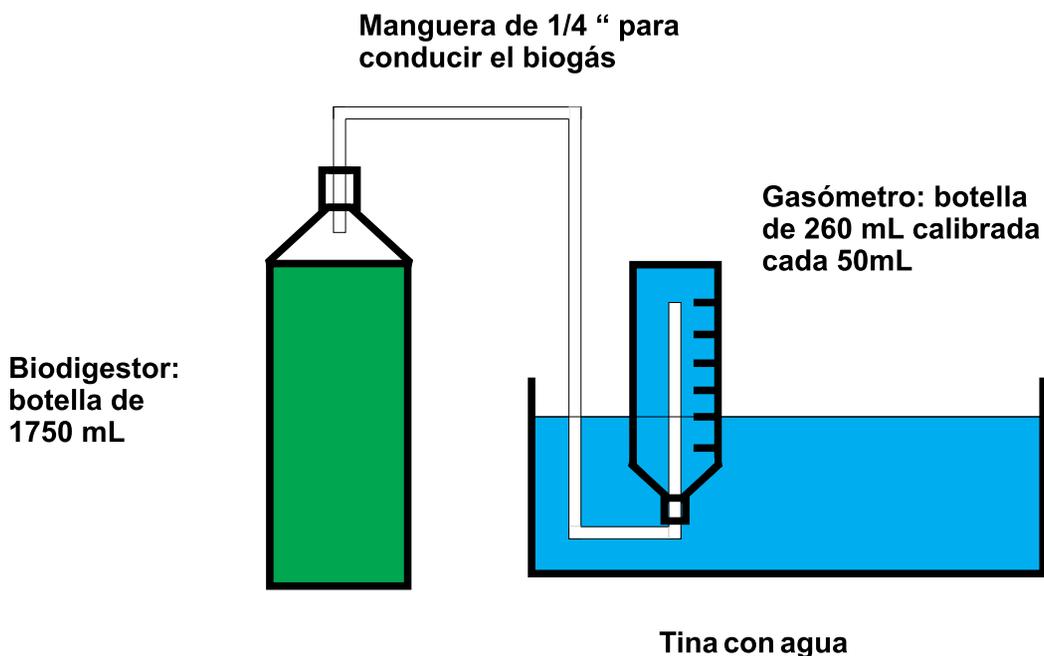


Figura 9. Equipo experimental para producir y medir el volumen de biogás.

El biogás producido desplazó el agua del interior de la botella calibrada, por ello se pudo medir el volumen de biogás producido en cada biodigestor. Se realizaron tres corridas de 15 experimentos, durante 45 días cada una, siendo la variable respuesta el volumen de biogás producido (Tabla 4).

Los resultados experimentales se procesaron con el software estadístico Statgraphics, para determinar los valores de las variables independientes que permitirán producir el máximo volumen de biogás, esto se obtuvo del análisis de la gráfica de respuesta en superficie generada por el mismo software.

En la Tabla 4 se puede ver que los valores de las variables independientes del experimento 14: 583 mL de estiércol de ganado vacuno (relación estiércol:agua de 1:2), 35 mL de agua de desagüe (2% vol/vol) y 79 g de cáscara de papa (9% peso/vol); son los que producen el mayor volumen de biogás.

La ecuación de regresión del modelo, obtenida con el software Statgraphics, ajustado a los datos experimentales es:

$$Y = - 265,43 + 0,99394 \times A - 2,24374 \times B + 4,02563 \times C - 0,000778982 \times A^2 + 0,00219153 \times (A \times B) - 0,00235364 \times (A \times C) + 0,00398022 \times B^2 - 0,00471533 \times (B \times C) - 0,003408 \times C^2$$



Figura 10. Dosificación del estiércol, agua de desagüe y cáscara de papa. Bidigestores conectados a su botella de colección de biogás.



Figura 11. Producción de biogás a los 15 días, en los biodigestores 8 (25 mL), 11 (30 mL), 13 (100 mL) y 14 (75 mL).

Tabla 4. Producción promedio de biogás de las tres corridas de 15 experimentos

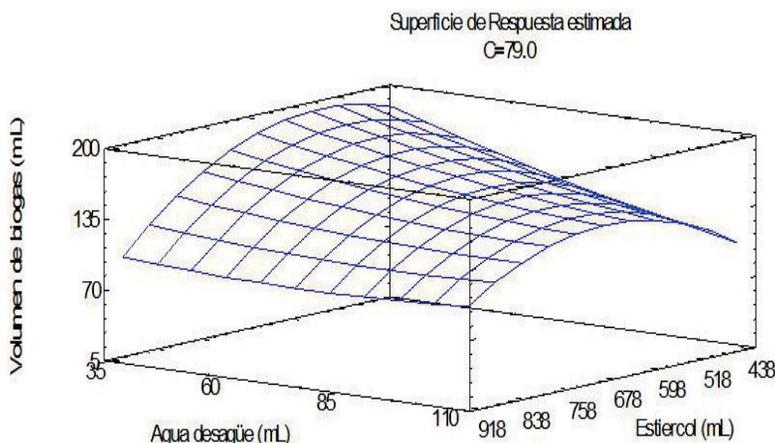
N° de experimento	Variables			Volumen de biogás (mL)
	X1: A (mL estiércol)	X2: B (mL agua desagüe)	X3: C (g cáscara papa)	
1	875	105	79	120
2	875	105	35	58
3	875	70	79	98
4	583	105	79	136
5	875	105	13	43
6	875	35	79	126
7	438	105	79	104
8	875	70	35	81
9	583	70	35	78
10	583	35	13	59
11	438	35	35	59
12	875	70	13	5
13	438	70	79	151
14	583	35	79	195
15	438	35	13	23

El software Statgraphics también optimiza la respuesta al seleccionar la meta de maximizar el volumen de biogás a obtener, dando como resultado el valor de 195,827 mL de biogás, cuando los valores de las variables independientes son los mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Valor de las variables independientes que producirán el máximo volumen de biogás

Variable	Valor inferior	Valor mayor	Valor óptimo
A: Estiércol de ganado vacuno (mL)	438,0	875,0	567,891
B: Agua de desagüe (mL)	35,0	105,0	35,0
C: Cáscara de papa (g)	13,0	79,0	79,0

La Figura 12, representa la respuesta en superficie generada por el software Statgraphics, a partir de la ecuación de regresión del modelo ajustado a los datos experimentales. Se lee que se obtendrá 195,827 mL de biogás cuando se emplee 567,891 mL de estiércol de ganado vacuno, 35 mL de agua de desagüe y 79 g de cáscara de papa.



En la Estación Experimental de Pomacochas del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza (UNTRM), se realizó la investigación para evaluar la producción de biogás a partir de estiércol de vacuno, suero de leche y chips de totora. El suero de leche es un subproducto de la producción de quesos y la totora abunda en las orillas de la laguna de Pomacochas. Esta investigación estuvo a cargo del Ingeniero Agrónomo Thies Fellenberg, estudiante de la Maestría en Materias y Energías Renovables de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Arte (Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst: HAWK) de Göttingen –Alemania, asesorado por el Dr. Miguel Barrena.

Tabla 6. Rango de valor de las variables de los experimentos en Pomacochas

Valor de las variables	Variables		
	Estiércol: agua	Suero (%(v/v))	Totora (%(p/v))
Alto: +	1:3	6	9
Medio: 0	1:4	4	6
Bajo: -	1:5	2	3

Como biodigestores se emplearon bidones de polietileno de 12 L, con un volumen de trabajo de 10 L. El biogás se colectó en botellas calibradas de 2 L. El valor de cada variable independiente se muestra en la Tabla 7. Se completó el volumen de la mezcla experimental a 10 L con agua reposada.

Tabla 7. Valor de las variables de los experimentos en Pomacochas

Valor de las variables	Variables		
	Estiércol (L)	Suero (mL)	Totora (g)
Alto: +	2,5	600	225
Medio: 0	2,0	400	120
Bajo: -	1,7	200	51



Figura 14. Recolección y preparación de la totora en la picadora de pasto.



Figura 15. Preparación de la mezcla estiércol:agua.



Figura 16. Dosificación de los chips de totora y del suero de leche. Se completó el volumen de la mezcla experimental a 10 L con agua reposada.



Figura 17. Soporte de las botellas colectoras de biogás y equipos experimentales instalados por el Ingeniero Agrónomo Thies Fellenberg.

Los experimentos se realizaron durante 27 días y los resultados se muestran en la Tabla 8, donde se puede apreciar que los experimentos 3 y 5 produjeron igual volumen de biogás (1400 mL) en el mismo tiempo (27 días).



Figura 18. Botellas colectoras de biogás de los biodigestores 8, 12 y 13.

Tabla 8. Resultados experimentales de producción de biogás a partir de estiércol de vacuno, suero de leche y chips de totora en Pomacochas

N° de experimento	Variables			Producción de biogás				Orden producción			
	Estiércol (L)	Suero (mL)	Totora (g)	13 días	17 días	22 días	27 días	13 días	17 días	22 días	27 días
1	1,7	200	120	0	0	0	0	-	-	-	-
2	1,7	600	120	0	0	500	600	-	-	7	7
3	2,5	200	120	1000	1100	1300	1400	2	2	1	1
4	2,5	600	120	0	0	0	0	-	-	-	-
5	1,7	400	51	700	1200	1300	1400	5	1	1	1
6	1,7	400	225	750	780	900	1200	4	6	5	4
7	2,5	400	51	550	680	850	900	6	8	6	6
8	2,5	400	225	1100	1100	1200	1250	1	2	2	3
9	2,0	200	51	0	0	500	600	-	-	7	7
10	2,0	200	225	200	750	950	1150	8	7	4	5
11	2,0	600	51	0	0	50	400	-	-	9	9
12	2,0	600	225	450	450	450	450	7	9	8	8
13	2,0	400	120	750	1000	1200	1300	4	4	2	2
14	2,0	400	120	700	950	1100	1250	5	5	3	3
15	2,0	400	120	770	1050	1200	1300	3	3	2	2

Los experimentos con 600 mL de suero (valor alto) no producen biogás durante los primeros 22 días (Experimentos: 2, 4, 11). Solo con el valor alto de totora (225 g) se logró producir biogás (Exp. 12: 450 mL, representa el 37,5% del máximo (1400 mL de biogás)).

El experimento con 200 mL de suero (valor bajo) y 1,7 L de estiércol (valor bajo) no produce biogás (Exp. 1). Los experimentos con 200 mL de suero (valor bajo) y 120 g de totora (valor medio) o 51 g de totora (valor bajo), no producen biogás (Exp. 1), excepto el Exp. 9 que recién produce biogás a los 22 días.

Con 400 mL de suero, si se mantiene constante el valor de estiércol en 1,7 L (valor bajo) y se incrementa en 4,4 veces la cantidad de totora (de 51 g a 225 g), se reduce la producción de biogás en 1,54 veces (Exp. 5 y 6). Pero sucede lo contrario cuando se mantiene el estiércol en 2,5 L (valor alto) y se incrementa en la misma proporción la totora (Exp 7 y 8), la producción de biogás aumenta en 1,62 veces.

Con 400 mL de suero y los valores bajos de estiércol y totora (Exp. 5), o con sus valores medio (Exp. 13, 14 y 15), o sus valores altos de estas mismas variables (Exp. 8), se produce más biogás. Si se incrementa la cantidad de estiércol y de totora pero se disminuye a la mitad el suero, se logra una buena producción de biogás (Exp. 3), similar a lo obtenido en el Exp. 5.

Si se mantiene constante el suero en su valor bajo o medio y la totora en cualquiera de sus valores, y se incrementa el estiércol, se produce más biogás (Exp. 1 y 3; 6 y 8).

Rápidamente se detiene la producción de biogás cuando se emplea el valor alto de totora (225 g) asociado con el suero en valor medio (400 mL) (Exp. 6 y 8) o alto (600 mL) (Exp. 12).

1.3. Conclusiones

- La relación estiércol:agua es de 1:5, asociada con 4%(v/v) de suero (4 mL por cada 100 mL de mezcla en el biodigestor) y 3%(p/v) de totora (3 g por cada 100 mL de estiércol) producen el mayor volumen de biogás (Exp 5).
- Los experimentos con 600 mL de suero (valor alto) no producen biogás.
- Los experimentos con 200 mL de suero (valor bajo) producen biogás si se asocian con el valor alto de estiércol y con el valor medio de totora (Exp. 3); o con el valor medio de estiércol y el valor alto de totora (Exp. 10).

- La mayor producción de biogás se obtiene con 400 mL de suero (valor medio) asociado con cualquiera de los valores experimentales de estiércol y de totora (Exp. 5, 13 y 8).

La ecuación de regresión ajustada a los datos, cuyos valores de las variables son especificados en sus unidades originales, fue:

$$\begin{aligned} \text{Producción de biogás} = & -9903,13 + 5962,74 \times \text{Estiércol} + 25,553 \times \text{Suero} - \\ & 1,15988 \times \text{Totora} - 892,361 \times \text{Estiércol}^2 - 6,06574 \times \text{Estiércol} \times \text{Suero} + 2,48715 \\ & \times \text{Estiércol} \times \text{Totora} - 0,0164545 \times \text{Suero}^2 - 0,00788503 \times \text{Suero} \times \text{Totora} + \\ & 0,00106098 \times \text{Totora}^2 \end{aligned}$$

La superficie de respuesta estimada en función de esta ecuación, manteniendo constante la variable totora en 225 g, se muestra en la Figura 19. Con el software Statgraphics se optimizó el valor de las variables para maximizar la producción de biogás en base a los resultados experimentales, obteniéndose los valores que se muestran en la Tabla 9.

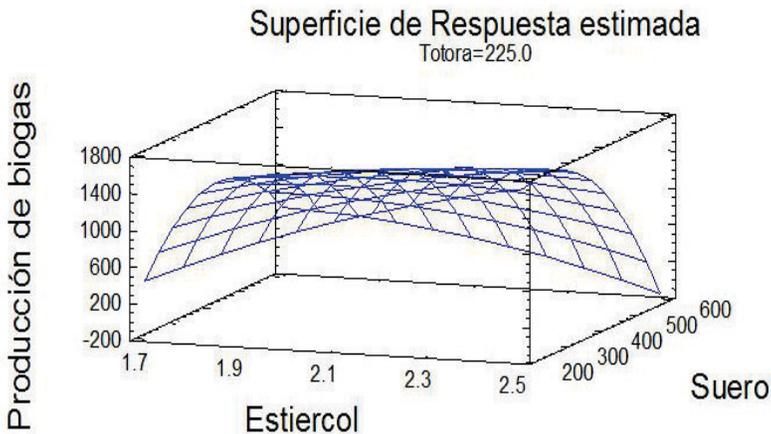


Figura 19. Superficie de respuesta estimada manteniendo constante la variable totora en 225 g. Volumen máximo de biogás: 1400 mL.

Tabla 9. Respuesta optimizada para maximizar la producción de biogás. Valor óptimo = 1745,74 mL de biogás

Factor	Inferior	Mayor	Óptimo
Estiércol (L)	1,7	2,5	2,5
Suero (mL)	200,0	600,0	261,763
Totora (g)	51,0	225,0	225,0

Capítulo 2: Sistemas para producción de biogás y bioabonos

2

2.1. Sistemas para producción de biogás y bioabonos

Son las instalaciones completas donde se procesará el estiércol del ganado, en anaerobiosis, para producir y almacenar biogás y bioabonos; teniendo estos efluentes disponibles para su uso como combustible y fertilizantes, respectivamente. Los componentes de estos sistemas son:

a) Biodigestor

El biodigestor, fermentador o reactor anaeróbico es un recipiente donde ocurre el proceso de transformación del sustrato o materia orgánica en biogás y bioabonos (biol y biosol), por acción de los microorganismos, en ausencia total de oxígeno (anaerobiosis); por lo que se les debe propiciar determinadas condiciones para su buen funcionamiento:

- Garantizar hermeticidad para evitar fugas de biogás o líquido en proceso.
- Brindar seguridad contra fuego directo y explosiones.
- Disponer de facilidad para la carga o alimentación y para la descarga de efluentes.
- Almacenar y trasvasar el biogás, líquidos y lodos producidos.
- Facilitar la agitación parcial o total del sustrato en fermentación.

Los biodigestores son básicamente de tres tipos: chino, hindú y taiwanes o de flujo pistón. El biodigestor puede ser de ladrillo, hormigón, hormigón armado, plástico u otro material que asegure las condiciones requeridas de resistencia, impermeabilidad y funcionamiento. El 75% del volumen del biodigestor es el espacio donde ocurre la digestión, que es un proceso bioquímico que transforma la carga, sustrato o materia orgánica alimentada, en biogás y bioabonos.

b) Cámara de gas o gasómetro

Es la parte del sistema donde se almacena el biogás producido durante la fermentación, por lo que debe hacerse a prueba de fugas. Los gasómetros pueden ser:

De cúpula fija. El gasómetro es parte integrante del biodigestor y corresponde al 25 % del volumen libre inicial, es el caso específico del biodigestor tipo chino que se construye de ladrillo y cemento por lo que es una estructura rígida. La presión se mantiene e incrementa por la producción de biogás durante la fermentación, con el correspondiente desplazamiento del líquido que se está fermentando hacia el sistema de salida de efluente líquido. La presión del biogás puede ser mayor a 100 cm de agua (Figura 20).

De depósito flotante. El gasómetro puede estar instalado fuera del biodigestor sobre un lecho de agua, o se puede instalar directamente sobre el biodigestor. El depósito o campana flotante puede ser de fierro o de plástico rígido. Se presenta en el biodigestor tipo hindú y la presión del biogás puede superar los 100 cm de agua (Figura 20 y 25). La presión del biogás empuja la campana hacia arriba y el peso de la campana sirve para mantener la presión más o menos constante.

De plástico flexible. El biogás se almacena en una bolsa hecha de neopreno, polietileno o geomembrana de PVC. Tiene el inconveniente que la presión del biogás será como máximo de 10 cm de agua para evitar que se deforme este depósito. Este tipo de gasómetro se puede instalar sobre el biodigestor (Figura 20) encima de una tarima.



Figura 20. Gasómetros fijo (rojo), flotante (azul) y de geomembrana de PVC.



Figura 21. Sistemas de carga y descarga del biodigestor.



Figura 22. Cartuchos con viruta o clavos de hierro para eliminar el H_2S .

c) Alimentación o carga de la materia orgánica

Permite la carga y posterior alimentación diaria del biodigestor. En algunos casos se diseña para permitir la homogenización del material de carga, y a la vez se pueda realizar el control de sólidos totales y pH del sustrato; de lo contrario, debe contarse con un tanque de metal o de plástico de 200 L donde se mezclará la materia orgánica con el agua, permitiendo además la eliminación de los sólidos que flotan, que pueden obstruir el tubo de entrada del biodigestor o causar problemas de funcionamiento del sistema (Figura 21).

d) Salida o descarga del efluente

Su función es facilitar la descarga del líquido (biol) o de los lodos digeridos (biosol) para su posterior utilización como abonos orgánicos. Debe estar al mismo nivel del sistema de carga, para que funcionen como vasos comunicantes (Figura 21).

e) Purificación del biogás

Eliminación del sulfuro de hidrógeno. El sulfuro de hidrógeno (H_2S) es el componente del biogás que causa mayor problema para su utilización por su olor desagradable y alto poder corrosivo. La no eliminación provocará un deterioro rápido de todas las instalaciones, con las correspondientes pérdidas económicas. Para eliminar el H_2S se hace pasar la corriente de biogás por un cartucho relleno con viruta, esponjas o clavos de hierro. Puede instalarse un solo cartucho de forma horizontal o dividirlo en dos cartuchos verticales, siendo ésta última la mejor opción porque el biogás pasará de manera descendente por el primer cartucho y ascendente por el segundo cartucho, con lo que se logrará incrementar la eficiencia de eliminación del H_2S del biogás (Figura 22).

Eliminación del dióxido de carbono. El CO_2 se puede eliminar utilizando una solución de cal en agua (según el cálculo estequiométrico: 1,0 Kg de CaO puro en 1000 L de agua puede eliminar 700 L de CO_2 : $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$; $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$; $Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$). Esta solución no es factible para ser utilizada a gran escala debido al gasto excesivo de reactivos y acumulación de subproductos. Otra forma de eliminar CO_2 es utilizando sosa cáustica (según el cálculo estequiométrico: 1,0 Kg de $NaOH$ puro en 1000 L de agua puede eliminar 280 L de CO_2 : $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$; $2NaOH + H_2CO_3 \rightarrow Na_2CO_3 + 2H_2O$). Este proceso no es rentable por el alto valor de la sosa y puede provocar graves quemaduras si no se manipula con la protección correspondiente. Se utiliza en experimentos de laboratorio.

Eliminación de agua. El biogás producido puede tener vapor de agua, que por condensación forma gotas que se acumulan en los puntos más bajos de las tuberías de conducción de biogás. Con el tiempo la cantidad de agua condensada aumenta, llegando a dificultar y en ocasiones a impedir la circulación del biogás. Para eliminar esta agua condensada de las tuberías se coloca una llave de drenaje o una trampa de agua en la parte más baja de la tubería (Figura 23).

f) Control de presión del biogás

La presión debe ser medida y controlada para mejorar la operación y la eficiencia de los equipos que utilicen biogás como combustible. Se emplea un manómetro en U de tubo de vidrio o de manguera de PVC de ¼" con agua; también puede emplearse una botella de 1,5 L, con agua hasta $\frac{3}{4}$ de su volumen, en ella se introduce 10 cm de un ramal de la tubería que conduce el biogás, al que se le hacen ranuras cada 1 cm. En el caso del manómetro, el biogás empujará el agua de la rama conectada a la tubería de biogás desplazándola por el tubo en U, la diferencia de altura del agua entre ambas ramas será la presión del biogás en todo el sistema, expresada en cm de agua. Cuando se emplee la botella, se la deberá bajar lentamente para que vaya saliendo el ramal introducido en el agua de la botella, en el momento que salgan burbujas por este ramal se cuenta las ranuras del tubo que quedan sumergidas en el agua, esa será la presión en cm de agua.

Si el ramal de la tubería se introduce 10 cm bajo el nivel de agua de la botella, la presión de trabajo máxima del sistema será de 10 cm; cuando se supere esta presión, el biogás saldrá por el ramal y burbujeará en el agua para enseguida salir a la atmósfera. De esta manera se puede prefijar la presión máxima de trabajo del sistema de producción de biogás.



Figura 23. Tablero con componentes para eliminación de agua y medición y control de presión del biogás.

2.2. Biodigestor chino

Son recipientes cilíndricos con fondo y tope semiesféricos, construidos bajo el nivel del suelo, con ladrillos y cemento, todo su interior debe ser tarrajado con cemento y aditivos impermeabilizantes. El biogás se acumula en su cúpula fija, de donde se conduce por tubería de PVC hacia el lugar de su consumo. En Cuba los han modificado adicionándoles una cámara de compensación que permite incrementar la presión de biogás y retirar los lodos del fondo (Figura 24 y 25).

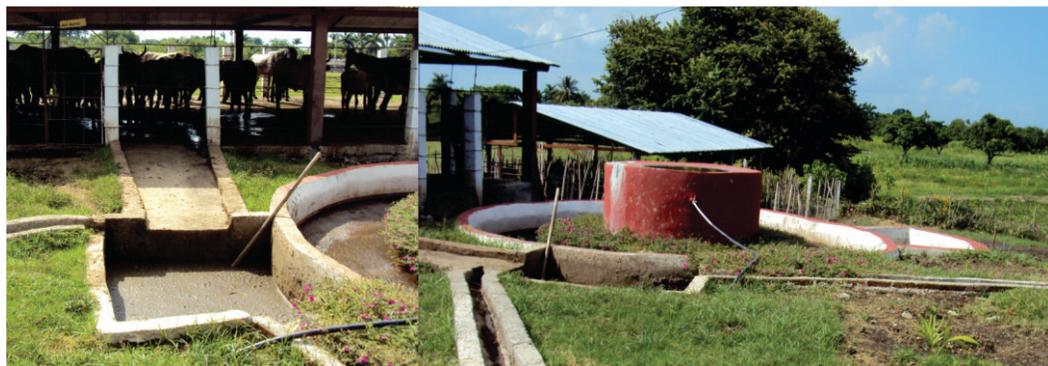
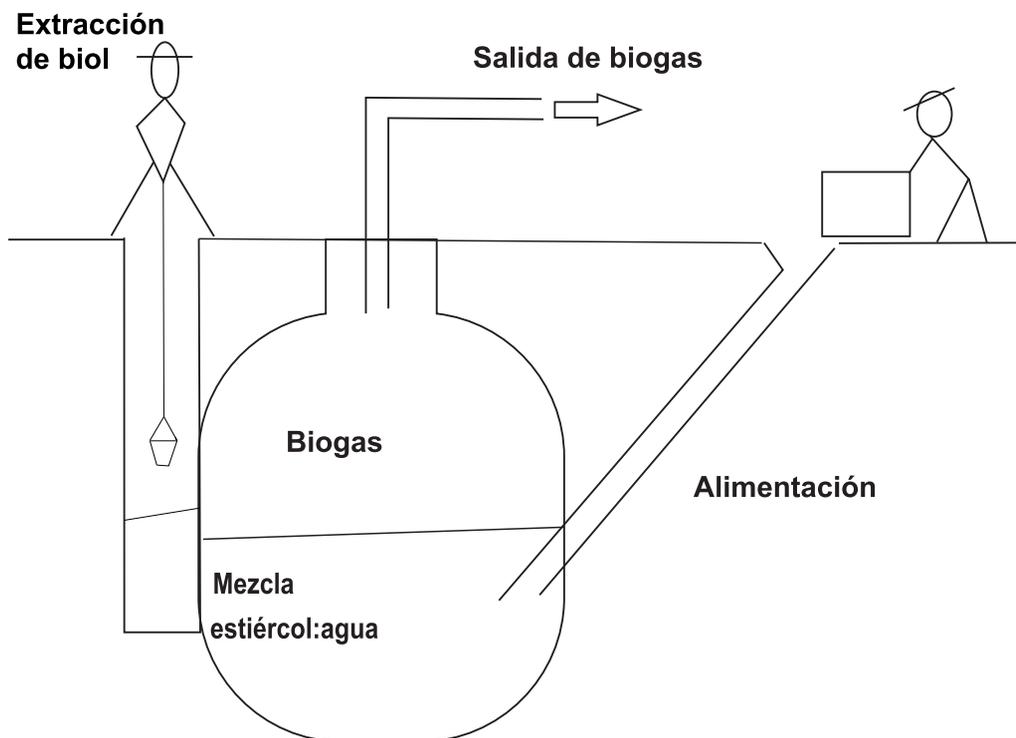


Figura 24. Esquema del biodigestor chino. Alimentación del biodigestor con el lavado del piso del cobertizo.

2.3. Biodigestor hindú

Existen varios diseños en función de la forma y posición del gasómetro. Por lo general, son verticales y cilíndricos, semejantes a un pozo; en su parte superior flota una campana y su diseño permite adicionar pesos sobre la misma, según la presión que se necesite. La cámara de digestión se construye de ladrillo tarrajado con cemento y la campana flotante (gasómetro) se hace de hierro o plástico (Figura 25).



Figura 25. Biodigestor tipo hindú (izquierda) y tipo chino (derecha) con cámara de compensación.

2.4. Biodigestor tubular o de flujo pistón

Son de forma cilíndrica horizontal y tienen un gasómetro externo (Figura 26). Se instalan en pozas hechas sobre el nivel del suelo con ladrillos y cemento; para reducir costos se pueden instalar en pozas de sección trapezoidal excavadas en el suelo. El biodigestor y el gasómetro se hacen de manga de polietileno o de geomembrana de PVC termosellado. Para facilitar su instalación, el biodigestor tiene mangas para conectar tuberías de PVC de 4" para entrada de alimentación, salida de biol y de lodos de fondo (biosol), y de 1" o 1/2" para salida de biogás.



Figura 26. Biodigestor tubular o de flujo pistón (inferior) y su gasómetro.

2.5. Biodigestor laguna cubierta

Tienen forma de tronco de pirámide invertida, excavada bajo el nivel del suelo, se impermeabilizan con geomembrana de PVC. En el perímetro del borde superior se fija la cobertura también de geomembrana de PVC. El biogás producido infla la cobertura o cúpula que sirve como gasómetro, de donde se lo extrae para su empleo como combustible. El biol pasa a la laguna contigua de donde se bombeará al campo para fertirriego de pastizales; o envasado para venta.

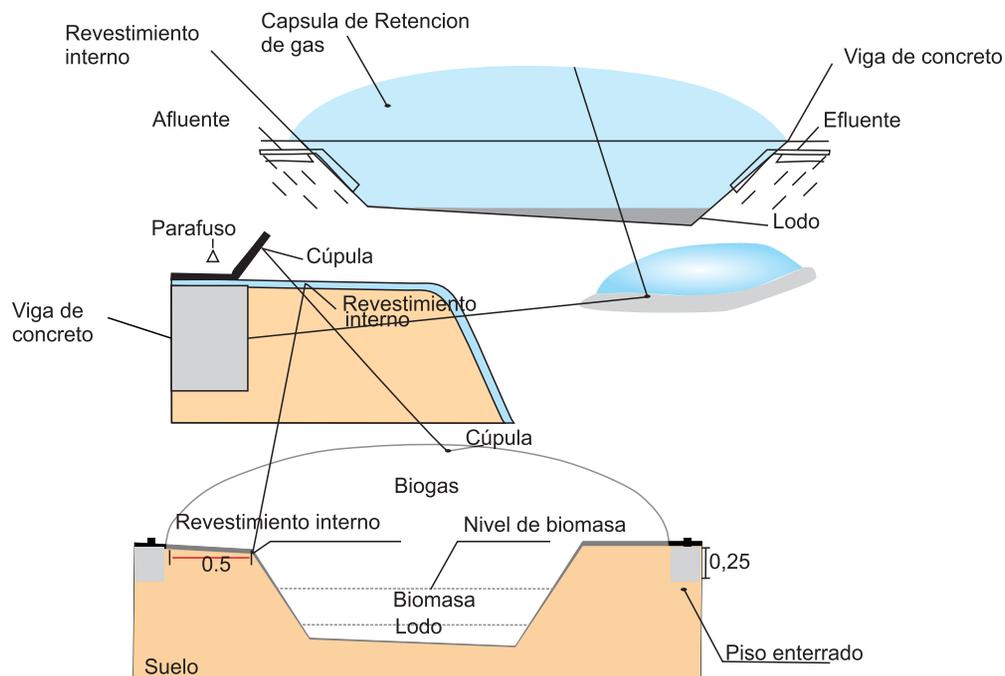


Figura 27. Esquema de un biodigestor laguna cubierta. (Cortesía de CIDELSA).



Figura 28. Biodigestor laguna cubierta instalado en la Estación El Porvenir del INIA en Tarapoto.

Capítulo 3: Biodigestor tubular

3

3.1. Diseño del biodigestor tubular

En base a los trabajos de investigación realizados a nivel de laboratorio presentados en el Capítulo 1 del presente libro, y a la experiencia ganada en la instalación, operación y mantenimiento de biodigestores tubulares; establecemos los parámetros para su diseño que se muestran en la Tabla 10, en función a la cantidad de estiércol disponible para procesar.

Tabla 10. Parámetros de diseño del biodigestor tubular

Parámetro	Valor	Unidad de medida
Cantidad de estiércol a procesar por día: CE	CE	Kg/día
Relación estiércol -agua para una buena fluidez de la alimentación y de los efluentes (biol y biosol)	1 a 5	
Cantidad de mezcla estiércol - agua por día: CM	$CM = 6 \times CE$	Kg/día o L/día
Tiempo de retención hidráulico para diseño: TRH	TRH = 45	días
Volumen de trabajo del biodigestor: VT	$VT = CM \times 45$ También $VT = 75\%$ de V	m^3
Volumen total del biodigestor: V	$V = VT/0,75$	m^3
Cantidad de biogás producido: CB	$CB = 35\%$ de VT	m^3
Longitud del biodigestor (se establece en función del espacio y los materiales disponibles): L	L	m
Diámetro del biodigestor: D	$D = (4V/(L\pi))^{1/2}$	m

Para diseñar el gasómetro se considera un diámetro igual al del biodigestor y una longitud de 2 m. El gasómetro permitirá tener más biogás disponible para atender la demanda de los usuarios.

a) Tiempo de retención hidráulico: TRH

Es el tiempo, expresado en días, que transcurre desde que se cargó el biodigestor con la mezcla estiércol-agua a su volumen de trabajo, hasta que se aprecie que el biodigestor y su gasómetro estén llenos de biogás.

Dependiendo de la temperatura ambiente, se apreciará que el biodigestor y su gasómetro estarán llenos con el biogás producido por la mezcla cargada al biodigestor al inicio: en menos días (TRH) en climas calurosos y en más días (TRH) en climas fríos. Manteniendo las condiciones de operación y con alimentación diaria a partir del TRH, el biodigestor estará en un régimen continuo de producción de biogás y de bioabonos (biol y biosol).

b) Condiciones para la producción de biogás

Se requiere estiércol fresco, máximo de cuatro días, de cualquier tipo de ganado para llenar el 75% del volumen total del biodigestor y para su alimentación diaria, a partir del día en que se observe que el biodigestor y su gasómetro estén llenos de biogás (TRH), para que la producción de biogás sea continua. Generalmente, los estiércoles tienen una relación carbono/nitrógeno (C/N) de 30/1. El biodigestor funcionará en condiciones anaeróbicas, para que el complejo bacteriano responsable de la producción de biogás actúe. Durante estas reacciones microbianas se genera calor que causará que la temperatura en el interior del biodigestor esté entre 30 y 35°C. En lugares de baja temperatura ambiental, debe cubrirse el biodigestor para evitar que pierda el calor generado en las biorreacciones y se enfríe porque reduciría o anularía la actividad microbiana responsable de su funcionamiento. El pH de la mezcla estiércol-agua con la que se alimenta el biodigestor debe estar entre 6,7 a 7,5; lo cual puede corregirse con lechada de cal (CaO + H₂O), medio kilogramo de cal en 20 L de agua.

Con los datos experimentales de TRH y temperatura ambiente, presentados en la Tabla 11, medidos en las diferentes localidades donde hemos instalado biodigestores tubulares; se hizo la gráfica TRH vs Temperatura ambiente mostrada en la Figura 29, con el software SPSS (Statistical Package for Social Science). Con este mismo software se determinó los coeficientes para escribir la ecuación logarítmica que modela la relación entre la temperatura ambiente (en °C) del lugar de instalación del biodigestor con el tiempo de retención hidráulica (en días):

$$\text{TRH} = -44,705 \ln(T) + 160,394, \text{ con un ajuste } R^2 = 0,924.$$

Tabla 11. Tiempo de retención hidráulico para la producción de biogás en función de la temperatura ambiente promedio, para biodigestores tubulares alimentados con mezcla estiércol:agua en la proporción 1 a 5

Localidad	Región	Altitud (msnm)	Temperatura ambiente promedio (°C)	Volumen biodigestor (m ³)	Tiempo de retención hidráulico (días)
Santo Tomás	Amazonas	2700	14	10	42
Pomacochas	Amazonas	2300	16	12	40
Chachapoyas	Amazonas	2350	17	12	35
Trujillo	La Libertad	33	20	6	19
Calzada	San Martín	800	24	12	18
Tocache	San Martín	600	26	36	18
Cumba	Amazonas	400	31	10	7

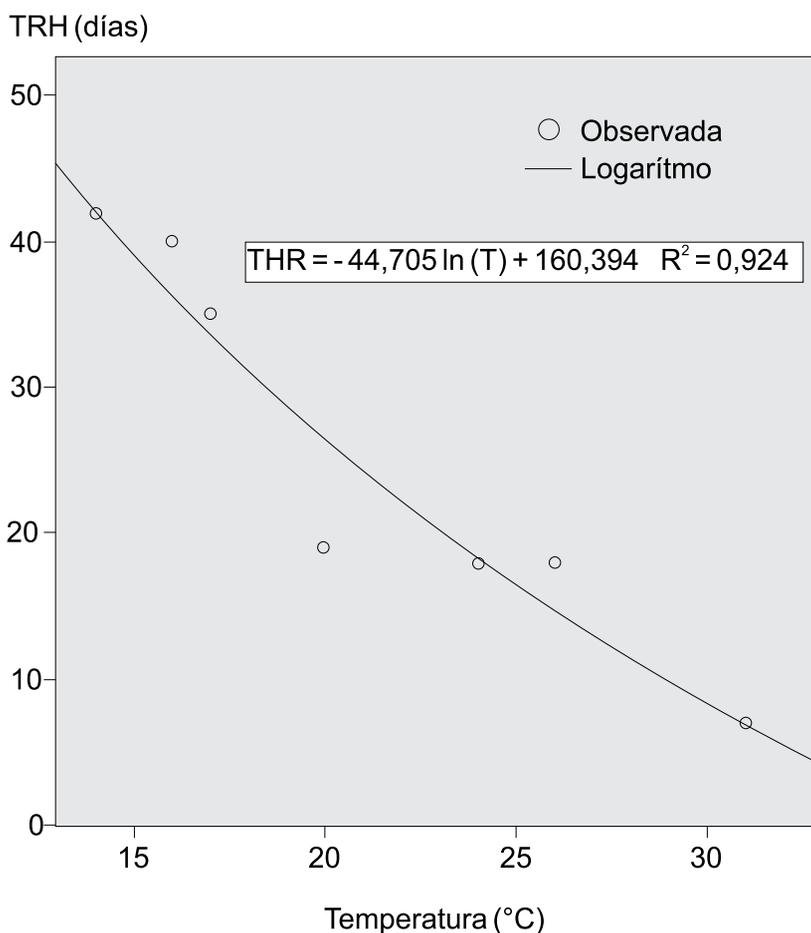


Figura 29. Tiempo de retención hidráulico (TRH) en días, en función a la temperatura ambiente (°C), de donde se instaló biodigestores.

c) Ejemplo de diseño de un biodigestor tubular

Supongamos que tenemos tres vacas lecheras y que cada una produce 12 Kg de estiércol por día. Empleando los parámetros de diseño de la Tabla 10:

Cantidad de estiércol a procesar por día: $CE = 12 \times 3 = 36$ Kg estiércol/día

Relación estiércol-agua: 1 a 5; es decir, 6 partes

Cantidad de mezcla estiércol-agua por día: $36 \times 6 = 216$ Kg/día

Para asegurar una buena descomposición de la materia orgánica (estiércol), consideramos adecuado un TRH de 45 días. Entonces, la alimentación diaria de 216 Kg/día, saldrá del biodigestor a los 45 días en forma de biol o biosol.

Volumen de trabajo del biodigestor: $216 \text{ Kg/día} \times 45 \text{ días} = 9720 \text{ Kg} = 9720 \text{ L}$

Volumen total del biodigestor: $V = VT/0,75$

$V = 9720 \text{ L}/0,75 \rightarrow V = 12960 \text{ L} = 12,96 \text{ m}^3$

El biodigestor tiene la forma de un cilindro en posición horizontal, entonces empleamos la fórmula del volumen del cilindro para calcular el diámetro (D) haciendo constante el largo o longitud (L) = 10 m: $V = L\pi D^2/4$ $D = (4V/(L\pi))^{1/2}$:

$D = ((4 \times 12,96 \text{ m}^3)/(10 \text{ m} \times 3,1416))^{1/2} = (1,65 \text{ m}^2)^{1/2} = 1,28 \text{ m}$ de diámetro.

Tabla 12. Dimensiones del biodigestor para procesar 36 Kg de estiércol por día

Dimensión	Valor
Longitud: L	10 m
Diámetro: D	1,28 m
Volumen total: V	12960 L = 12,96 m ³
Volumen de trabajo: VT	9720 L = 9,72 m ³
Volumen de almacenamiento de biogás = $V - VT = 25\%$ de V	3240 L = 3,24 m ³

3.2. Materiales para hacer el biodigestor

En el mercado están disponibles dos tipos de materiales para hacer un biodigestor tubular y su gasómetro: manga de polietileno y manta de geomembrana de PVC.

a) Manga de polietileno

Su presentación es en rollos y está disponible en diversos anchos y espesores o calibres. El rollo de manga debe estar en un dispensador de eje horizontal para el fácil desenrollado de la longitud que se compre; de no ser así, se corre el riesgo de romper los bordes por rozamiento con el piso. Debe revisarse que todos sus bordes estén en buen estado; téngase en cuenta que los cortes o picaduras de este material no se pueden parchar. De preferencia se debe comprar manga del mayor espesor posible y transparente e incolora; esto último garantiza que el polietileno del cual está hecha es de primer uso y se reduce la posibilidad que se rasgue.



Figura 30. Rollos de manga de polietileno de diferentes colores.

Por experiencia en trabajo con biodigestores de manga de polietileno, recomendamos operarlos a una presión de trabajo máxima de 4 cm de agua, a mayor presión se pueden rasgar. Su duración estimada es de dos años, porque el polietileno se reseca y se rompe.

b) Manta de geomembrana de PVC

Esta manta es hecha de policloruro de vinilo (PVC), que es un polímero flexible y de buena resistencia a la tracción. Tiene como ingredientes antioxidantes y también aditivos para protegerla de la radiación ultravioleta de manera que su duración puede superar los 5 años. Para hacer el biodigestor y su gasómetro se emplea geomembrana de 0,5 mm a 1 mm de espesor. Si se pica o se rasga se limpia bien con alcohol y trapo que no deje pelusa en las superficies a pegar y se parcha con un retazo del mismo tipo de geomembrana y pistola de aire caliente; sobre los bordes del parche pegado con aire caliente se lija y enseguida se aplica geomembrana

extruída en caliente. Por experiencia en trabajo con biodigestores de geomembrana de PVC, recomendamos operarlos a una presión de trabajo máxima de 10 cm de agua, a mayor presión se pueden deformar y se disminuye su vida útil.



Figura 31. Rollo de geomembrana de PVC.

Para hacer un biodigestor o un gasómetro, se corta la geomembrana del tamaño según el diseño, se traslapa los bordes que se sellan o sueldan con calor, con máquina que opera en promedio a 420°C, la que depende del espesor de la geomembrana, utilizando el método de soldadura por cuña caliente (hot wedge welding) (Figura 32).

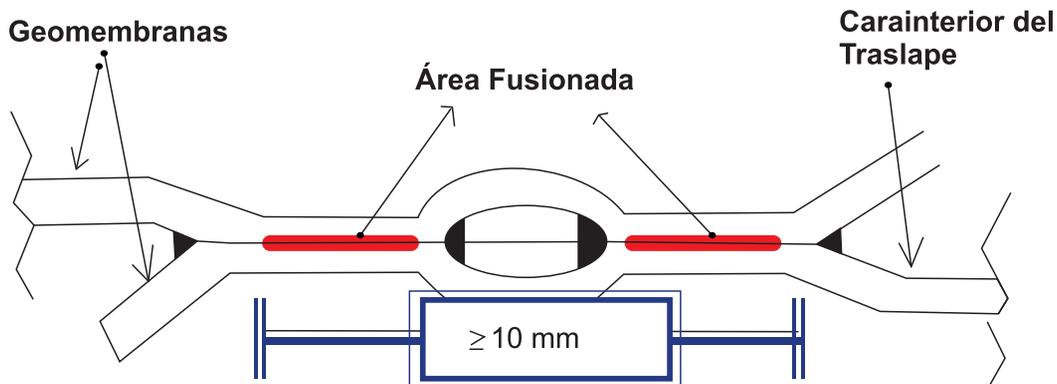


Figura 32. Sellado o soldadura por cuña caliente (hot wedge welding) de láminas de geomembrana.

3.3. Biodigestor tubular de manga de polietileno

En base a resultados experimentales a nivel de laboratorio, el primer escalamiento se realizó en el Camal Municipal de la ciudad de Chachapoyas, Región Amazonas-

Perú. A diferencia de lo explicado en la Sección 3.1, se realizará el diseño del biodigestor y de su gasómetro en función a los materiales disponibles. Para el presente caso, se dispone de manga de polietileno transparente de 1 m de ancho (2 m de circunferencia) y se hará un biodigestor de 3 m de largo.

a) Diseño

Datos disponibles:

Biodigestor tubular: $L = 3 \text{ m}$

Circunferencia de la manga = 2 m = circunferencia del cilindro: πD

Cálculos de diseño:

Diámetro del biodigestor: $\pi D = 2 \quad D = 0,636 \text{ m}$

Volumen del biodigestor: $V = \pi D^2 L / 4 \quad V = \pi (0,636 \text{ m})^2 (3 \text{ m}) / 4 = 0,955 \text{ m}^3$

Características del biodigestor diseñado:

Diámetro: 0,636 m

Longitud: 3 m

Volumen total: $V = 955 \text{ L}$

Campana de biogás (25% de V): 239 L

Volumen de trabajo para la mezcla estiércol-agua (75% de V): $V_T = 716 \text{ L}$

Producción diaria de biogás (35% de la mezcla estiércol-agua): $0,35 V_T = 251 \text{ L}$

b) Materiales

- 12 m de manga de polietileno transparente grueso, de 1 m de ancho.
- 2 tubos de PVC de 4" para desagüe, de 1 m cada uno.
- 2 cámaras de llanta de automóvil, para cortarlas en fajas de 5 cm de ancho.
- 1 unión de rosca de PVC de 1/2".

- 1 accesorio de ingreso de agua a tanque de inodoro, con rosca y tuerca.
- 2 placas de PVC de 2"x 2" con un agujero de ½" en el centro.
- 2 empaquetaduras de jebe (cámara de llanta) de 2"x 2" con un agujero de ½" en el centro.
- 1 tubo de PVC de ½" para agua.
- 1/8" de galón de pegamento para tubería de PVC.
- 1 tubo de PVC de 2" para agua, de 15 cm.
- 2 campanas de reducción de embone de 2" a ½" de PVC para agua.
- 2 uniones universales de PVC de ½", de rosca.
- 2 te de PVC de ½", de embone.
- 2 codos de PVC de ½"x 90°, de embone.
- 5 adaptadores de rosca y embone de PVC de ½".
- 10 abrazaderas de tornillo de 1".
- 6 m de manguera reforzada de PVC de 5/8".
- 2 rollos de cinta teflón.
- 0,5 Kg de clavos de 2".
- 2 esponjas de fierro para lavar ollas.
- 2 llaves de paso de PVC de ½", una de embone y la otra de rosca.
- 1 niple de fierro galvanizado de ½" x 30 cm.
- 1 niple de fierro galvanizado de ½" x 10 cm.
- 1 codo de fierro galvanizado de ½" x 90°.
- 1 botella descartable de 1,5 L.

- 10 bolsas vacías de fertilizante u otro material para hacer una cama para el biodigestor.
- 1 balde de plástico de 20 L para preparar la mezcla estiércol-agua.
- 1 cuchilla, 1 tijera y 1 arco con sierra para realizar los cortes necesarios.
- 1 desarmador plano mediano.

c) Armado del biodigestor

La manga de polietileno de 1 m de ancho y 8 m de largo, se dobló en dos partes iguales para hacer un biodigestor de 3 m de largo. Se cortó la manga y se metió una dentro de la otra, evitando que se formen pliegues o arrugas (Figura 33). Se cortó fajas de 5 cm de ancho de cámara de llanta. Se colocó dentro de la manga doble un tubo de PVC de 4" de 1 m de largo, dejando 30 cm fuera. Se plegó la boca de la manga hacia el tubo y se la sujetó firmemente con la faja (Figura 33).



Figura 33. Armado del biodigestor de 3 m de largo de manga de polietileno.

Antes de colocar el tubo en la otra boca se debe instalar el accesorio que servirá para retirar el biogás (Figura 34). Para ello, se marca el perímetro del accesorio en la parte central de lo que será el biodigestor (Figura 35) y se corta con una tijera ambas mangas. En el accesorio se inserta una placa de PVC y una empaquetadura de jebe, se coloca este conjunto en el orificio cortado en las mangas y por dentro de

lo que será el biodigestor se inserta en el accesorio la otra empaquetadura de jebe y la otra placa de PVC, luego se le coloca la rosca y se la ajusta manualmente para que selle herméticamente.



Figura 34. Accesorio de plástico con rosca de $\frac{1}{2}$ ", placas de PVC, empaquetaduras de jebe y tuerca de plástico. Se colocó en el centro del biodigestor para salida del biogás.



Figura 35. Biodigestor de manga de polietileno de 3 m de largo y 2 m de circunferencia listo para ser llenado con la mezcla estiércol-agua, en el Camal de Chachapoyas.

El área donde se instaló el biodigestor fue techada y cerrada con manta de plástico grueso. El biodigestor fue colocado en el piso, sobre una manta de plástico grueso, a lo largo de la pared y a 60 cm de distancia de ella se fijó una tabla, de manera que se forme una cama para el biodigestor (Figura 36).

Se conectó 1 m de manguera reforzada de PVC de 5/8" al accesorio de salida de biogás, asegurándolo con una abrazadera de tornillo de 1". Enseguida se procedió a preparar la mezcla estiércol-agua (1:2) para cargar el biodigestor.

d) Carga del biodigestor

La relación estiércol-agua empleada para cargar el biodigestor fue de 1:2, debido a que mayormente se empleó rumen y estiércol extraído del tracto digestivo de las reses sacrificadas en el Camal. La cantidad necesaria de estiércol para cada balde de 18 L fue: $18/3 = 6$ L, se completó con agua hasta el borde del balde, se agitó bien y se cargó al biodigestor (Figura 36). Como el volumen de trabajo del biodigestor fue de 716 L, esta preparación de mezcla se repitió 40 veces (716/18).

Los 716 L de mezcla estiércol-agua permanecieron 45 días dentro del biodigestor (tiempo de retención hidráulico). Durante este tiempo se descompuso toda la materia orgánica para producir biogás y bioabonos (biol y biosol). Para mantener la producción se debió alimentar diariamente el biodigestor con $716 \text{ L}/45 \text{ días} = 16 \text{ L/día}$ de mezcla estiércol-agua.



Figura 36. Preparación de la mezcla estiércol-agua y llenado del digestor hasta el 75% de su volumen total, el resto será ocupado por el biogás.

e) Cantidad de hierro para eliminar el H₂S

Para eliminar el H₂S que le da olor a desagüe al biogás, se calculó la cantidad de hierro necesario, empleando la estequiometría de la reacción química siguiente:



Volumen total del biodigestor: $V = 955 \text{ L}$

Campana para el biogás (25 % de V) = 239 L

Volumen de trabajo ocupado por la mezcla estiércol-agua (75 % de V) = 716 L

Producción diaria estimada de biogás (35 % del volumen de trabajo) = 251 L

H_2S producido = 0,1 % (v/v)

$H_2S = (0,1 \text{ L } H_2S / 100 \text{ L biogás}) \times 251 \text{ L biogás/día} = 0,251 \text{ L } H_2S/\text{día}$

Para 2 años de operación = 730 días

$0,251 \text{ L } H_2S/\text{día} \times 730 \text{ días} = 183,23 \text{ L } H_2S$

$V = 183,23 \text{ L } H_2S$ en 2 años de operación

$P \cdot V = n \times R \times T$; $n = P \times V / (R \times T)$

$R = 0,082 \text{ L} \times \text{atm} / (\text{mol} \times \text{K})$; $P = 1 \text{ atm}$; $T = 20 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 293 \text{ K}$

$n = 7,63 \text{ mol de } H_2S$

Siguiendo la estequiometría de la reacción química:

$$7,63 \text{ mol de } H_2S \times (1(56) \text{ g Fe} / 1 \text{ mol } H_2S) = 427,28 \text{ g Fe}$$

Se requerirá $\frac{1}{2}$ Kg de hierro como esponjas para lavar ollas para los extremos y clavos de 2" para el cuerpo del cartucho. Se hizo un cartucho para eliminar el H_2S con dos reducciones de PVC de 2" a 1/2" y un tubo de PVC para agua de 2" y 15 cm de largo. En ambos extremos se colocó esponja de hierro para lavar ollas y el cuerpo se llenó con clavos de 2" (500 g). A continuación se le pegó adaptadores de 1/2" y en ellos se enroscó uniones universales de 1/2" para fácil montaje y desmontaje. Finalmente, se lo protegió con una faja de jebe (Figura 37).



Figura 37. Armado e instalación del cartucho relleno con esponja de hierro en los extremos y clavos en el cuerpo, para eliminar el H_2S del biogás.

En el otro extremo de la manguera conectada al accesorio de salida de biogás del biodigestor, se colocó una llave de paso de plástico de ½", la que a su vez se conectó con tubería y accesorios de PVC al cartucho para eliminar el H₂S atado a las vigas del techo.



Figura 38. Preparación de la te para el balón de almacenamiento de biogás, y para el regulador de presión; a esta última se le hicieron marcas con la sierra cada 1 cm para facilitar la lectura de la presión.

Se prepararon dos tes como se muestra en la Figura 38, una para el regulador de presión de biogás en todo el sistema de producción y otra para entrada/salida del balón de manga de polietileno, donde se almacenará el biogás. Los materiales para cada una son: una te de PVC de ½", dos niples de PVC ½" de 10 cm y uno de 30 cm.

Para almacenar el biogás que producirá el biodigestor se hizo un balón o gasómetro, también de manga de polietileno, del mismo tipo que el empleado para hacer el biodigestor. La manga de 4 m de largo se dobló en dos partes iguales, se cortó y se metió una dentro de la otra, evitando los pliegues. Uno de los extremos se plegó, se dobló como codo y se lo amarró firmemente con una faja de jebe para sellar este lado. En el otro extremo se colocó la te preparada con su rama más larga dentro de la manga doble, se plegó la manga hacia esta rama y se amarró con una faja de jebe, quedando el balón listo (Figura 39).

Para regular la presión de biogás en todo el sistema, se empleó una botella descartable de 1,5 L a la cual se le hicieron dos agujeros de 2 cm de diámetro a la altura de su hombro, se le llenó con agua hasta 2/3 de su volumen y se le introdujo la rama de la te con ranuras preparada para este fin (Figura 40), marcada con la sierra de 0 a 10 cm (de cm en cm). Se introdujo 5 cm en el agua contenida en la botella; de esta manera la presión máxima del sistema será de 5 cm de agua. A una de las ramas cortas de esta te se conectó, con manguera y abrazaderas, la salida del cartucho que eliminará el H₂S; a la otra rama corta se conectó una de las ramas de la te del balón de almacenamiento del biogás. La otra rama de la te del balón se conectó,



Figura 39. Secuencia de armado del balón para almacenar el biogás.

con manguera y abrazaderas, a la llave de paso de $\frac{1}{2}$ " de plástico del quemador de biogás. El quemador fue hecho con un niple de fierro galvanizado de $\frac{1}{2}$ " x 30 cm, un codo de $\frac{1}{2}$ " x 90° y un niple de $\frac{1}{2}$ " x 10 cm del mismo material (Figura 40). Toda la línea de conducción de biogás debe ser de plástico porque varios de sus componentes con corrosivos, solamente el quemador deberá ser de metal.



Figura 40. Biodigestor de 3 m, llave de control, cartucho para eliminar el H_2S , botella con agua para regular la presión en todo el sistema, balón para almacenar el biogás y quemador con su llave.

El modelo de biodigestor instalado en el Camal de Chachapoyas fue replicado por Rafael Guadalupe Lobato en su vivienda en San Juan de Ocumal, Amazonas, Perú; pero de 5 m de largo. Este biodigestor fue cargado y se alimenta con estiércol de equinos, en la proporción estiércol-agua de 1:5, por tratarse de estiércol menos húmedo que el de vacuno. Logró una producción de biogás para funcionamiento de una cocina de dos hornillas durante 3 horas por día, suficiente para preparar los alimentos de la familia. Como se aprecia en la Figura 43, la llama de la hornilla es azul, indicador de combustión total, por ello no tizna las ollas. La mamá de Rafael está feliz porque ya no emplea leña para cocinar ni tendrá que exponerse a humos tóxicos; además, la familia ya no tendrá que talar árboles para leña. El otro beneficio son los abonos orgánicos que produce el biodigestor, que la familia los emplean para sus plantas con lo que realizan fertilización orgánica.



Figura 41. Trazado para excavar la poza de fondo curvo para el biodigestor de manga de polietileno en San Juan de Ocumal (Amazonas). Cartucho para eliminar el H_2S . Regulador de presión del sistema. Balón para almacenar el biogás.



Figura 42. Preparación de la mezcla estiércol:agua (1:5) en poza de carga y alimentación del biodigestor. Cocina lista para usar, biodigestor y balón llenos de biogás.



Figura 43. Preparación de alimentos en la cocina a biogás. Efluente del biodigestor (biol) empleado para hacer fertilización orgánica de plantas de café de la familia Guadalupe Lobato en San Juan de Ocumal, Amazonas-Perú.

La manga de polietileno es una alternativa adecuada para hacer el biodigestor y el balón de almacenamiento de biogás, teniendo la precaución, como se realizó en los escalamientos, de emplear doble manga para cada uno de estos componentes. Su duración estimada es de 2 años. Para un sistema de producción de biogás hecho de manga de polietileno, la máxima presión de trabajo que recomendamos es de 4 cm de agua.

Cuando la llama de la cocina baje debido a la disminución de la presión por el consumo del biogás, se sugiere pasar una soga o una faja por la mitad del balón de almacenamiento de biogás y se lo ajuste como se muestra en la Figura 44, de esta manera se logrará aumentar la presión del sistema y en consecuencia se levantará la llama para mejorar el funcionamiento de la cocina.



Figura 44. Ajuste de la parte central del balón de almacenamiento de biogás con una soga para aumentar la presión y la llama en la cocina.

3.4. Biodigestor tubular de manta de geomembrana de PVC

Se ha brindado asistencia técnica a instituciones y personas naturales para la instalación, operación y mantenimiento de biodigestores y sus gasómetros correspondientes, hechos de geomembrana de PVC; consideramos que éste es el material ideal para hacer los biodigestores y sus gasómetros, porque es flexible y elástico haciéndolo adecuado para zonas sísmicas, fácil de parchar en caso de rasgaduras o pinchaduras, su costo es módico y tiene una duración estimada de 10 años debido a los aditivos antioxidantes y otros que lo protegen de la radiación ultravioleta. En Lima-Perú, la empresa CIDELSA (www.cidelsa.com) fabrica estos componentes del sistema de producción de biogás, cuyas dimensiones características se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Dimensiones características de los biodigestores que fabrica CIDELSA

Componente	Largo (m)	Diámetro (m)	Vol. total (m ³)	Vol. de trabajo (m ³)	Vol. biogás (m ³)
Biodigestor 1	6,70	1,27	8,50	6,40	2,10
Gasómetro 1	2,20	1,00	1,73	1,73	1,73
Biodigestor 2	10,00	1,27	12,00	9,00	3,00
Gasómetro 2	2,20	1,00	1,73	1,73	1,73
Biodigestor 3	30,00	1,27	38,00	28,50	9,50
Gasómetro 3	2,60	1,00	2,00	2,00	2,00

El tipo de biodigestor más instalado es el de 12 m³. En las evaluaciones realizadas produce biogás para el funcionamiento de una cocina de dos hornillas durante cinco horas por día, suficiente para preparar la alimentación diaria de una familia. Además produce 200 L de biol por día. En la Figura 45 se muestra un biodigestor de este tipo, inflado con aire para facilitar su instalación; se aprecia las mangas de salida del biol (centro) y de biosol (abajo).



Figura 45. Biodigestor tubular de geomembrana de PVC inflado con aire para facilitar su instalación. (Cortesía de CIDELSA).

a) Instalación del biodigestor

Los trabajos de investigación y escalamientos realizados sobre producción de biogás, fueron de especial interés para los directivos de la Granja Ganadera de Calzada del Proyecto Especial Alto Mayo (PEAM), ubicada en el distrito de Calzada, provincia de Moyobamba, Región San Martín - Perú; quienes visitaron el biodigestor instalado en el Camal Municipal de Chachapoyas. Granja Ganadera de Calzada tiene como función brindar apoyo técnico altamente especializado a los ganaderos de la Región San Martín-Perú para el mejoramiento genético de sus hatos mediante inseminación artificial y transferencia de embriones; además de otras tecnologías para mejorar la calidad de vida de los ganaderos.



Figura 46. Frontis y sala de ordeño de Granja Ganadera de Calzada, Región San Martín-Perú.



Figura 47. Procesamiento de leche empleando leña. Se deseaba cambiar por energía renovable y amigable con el medio ambiente.

Se firmó un Convenio entre el PEAM y la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas-Perú (UNTRM), donde entre otros fines se estableció una alianza estratégica para la producción de energía sostenible, lo que implicaba

dar capacitación sobre producción de biogás a su personal e instalar un sistema completo de producción y uso de biogás y bioabonos en la granja. Sus directivos deseaban instalar un biodigestor para producir suficiente biogás para emplearlo como combustible de una cocina y procesar 100 L de leche diarios, para ya no seguir empleando el fogón a leña que tenían; a su vez, deseaban mostrar a los ganaderos que la tecnología del biogás es amigable con el medio ambiente y de fácil manejo, que contribuirá a la sostenibilidad de sus hatos ganaderos y a mejorar su calidad de vida en el campo.

A los directivos de Granja Ganadera de Calzada se les propuso instalar un biodigestor y su gasómetro hechos de geomembrana de PVC. Los cálculos de diseño se hicieron como se mostró en la sección 3.1 c) del presente libro. El fabricante fue la empresa CIDELSA (www.cidelsa.com), a quienes se les solicitó el biodigestor y el gasómetro con las siguientes especificaciones técnicas:

Biodigestor

- Medidas: 1,27 m de diámetro x 10 m de largo.
- Volumen total: 12,0 m³
- Volumen para la mezcla estiércol-agua: 9 m³
- Volumen para el biogás: 3,0 m³
- De forma cilíndrica horizontal, hecho de geomembrana de PVC de 0,6 mm de espesor, con aditivo anti UV. Con tapas selladas en ambos extremos. En el centro de una tapa tiene una manga para entrada de la alimentación, en la otra tapa una manga para salida de biol en el centro y otra para mantenimiento (salida de biosol) a ras del fondo. Las mangas son para conectar tubos de PVC de 4" de diámetro, las que se asegurarán con abrazaderas regulables de 4" de diámetro.
- En el lomo del biodigestor tendrá un niple de PVC de 1/2" de diámetro x 15 cm para salida de biogás colocado, sellado y reforzado con dos contratuercas y anillos planos de PVC de 10 cm de diámetro.
- Todas las uniones del biodigestor deben estar selladas por alta frecuencia (HF).
- Debe adjuntar un kit de reparación con 1/8 gl de pegamento y parches (retazo de geomembrana de PVC de 0,6 mm de espesor).

Gasómetro

- Función: almacenar el biogás producido en el biodigestor y tenerlo disponible para su uso en la cocina, lámpara o motor de combustión interna.
- Hecho de geomembrana de PVC de 0,6 mm de espesor, de forma cilíndrica horizontal.
- Medidas: 1 m de diámetro x 2,2 m de largo.
- Con tapas selladas en ambos extremos.
- Debe tener, en el centro de una de las tapas, un niple de PVC de ½" x 15 cm para entrada/salida de biogás al gasómetro, fijado con empaquetaduras de jebe y dos arandelas de PVC de 10 cm de diámetro.

Este equipo puede producir un mínimo de 2 m³ (2000 L) de biogás por día a una presión mínima de 5 cm de agua, suficiente para proveer combustible para procesar 100 L de leche por día e iluminación con un sistema similar al de una lámpara petromax.

El esquema de instalación del sistema de producción de biogás y bioabonos en la Granja Ganadera de Calzada se muestra en la Figura 48, donde se especifica el nombre y ubicación de cada uno de los componentes del sistema; además, las dimensiones y los materiales que deben ser empleados en la infraestructura que albergará al biodigestor.

Se aprovechó la pared y prolongación del techo de uno de los almacenes de la granja como uno de los lados de la poza que albergará al biodigestor. Para el otro lado, a 1 m de la pared, se construyó un muro con ladrillo y cemento de 10 m de largo x 1 m de alto con dos columnas equidistantes de fierro y concreto para reforzarlo y soportar el altillo o tarima de madera donde se ubicará el gasómetro. Todo el fondo de la poza estuvo a un mismo nivel (Figura 49).

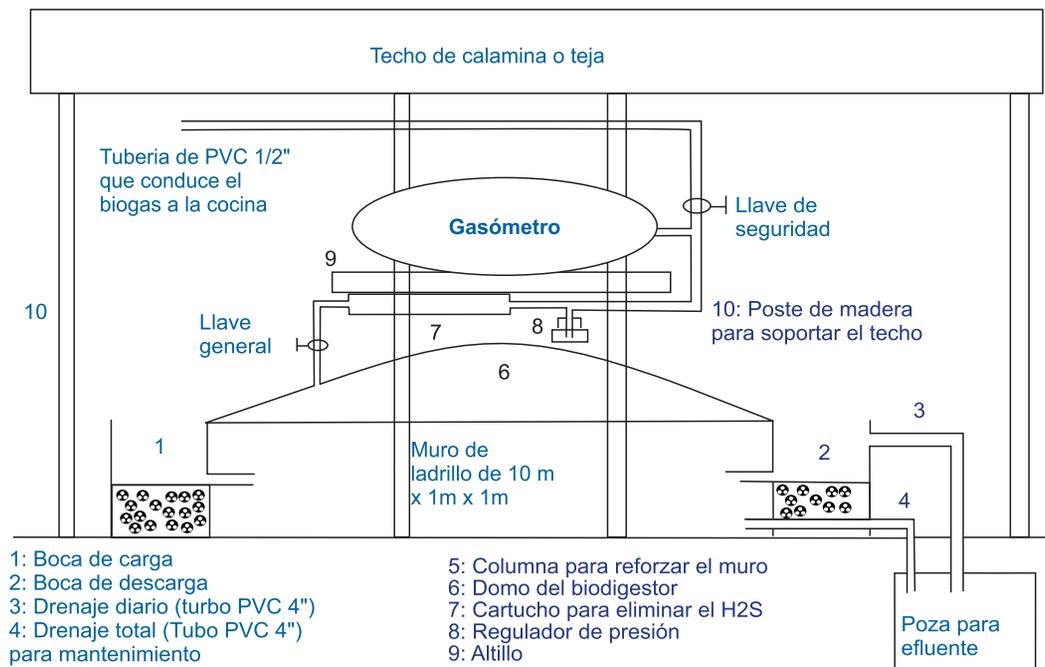


Figura 48. Esquema de instalación del biodigestor y del gasómetro en Granja Ganadera de Calzada, Moyobamba, San Martín-Perú.



Figura 49. Boca de carga, poza para el biodigestor (10 m de largo x 1 m de ancho x 1 m de alto) y al fondo boca de descarga. Se colocó tierra para eliminar el ángulo en el fondo, a lo largo de la poza para el biodigestor.



Figura 50. Colocación del biodigestor hecho de geomembrana de PVC en la poza. Accesorio para salida de biogás del biodigestor.

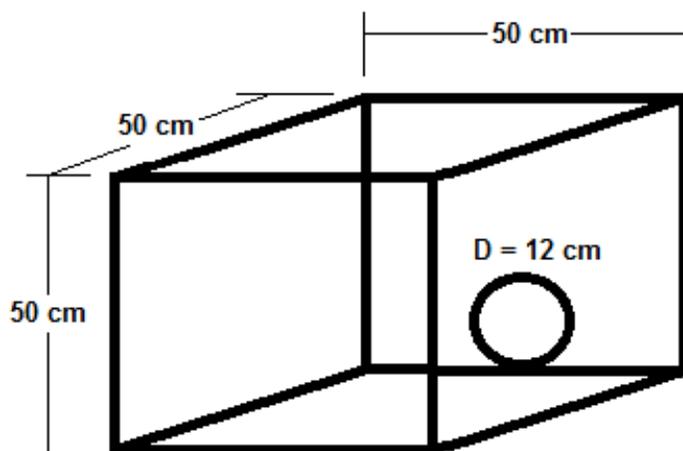


Figura 51. Dimensiones de la poza o boca de carga, similar para la poza de descarga del biodigestor.

A ras del piso de la poza o boca de carga se instaló un tubo de PVC de 4" x 50 cm de largo, al que se conectó el biodigestor empleando la manga que ya trae para este propósito. Se sujetó con una faja de 5 cm de ancho hecha de cámara de llanta, se aseguró con una abrazadera metálica de cremallera, la que fue cubierta con otra faja para evitar que afecte al biodigestor. La poza o boca de descarga de biol en el otro extremo de la poza del biodigestor, se conectó al biodigestor de manera similar. La manga para salida de biosol o de drenaje total para mantenimiento se conectó a la tubería de PVC de 4" a ras del fondo de la poza del biodigestor, en cuyo extremo de salida se colocó una reducción de PVC de 4" a 2" y un niple de 2" al que se conectó una llave de paso de 2" de plástico.



Figura 52. Conexión del biodigestor a las pozas de carga y descarga. Al fondo para drenaje total, que termina en la reducción y llave de paso de 2".

En base a un Convenio entre la Comunidad Campesina San Lucas de Pomacochas y el INDES-CES de la UNTRM, se instaló un sistema de producción de biogás y bioabonos similar en dimensiones e infraestructura al de Calzada. El Plantel de Recría de esta Comunidad se ubica a 2300 msnm y 16°C de temperatura ambiente promedio; por ello, toda esta infraestructura fue cerrada con paredes y techo, con una puerta de madera para acceso. En el techo se puso paños de cobertura transparente para iluminación natural en el interior. De esta manera el biodigestor quedó protegido de la intemperie y sobretodo del frío nocturno. Además, a todo lo largo de la poza se colocó planchas de tecnopor de 1" de espesor como aislante térmico y protector del biodigestor.

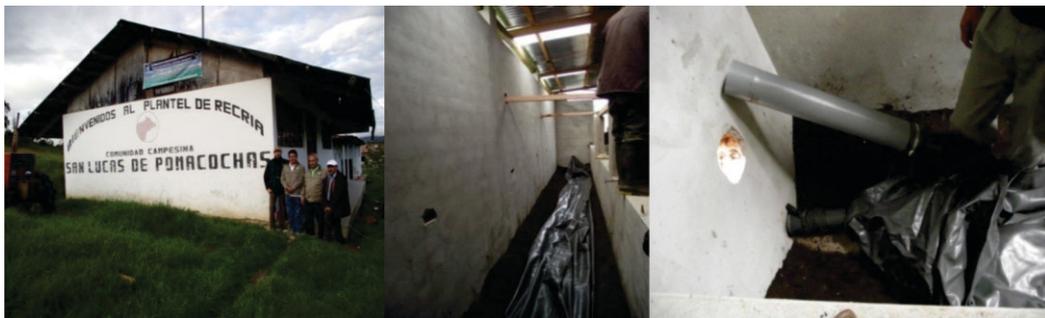


Figura 53. Ingreso al Plantel de Recría de Pomacochas. Poza con el biodigestor, al fondo conexión a la poza de carga. A la derecha, conexiones a la poza de descarga de biol y al fondo la tubería para salida de biosol.

En ambos lados de la poza de carga y descarga, los tubos se fijan firmemente con “diablo” que es una mezcla 1:1 de cemento con yeso y suficiente agua, que fragua rápidamente (Figura 54). De la misma manera se fija el tubo para salida de biosol.



Figura 54. Fijación de tuberías a las pozas de carga y descarga del sistema instalado en Pomacochas.

Una alternativa de menor costo para instalar el sistema de producción de biogás y bioabonos es emplear materiales disponibles en la zona, como la madera de eucalipto o pino para hacer los muros de la poza donde se instalará el biodigestor. Esto se hizo en el Fundo Palmeras del Sr. Pepe Goñas Gáloc y de la Ing. Marilú Chávez Guadalupe, ubicado en Puma Hermana, distrito de Molinopampa, provincia de Chachapoyas, Región Amazonas-Perú; actividad realizada en el marco del Proyecto SNIP N° 352431 “Creación de los Servicios del Centro de Investigación en Climatología y Energías Alternativas de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Región Amazonas” (PROCICEA), con la participación de los estudiantes del X Ciclo de Ingeniería Ambiental de la UNTRM Franklin Cubas Alarcón, Henry Carrasco Guevara y Perci Salazar Salazar.

El biodigestor de geomembrana de PVC de 1,00 mm de espesor, de 10 m de largo x 1,27 m de diámetro, se instaló sobre el nivel del suelo similar al de Calzada y Pomacochas, junto al cobertizo de ordeño de las vacas, empleando una de sus paredes de ladrillo de cemento y a 1 m de distancia de esta pared se construyó un muro de 1 m de alto x 10 m de largo empleando tablas clavadas en postes de madera de pino fijados en el suelo, todo el fondo de esta poza está nivelado. Las pozas de carga y descarga se construyeron de concreto armado sobre muro de adobes, los fondos de ambas pozas están a un mismo nivel. Toda el área ocupada por la infraestructura fue techada con calamina para protegerla de las lluvias (Figura 55).



Figura 55. Infraestructura para instalar el biodigestor constituida por la poza de salida de biol, tubería de fondo para salida de biosol, poza de 10 m de largo hecha de madera para el biodigestor y poza de carga o alimentación del biodigestor; en Puma Hermana, Amazonas.



Figura 56. Colocación de tecnopor en la poza para el biodigestor como aislante térmico y protector. Colocación de la llave para salida de biogás.



Figura 57. Conexión del biodigestor a la poza de carga o alimentación y fijación del tubo con "diablo" para fraguado rápido.



Figura 58. Conexión del biodigestor a la tubería de fondo para salida de biosol y a la poza para salida de biol. Colocación de la llave para salida de biosol y fijación de los tubos con “diablo”.

Para reducir costos en la instalación del biodigestor, también se recomienda excavar una poza en el suelo, de sección trapezoidal como la mostrada en la Figura 59, sin desnivel. Las cámaras de carga y descarga se harán de las dimensiones indicadas en la Figura 51, a 1 m del borde de la poza del biodigestor para darle estabilidad. Los bordes de ambas cámaras quedarán a ras del suelo (Figura 60).

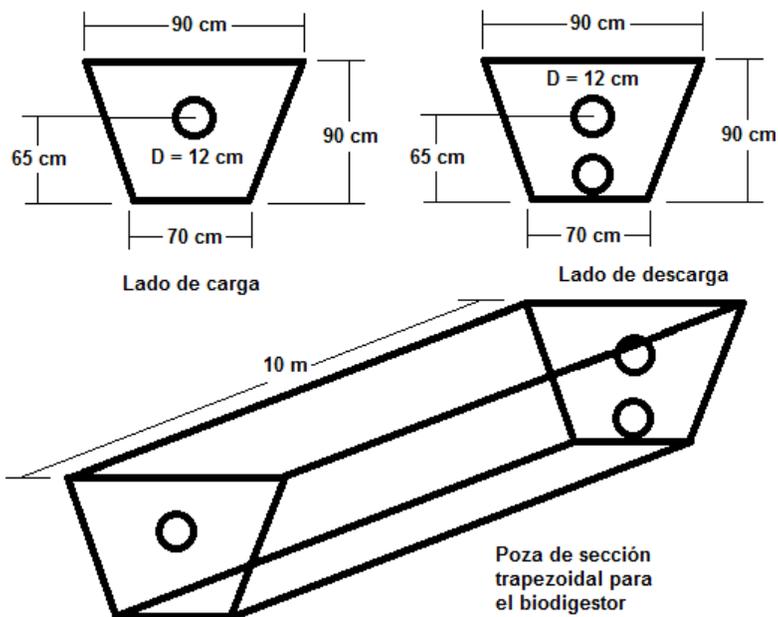


Figura 59. Dimensiones de la poza excavada en el suelo para alojar al biodigestor de 10 m de largo y 1,27 m de diámetro, sin desnivel en el fondo.

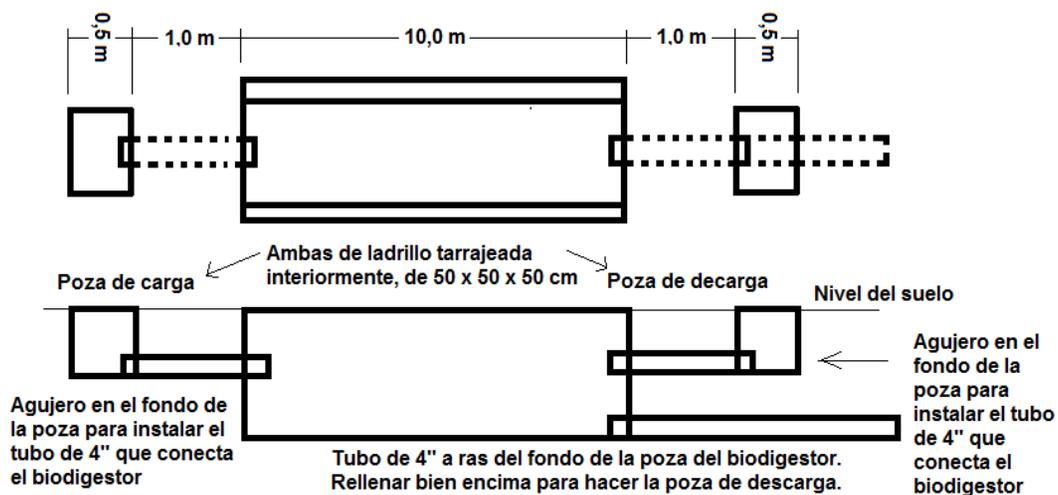


Figura 60. Ubicación de las pozas de carga y descarga y de la poza del biodigestor excavadas en el suelo.

Esta alternativa de instalación se empleó en el distrito de Santo Tomás, provincia de Luya, Región Amazonas – Perú, ubicado a 2700 msnm y temperatura ambiente promedio de 14°C. Aquí se realizó la Tesis del Ingeniero Agroindustrial de la UNTRM Nemecio Chauca Rituay, que incluyó la instalación y puesta en operación de un biodigestor para producir biogás para una cocina de dos hornillas, y el efluente se aplicó como abono orgánico para alfalfa.

Por razones de seguridad para el biodigestor y para evitar que por la noche esté expuesto a las inclemencias del tiempo, Nemecio Chauca construyó una caseta de tapial (muros vaciados de barro y piedra) de 8 m de largo x 2,5 m de ancho x 3,5 m de alto, con techo inclinado (desnivel de 1 m) de paja, con dos planchas alternadas de cobertura de plástico transparente para tener iluminación natural en el interior (Figura 61). Esta habitación tiene una puerta de acceso y no tiene ventanas; a dos metros del piso se hizo un altillo de madera donde se instaló el balón de almacenamiento de biogás, hecho de geomembrana de PVC de 0,6 mm de espesor, de 1 m de diámetro x 2 m de largo, con una sola entrada/salida de biogás. El esquema de instalación fue similar al de Calzada.

El biodigestor fue tubular de geomembrana de PVC de 0,6 mm de espesor, de 1,27 m de diámetro y 8 m de largo (10 m³), con una boca de carga, una salida de biogás, una salida de biol y una salida para evacuación total del biodigestor. Se instaló en el suelo, en una poza sin desnivel de sección trapezoidal de 8 m de largo, de 90 cm de profundidad, 70 cm en el fondo y 90 cm a ras del suelo. Afuera de la caseta, adjuntas a la pared y en dirección de los extremos del biodigestor se hicieron las pozas de carga y descarga, de ladrillo tarrajado con cemento, de forma cúbica con aristas de 50 cm; en el fondo de la cara que da al biodigestor, se colocó un tubo de PVC de 4" x 70 cm de largo, a las cuales se conectó las bocas de carga y descarga del biodigestor, respectivamente. En la salida para evacuación total del biodigestor se conectó un tubo de PVC de 4" x 3 m de largo, con su extremo reducido a 2" y cerrado con una llave de plástico de 2"; este tubo sale a ras del fondo de la poza y queda libre en su extremo aprovechando el desnivel del terreno, se empleará para retirar el biosol cada seis meses.



Figura 61. La casa de Nemecio Chauca (izquierda) y la caseta del biodigestor (derecha). El pueblo de Santo Tomás, Amazonas – Perú, está en la parte superior. A la derecha, el interior de la caseta.

En la Ganadería Renacer de propiedad del Sr. Jenrry Díaz Díaz, ubicada en el Puerto Agustín Aros Vela s/n, rívera del Río Huallaga, distrito Pólvora, provincia de Tocache, Región San Martín – Perú; a 600 msnm y temperatura ambiente promedio de 26°C; se instaló un biodigestor tubular de geomembrana de PVC de 0,6 mm de espesor, de 1,27 m de diámetro y 30 m de largo (36 m³), con una boca de carga, una salida de biogás, una salida de biol y una salida para evacuación total del biodigestor. Se instaló en el suelo, en una poza sin desnivel de sección trapezoidal, de 90 cm de profundidad, 70 cm en el fondo y 90 cm a ras del suelo (Figura 62). La poza para el biodigestor se hizo en la trayectoria del sol. A todo lo largo del biodigestor se colocó un techo a dos aguas para darle sombra, con estructura de madera y cobertura de polipropileno embreado.



Figura 62. Poza para el biodigestor. Traslado y colocación del biodigestor en la poza, como protección se colocó una manta de polietileno.

Similar instalación se hizo en la Parroquia de Cumba a cargo del Padre Juan, a una altitud de 400 msnm y 31 °C de temperatura ambiente promedio; en el distrito de Cumba, provincia de Utcubamba, Región Amazonas – Perú. Las paredes de la poza se cubrieron con planchas de tecnoport de 1” para aislamiento térmico y protección, en el fondo se colocó aserrín y encima sacos de polipropileno. El techo fue de fibraforte sobre tijerales de madera.



Figura 63. Poza para el biodigestor en Cumba.

En el curso teórico-práctico “Biogás y bioabonos: producción y aplicaciones”, organizado por el Departamento de Química Biológica y Fisiología Animal de la Facultad de Ciencias Biológicas y la Gerencia de Investigación Científica, Proyección Social y Extensión Universitaria de la Universidad Nacional de Trujillo (UNT), instalamos un sistema de producción de biogás y bioabonos similar en dimensiones e infraestructura al de Cumba, en la Estación Experimental de Bioquímica Aplicada “Dr. Julio César Arellano Barragán”, a cargo del Dr. Carlos León Torres, ubicada en la Ciudad Universitaria de la UNT, en la ciudad de Trujillo-Perú a 33 msnm y con una temperatura ambiente promedio de 20°C.



Figura 64. Poza de carga, poza con el biodigestor, poza de descarga de biol y más abajo salida para biosol; del biodigestor de la UNT.

b) Carga del biodigestor

Para lograr una buena fluidez de la alimentación, se empleó la relación estiércol-agua de 1:5 lo que equivale a 6 partes en total. Una parte será de estiércol y las cinco partes restantes serán de agua.

- 9 m³ de mezcla estiércol-agua
- $9/6 = 1,5 \text{ m}^3$ de estiércol = 1500 Kg de estiércol
- pH de la mezcla: 6,7 a 7,5; si es necesario, se corrige con lechada de cal
- La mezcla estiércol-agua se preparará en un cilindro de hierro de 200 L:
 - Estiércol = $200 \text{ L} / 6 \text{ partes} = 33,3 \text{ L} = 33,3 \text{ Kg}$ de estiércol
 - Empleando un balde de 20 L, la medida será: 1 balde + $\frac{3}{4}$ balde para cada cilindro de mezcla.
- Se midió el estiércol con el balde y se vació en el cilindro, se hizo una marca en el cilindro a la altura que alcanzaba el total de estiércol necesario, para que en adelante se adicione el estiércol con palana hasta la marca.
- Enseguida, se llenó con agua y se agitó para uniformizar la mezcla estiércol-agua; finalmente, con esta mezcla se cargó el biodigestor. Fueron necesarios 45 cilindros de esta mezcla para completar los 9 m³ que debe contener este biodigestor.



Figura 65. Medición de la cantidad de estiércol necesario. Marca en el cilindro (borde superior de la etiqueta blanca). Agitación de la mezcla estiércol-agua y carga del biodigestor.



Figura 65. (Continuación).



Figura 66. Nivel de estiércol que equivale a 33,3 Kg en el cilindro de metal o de plástico de 200 L.



Figura 67. A la vez que se va cargando el biodigestor, se lo debe ir jalando hacia arriba a todo lo largo para evitar que se formen pliegues en el fondo y el biodigestor quede deformado por ello.



Figura 67. (Continuación)

En ambos extremos del biodigestor instalado en la Ganadería Renacer, Tocache, se hicieron las pozas de carga y descarga, de ladrillo tarrajado con cemento, de forma cúbica con aristas de 1 m; a ras del fondo de cada poza y en la cara que da al biodigestor, se colocó un tubo de PVC de 4" x 70 cm de largo, a las cuales se conectó las bocas de carga y descarga del biodigestor, respectivamente. En la manga de salida para la evacuación total del biodigestor se conectó un tubo de PVC de 4" x 3 m de largo, con su extremo reducido a 2" y cerrado con una llave de paso de 2"; este tubo sale a ras del fondo de la poza, pasa por debajo de la poza de descarga de biol y se empleará para retirar el biosol cada seis meses.



Figura 68. Poza de carga y construcción de la poza de descarga del biodigestor.

Al inicio se preparó la mezcla estiércol:agua (1:5) para alimentar el biodigestor en la misma poza de carga, para lo cual se puso en la boca del tubo de 4" un tapón atado a una cuerda, se acarreó cinco carretillas de estiércol (una carretilla = 35 Kg aproximadamente) (Figura 69); conforme se adicionó agua hasta el borde de la poza, se agitó para uniformizar la mezcla. Enseguida se jaló la cuerda para retirar el tapón y permitir que la carga de 1 m³ (5 cilindros de 200 L cada uno) de mezcla estiércol:agua ingrese al biodigestor.



Figura 69. Secuencia para preparar la mezcla estiércol:agua (1:5) para alimentar el biodigestor.

Después se determinó que era más práctico y menos laborioso lavar el piso del cobertizo del ganado ubicado cerca del biodigestor, y el agua del lavado conducirla por un canal de cemento donde dos trabajadores, calzando botas de jebe, pisoteaban la mezcla estiércol:agua para uniformizarla antes que llegue a la poza de carga del biodigestor (Figura 70).



Figura 70. Alimentación del biodigestor con el agua de lavado del cobertizo.



Figura 70. (Continuación)

c) Cantidad de hierro para eliminar el H₂S

- Producción diaria estimada de biogás: 35% de la mezcla estiércol-agua:
 $0,35(9 \text{ m}^3) = 3,15 \text{ m}^3$ de biogás
- H₂S producido = 0,1 % (v/v)
 $\text{H}_2\text{S} = (0,1 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{S} / 100 \text{ m}^3 \text{ biogás}) \times 3,15 \text{ m}^3 \text{ biogás/día} = 3,15 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{S/día} = 3,15 \text{ L H}_2\text{S/día}$
- Para 2 años de operación = 730 días

$$3,15 \text{ L H}_2\text{S/día} \times 730 \text{ días} = 2299,5 \text{ L H}_2\text{S}$$

$$V = 2300 \text{ L H}_2\text{S en 2 años de operación}$$

$$P \times V = n \times R \times T; n = P \times V / (R \times T)$$

$$R = 0,082 \text{ L} \times \text{atm} / (\text{mol} \times \text{K}); P = 1 \text{ atm}; T = 20^\circ\text{C} + 273 = 293 \text{ K}$$

$$n = 95,73 \text{ mol de H}_2\text{S}$$



$$95,73 \text{ mol de H}_2\text{S} \times (1(56) \text{ g Fe} / 1 \text{ mol H}_2\text{S}) = 5361 \text{ g Fe}$$

- Se requerirá 5,4 Kg de hierro como esponja de hierro para lavar ollas para los extremos y clavos de 2" para llenar el cartucho.

Para eliminar el olor a desagüe del biogás, causado por el H₂S, producido en el sistema instalado en Calzada, se hizo un cartucho con 1,2 m de tubo de PVC de 2" pesado para agua, en un extremo se colocó dos esponjas de hierro para lavar ollas y

se le pegó una reducción de PVC de 2" a 1/2", por el otro extremo de este cartucho se adicionaron los 5,4 Kg de clavos de 2", se colocó sobre ellos dos esponjas de fierro y a continuación se le pegó una reducción de PVC de 2" a 1/2". Para conectar este cartucho con el resto del sistema se colocó en ambas reducciones uniones universales de PVC de 1/2" (Figura 71).



Figura 71. En el punto de salida de biogás del biodigestor se colocó una llave de paso de plástico de 1/2", la que se conectó con tubería y accesorios de PVC de 1/2" con el cartucho para eliminar el H₂S.

Para eliminar el ácido sulfhídrico (H₂S) de la corriente del biogás producido en el biodigestor que se instaló en la Ganadería Renacer, Tocache, se calculó que era necesario 16,6 Kg de fierro para dos años de funcionamiento, por lo que se empleó esa cantidad de clavos para madera de 2", los que se cargaron en un tubo de PVC de 2" de 3 m de largo. En ambos extremos se colocó dos esponjas de fierro, para evitar que se salgan los clavos, y se taparon con campanas de reducción de 2" a 1/2", a las cuales se pegó un adaptador de PVC de 1/2", a cada uno de ellos se enroscó con cinta teflón, para conexión hermética, una unión universal de PVC de 1/2", para su fácil acople y retiro de la tubería de conducción del biogás (Figura 72).



Figura 72. Cartucho para eliminar el H₂S del biogás.

d) Instalación del tablero de control

A continuación del cartucho para eliminar el H_2S se instaló el regulador de presión hecho de una botella descartable de gaseosa de 1,5 L, a la que se le hizo dos agujeros de 2 cm de diámetro a la altura de su hombro y se la llenó con agua hasta $2/3$ de su volumen.

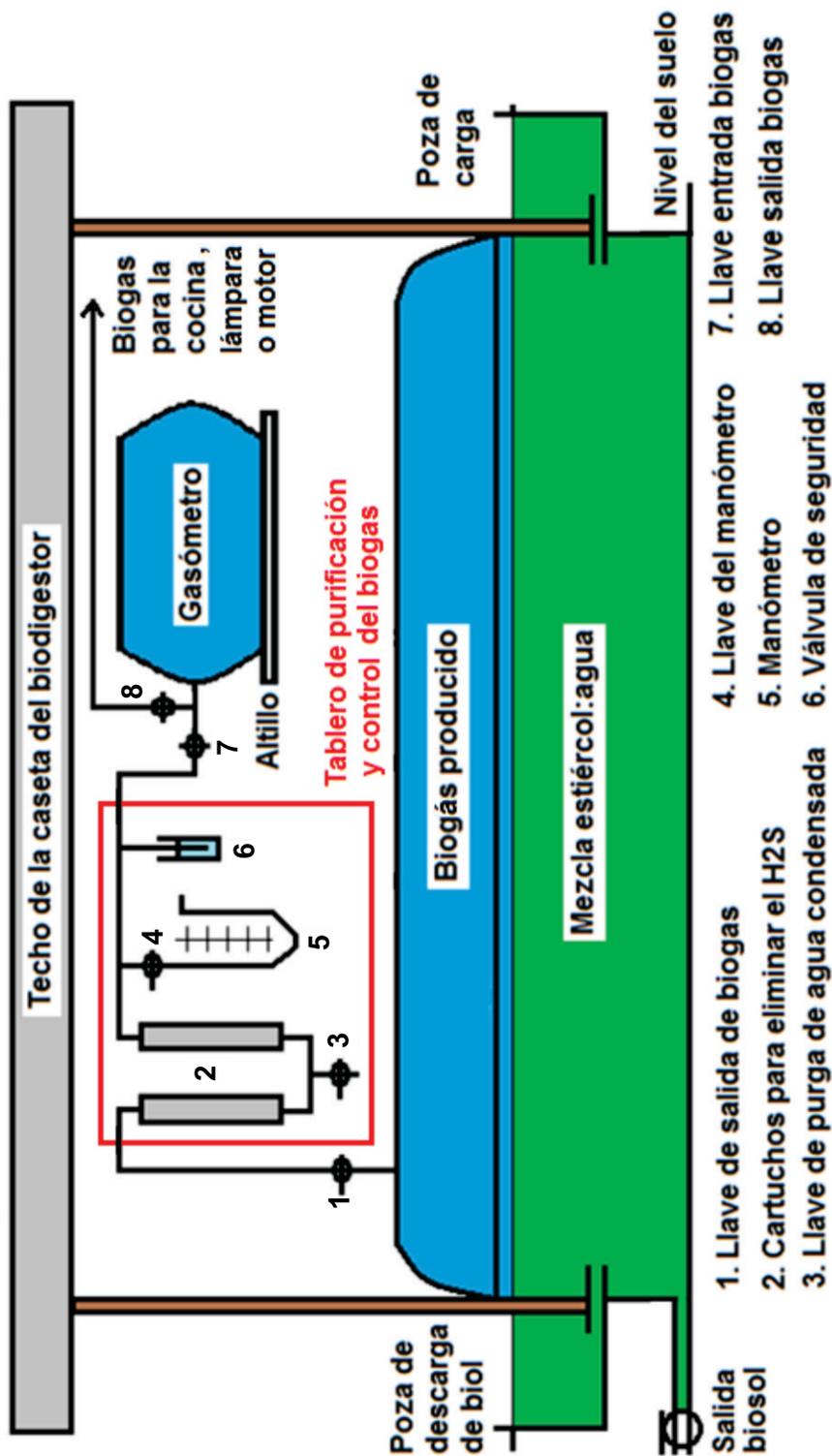


Figura 73. Regulador de presión o válvula de seguridad del sistema.

Luego se hizo una te con tubo de PVC de $\frac{1}{2}$ " , a cuya rama vertical de 30 cm de largo se le hizo ranuras cada centímetro hasta los 15 cm para visualizar mejor las lecturas de presión del sistema. Enseguida, se conectó la te a la salida del cartucho mencionado y se introdujo 10 cm de la rama vertical de la te en la botella de agua, que fue amarrada a la viga del altillo.

Para mejorar la presentación y facilitar la instalación de los cartuchos para eliminar el H_2S , junto con el manómetro y la válvula de seguridad, se los ensambla en conjunto constituyendo el tablero de control del sistema de producción de biogás como se muestra en las Figuras 74, 75 y 76.

Figura 74. Esquema de instalación del sistema de producción de biogás y bioabonos.



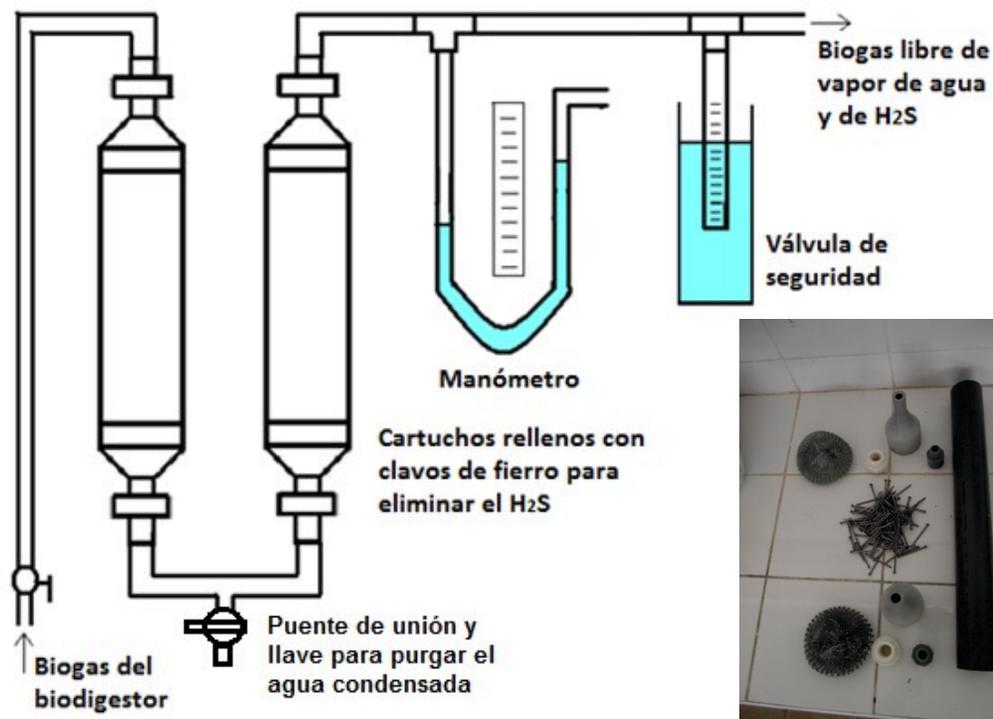


Figura 75. Tablero de purificación y control de biogás.



Figura 76. Tablero de control y purificación del biogás instalado en Pomacochas, en Providencia y en Puma Hermana, Amazonas-Perú.

Para un biodigestor de 10 m de largo y 1,27 m de diámetro, se hacen dos cartuchos para eliminar el H_2S ; de 50 cm de largo de tubo de PVC pesado de 2" que contendrán cada uno 2,5 Kg de clavos de fierro de 2". El biogás que viene del biodigestor entrará por la parte superior del primer cartucho (Figura 74), y bajará a través de éste pasando por todo el contenido de clavos y luego ascenderá por el segundo cartucho para asegurar la eliminación del H_2S . El vapor de agua de la corriente de biogás se condensará en la tubería antes de entrar al primer cartucho y retornará al biodigestor, el resto condensará en los cartuchos y se acumulará en el puente que los une; por ello, una vez al día se debe abrir y cerrar la llave de paso del puente para eliminar el agua condensada.

Los componentes del tablero de control se ensamblan sobre un panel de triplay de 1,2 m x 1,2 m y de 1 cm de espesor. El manómetro se hace de manguera de PVC incoloro y transparente de 1/4", fijado con clavos o grapas al panel dándole la forma de U. Una vez instalado, se lo llena con agua hasta la mitad de su altura. El biogás empujará el agua de la rama conectada a la tubería de conducción del biogás causando una diferencia de altura con la rama abierta a la atmósfera. La diferencia de altura del agua entre ambas ramas será la presión que ejercerá el biogás en el sistema. Para facilitar la lectura se puede colocar una hoja de papel milimétrico forrada con plástico (Figura 76).

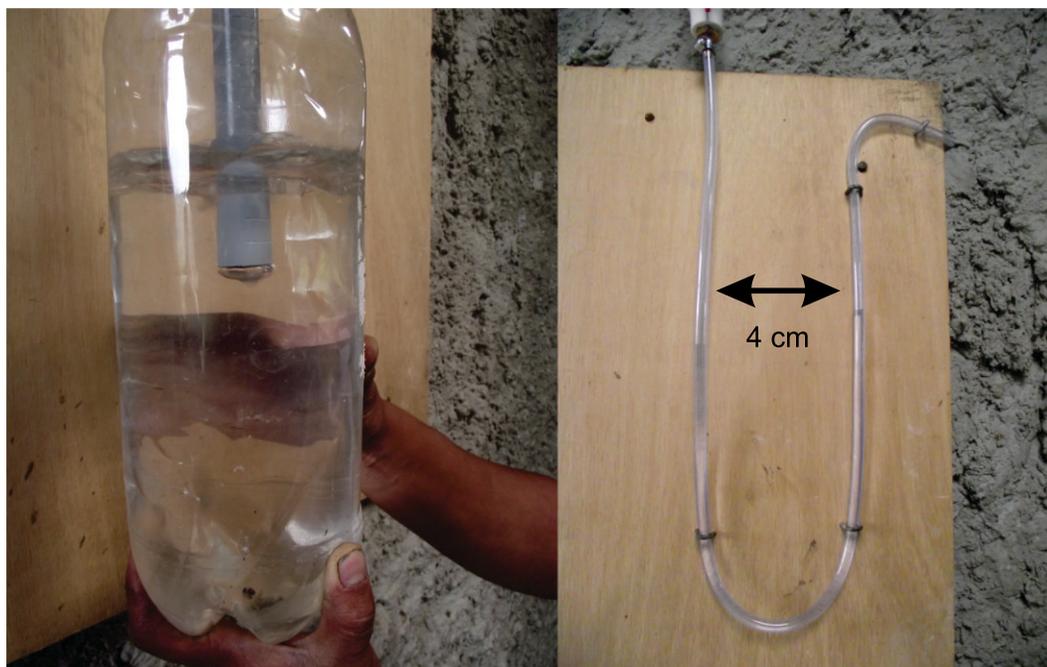


Figura 77. Presión del sistema de 4 cm de agua, leídos con la válvula de seguridad (burbuja de biogás en la boca del tubo) y con el manómetro.

El regulador de presión o válvula de seguridad del sistema de producción de biogás se puede instalar antes o después del manómetro. Sirve para fijar una determinada presión máxima de trabajo del sistema. También se puede emplear para medir la presión del sistema, para lo cual se desata la botella y se la empieza a bajar para que vaya saliendo la rama de la te que tiene ranuras; cuando se vea que salen burbujas por el extremo de esta rama (Figura 77), se cuenta el número de ranuras que quedan sumergidas en el agua de la botella, ese número será la presión del sistema expresada en centímetros de agua.

La presión de los sistemas de producción de biogás se expresa en cm de agua y es baja comparada con la presión de un balón de gas licuado de petróleo (GLP) que contiene 10 Kg de gas propano (60%) y butano (40%) para uso doméstico, cuya presión de 2,5 atmósferas que equivalen a 1900 mm de mercurio. La equivalencia de la presión en cm de agua con mm de mercurio se calcula de la siguiente manera:

$$\rho_1 \times g \times h_1 = \rho_2 \times g \times h_2$$

Siendo: (1) agua y (2) mercurio; ρ : densidad; g : aceleración de la gravedad; h : diferencia de altura entre las ramas del manómetro. En esta ecuación se elimina g por ser constante. Entonces, 10 cm de agua equivalen a:

$$(1 \text{ g/cm}^3)(10 \text{ cm}) = (13,6 \text{ g/cm}^3)(h_2) \quad h_2 = 0,735 \text{ cm de mercurio}$$

Entonces, 10 cm de agua equivalen a 7,35 mm Hg; que corresponde a 0,38% de la presión de un balón de GLP. Por ello, el riesgo que un biodigestor o su gasómetro estallen es mínimo.

e) Alimentación del biodigestor

A partir del día en que se llenó completamente la cúpula del biodigestor y su gasómetro con el biogás producido por la fermentación anaeróbica de la mezcla estiércol-agua cargada en el biodigestor al inicio, se comienza a emplear el biogás y para mantener su producción se deberá alimentar diariamente el biodigestor. Para producir bioabonos más ricos en NPK, se asume un **tiempo de retención hidráulico de 45 días**. Se calcula la cantidad de mezcla estiércol-agua que se debe alimentar diariamente al biodigestor de 12 m³ con un volumen de trabajo de 9 m³ a partir del día 46:

$$9 \text{ m}^3 / 45 \text{ días} = 0,2 \text{ m}^3 / \text{ día} = 200 \text{ L/día} = \mathbf{1 \text{ cilindro/día}}$$

La mezcla estiércol-agua (1:5) se preparará de la misma manera como ya se ha indicado para cargar el biodigestor. Cada día, después de alimentar el biodigestor se debe proceder a retirar 200 L de biol del biodigestor, de la poza de salida de biol

con un balde de plástico. De aquí en adelante, el sistema empieza a producir de manera continua biogás y bioabonos.

f) Solución a pinchaduras en geomembrana de PVC

Si el biodigestor o el gasómetro se rasgan o se pinchan, se hace un parche del mismo material (viene pegamento para PVC y un retazo de geomembrana en el empaque del biodigestor enviado por el proveedor), de un tamaño adecuado para cubrir el área afectada (Figura 78). Se limpia bien, con un trapo que no deje pelusas, el área afectada y el parche (ambos deben estar secos), enseguida se aplica el pegamento para PVC en ambos y se los une de manera uniforme para que no se formen burbujas. Se coloca un peso encima para asegurar un buen pegado. Una vez seco se puede usar el componente refaccionado.



Figura 78. Parchado de geomembrana de PVC.

3.5. Productos del biodigestor tubular

a) Biogás

Como se ha explicado en el capítulo 1 de este libro; la descomposición de la mate-

ria orgánica en anaerobiosis produce biogás, que es una mezcla de gases, cuyo principal componente es el metano. Al combinarse con el oxígeno del aire y fuego directo combustiona con llama azul, que es un indicador de combustión total y no produce tizne ni humos irritantes. Puede emplearse como combustible ecológico para cocinas, lámparas de camiseta y motores de combustión interna; como se explicará con detalle en el capítulo 4 del presente libro.

b) Bioabonos

La materia orgánica descompuesta en anaerobiosis produce biogás y bioabonos: biol y biosol; ambos para aplicación directa al suelo o a los cultivos, para incrementar su productividad de manera orgánica. La extracción de biol es diaria a partir del THR inicial; el biosol se debe extraer cada seis meses como purga de lodos de fondo del biodigestor.

La anaerobiosis, el H₂S y otros ácidos presentes, la temperatura mesofílica interna del biodigestor entre otros factores, inhiben a las esporas de los hongos que causan enfermedades a las plantas; por lo que los bioabonos son de aplicación segura. Además, se ha podido apreciar en las diversas instalaciones realizadas que se atenúa los olores y no se generan moscas en el entorno del biodigestor. Asimismo, las semillas de malezas que hayan ingresado con el estiércol al biodigestor pierden viabilidad y no germinarán cuando lleguen al suelo con el bioabono; en consecuencia, las semillas que queden atrapadas en el estiércol que se procesa en el biodigestor no generarán nuevas plantas. En la Tabla 14 se muestra el análisis químico del compost y de los bioabonos, donde se puede apreciar que los bioabonos son mejor fertilizante que el compost.

Tabla 14. Análisis químico del compost y de los bioabonos

Parámetro	Compost	Bioabono
pH (H ₂ O 1:5)	7,2	7,2
MO (W -B) 1:5	20,0	45,0
MO (Calcinac. %)	39,0	58,0
N total (Kjeldal %)	1,0	1,8
P total (%)	4,1	8,4
K total (%)	0,4	0,7
Relación C/N	19,0	25,0
N mineral (mg/Kg)	550,0	30,0
CE (dS/m)	10,1	14,4

Fuente: Varnero, 2001

En trabajos de tesis de egresados de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, realizados en la Región

Amazonas-Perú, además de emplear el biogás como combustible para cocina de dos hornillas en la que se preparan los alimentos de la familia beneficiaria, se concluyó que el biol y el biosol aplicados a parcelas experimentales de alfalfa favorecieron el enraizamiento e incrementaron su macollamiento, en consecuencia mayor cantidad de alimento para el ganado (Chauca, 2010). Actualmente, Nemecio Chauca ha incrementado las parcelas de alfalfa con lo que abastece a su granja de 1000 cuyes en promedio; también aplicó biol y biosol a cultivos de aguaymanto, ciruelo chileno, manzana Ana Israel y cerezo con excelentes resultados. En enero de 2014, Nemecio Chauca fue invitado a España para exponer en cinco comunidades su trabajo de agricultura orgánica en base a biol y biosol, además del uso del biogás para mejorar la calidad de vida en zona rural.

Nemecio Chauca también ha experimentado con un sistema de pirámide con piso de carrizo (Figura 79) para crianza de cuyes, lo que le permitió incrementar el número de cuyes por metro cuadrado en su granja, y como al primer piso no tienen acceso los cuyes, están protegidos de la humedad de sus orines que escurren de todos los pisos al suelo.



Figura 79. Alfalfa fertilizada con bioabonos para la granja de cuyes de Nemecio Chauca en Santo Tomás, Amazonas-Perú.



Figura 80. Antes y después de aplicar bioabonos para incrementar la producción de alfalfa y frutales en la propiedad de Nemecio Chauca en Santo Tomás, Amazonas.

Asimismo, Julca (2012) en el marco de su tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Agroindustrial en la UNTRM “Rendimiento del biogás como combustible para cocina e iluminación producido en digestor tubular en el distrito de Providencia, Luya – Amazonas”; aplicó biol y biosol a cultivo de café con lo que incrementó y fortaleció el follaje, la floración y la producción. Con la aplicación foliar de biol eliminó la plaga “cochinilla” del café.

Sin embargo, es necesario hacer trabajos de investigación para determinar la dilución y la frecuencia de aplicación de biol a los diversos cultivos. En los trabajos que se presentan aquí, el biol se aplicó puro al suelo de los cultivos y en diluciones 1:1 con agua como abono foliar.



Figura 81. Efecto de los bioabonos en cultivo de café en la propiedad de Jhómer Julca en Providencia, Luya, Amazonas-Perú.



Figura 82. Extremo de descarga del biodigestor instalado en Pomacochas, Amazonas-Perú. Descarga de biol y de biosol.



Figura 83. Aplicación de biosol producido en el biodigestor instalado en el Fundo UPAO II (Trujillo-Perú), a plantas de maíz y pino.



Figura 84. Aplicación de dilución 1:1 de biol y agua como abono foliar a la alfalfa en el Fundo UPAO II (Trujillo-Perú).



Figura 85. Poza de almacenamiento de biol desde donde se bombea al campo para fertirriego de pastos por aspersión en la Granja Pozo Verde, Cali-Colombia.

Otros trabajo de investigación con bioabonos, se realizó en el Fundo Palmeras del distrito de Molinopampa en la Región Amazonas, donde Cubas (2018) en su tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental en la UNTRM “Implementación y rendimiento de un sistema de producción de biogás y bioabonos de 12 m³ a partir del estiércol de ganado bovino en el Fundo Palmeras, Puma Hermana, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas-Perú”; aplicó bioabonos en 12 parcelas de 2 m x 4 m de pasto Nicarion para el ganado, procedente de un biodigestor hecho

de geomembrana de PVC de forma cilíndrica horizontal, con aditivo anti UV, con las siguientes características: 1,27 m de diámetro x 10 m de largo, lo que hace un volumen total de 12 m³, su volumen de trabajo es de 9 m³ ocupado por la mezcla estiércol:agua y los 3 m³ restantes son ocupados por el biogás producido.. Los pastos con bioabonos se desarrollaron un 50% más, comparado con los testigos, que no recibieron ningún tratamiento

4

Capítulo 4: Aplicaciones del biogás

En trabajos de tesis realizados con egresados de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas - Perú, y con estudiantes de Maestría en Recursos Naturales y Energías Renovables de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Arte (Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst: HAWK) de Göttingen – Alemania; se ha evaluado la producción y aplicaciones del biogás y de los bioabonos. En esta sección se mostrará los resultados de la aplicación del biogás como combustible.

4.1. Cocina a biogás

El biogás es un excelente combustible ecológico para cocinar los alimentos, arde con llama azul, “no tizna ni humea”. En la Figura 81 se muestran las dimensiones para hacer una cocina a biogás de estructura de varilla de hierro de 3/8”, con dos hornillas o quemadores de aluminio de 4” y de 6”. Cada hornilla tiene un niple de hierro galvanizado de 1/2” y en el otro extremo se enrosca un codo de PVC al que se conecta la llave de paso y el resto de las conexiones (Figura 86).

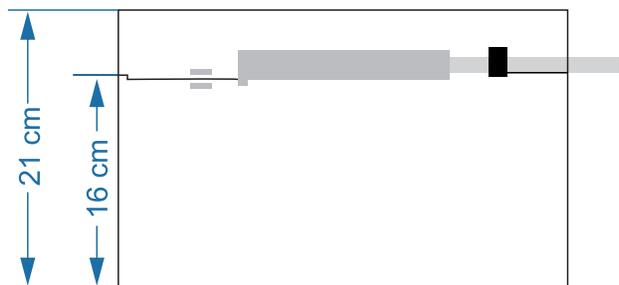
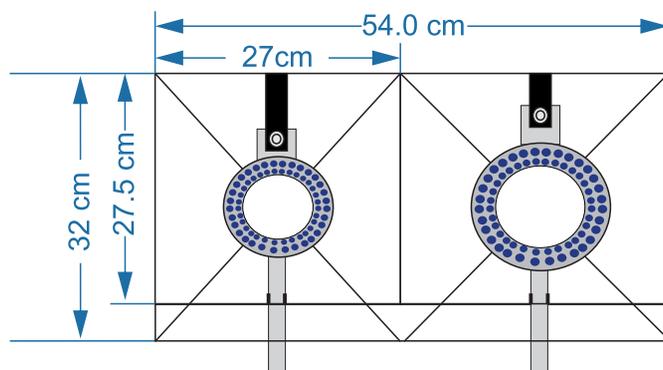


Figura 86. Dimensiones para hacer una cocina a biogás de dos hornillas.
Dibujo de J. Schulteis.

En Santo Tomás, provincia de Luya, Región Amazonas – Perú; la producción inicial de biogás tuvo un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 42 días. La producción de biogás permite que la cocina de dos hornillas funcione 5 horas/día, tiempo suficiente para la preparación de los alimentos de la familia (Figura 88).



Figura 87. Primera prueba de la cocina a biogás en Santo Tomás. 4 L de agua hirvieron en 18 minutos.



Figura 88. Caseta donde se instaló el biodigestor en Santo Tomás y preparación de alimentos en la cocina a biogás.

El biodigestor instalado en la Ganadería Renacer, Tocache, Región San Martín – Perú (Figura 89); tuvo un TRH de 18 días y alcanzó una presión de 10 cm de agua. El biogás se emplea como combustible para una cocina industrial de dos hornillas adaptada a biogás, para lo que se retiró el niple de bronce de la llave que regula el paso de gas (GLP) a la hornilla. El niple sirve como una válvula de expansión para el GLP (60% de propano y 40% de butano) contenido en un balón de acero a 2,5 atmósferas (1900 mm Hg) de presión. Debido a la baja presión de operación de los biodigestores (máximo 10 cm de agua), el biogás no puede pasar a través del niple. Como prueba inicial del consumo de biogás, se puso en una hornilla una olla con 10 L de agua, la que se dejó que hierva durante dos horas, lo que ocasionó un consumo de 2000 L de biogás aproximadamente, pues el balón que estaba conectado a la cocina se desinfló casi hasta la mitad (Figura 89).



Figura 89. Biodigestor de la Ganadería Renacer en producción a los 18 días de cargado. Seis personas están sobre la campana del biodigestor llena con biogás. La cocina no tizna la olla.

En Pomacochas, Región Amazonas – Perú, la producción de biogás tuvo un TRH de 40 días (Figura 90). El biogás se emplea como combustible para cocina (Figura 91 y 92) y para motores de combustión interna como se mostrará en la sección 4.3. Cuando la presión del sistema de producción de biogás y bioabonos es de 10 cm de agua, la llama azul de la hornilla de la cocina alcanza hasta 60 cm de altura y puede abrazar a la olla (Figura 92). Para un uso racional del biogás se debe ir cerrando suavemente la llave hasta lograr una llama adecuada en la hornilla para preparar los alimentos.



Figura 90. Biodigestor en operación en Pomacochas, a 10 cm de presión de agua.



Figura 91. Un litro de agua hierve en 9 minutos en la cocina a biogás de Pomacochas.



Figura 92. Cocina a biogás en Pomacochas.



Figura 93. Biodigestor instalado en Granja Ganadera de Calzada.

En Granja Ganadera de Calzada, Región San Martín–Perú, el TRH fue de 18 días. El biogás producido se emplea como combustible para procesar en promedio 140 L de leche/día, para elaborar yogurt y queso. Permite elaborar productos lácteos en mejores condiciones sanitarias y laborales (Figura 94).



Figura 94. Antes y después de aplicar la tecnología del biogás en Calzada.



Figura 95. Biodigestor instalado en el Campus de la UNTRM, operando a 4 cm de presión de agua.

El biodigestor instalado en el Campus de la UNTRM de Amazonas – Perú (Figura 95), tuvo un TRH de 35 días; mientras que el biodigestor instalado en el Campus de la Universidad Nacional de Trujillo (UNT), Región La Libertad – Perú (Figura 96),

tuvo un TRH de 19 días. Ambos sistemas de producción de biogás y bioabonos se emplean como un módulo de enseñanza para los estudiantes y un módulo para divulgación de esta tecnología a la comunidad. El biodigestor instalado en la Casa Parroquial de Cumba, Región Amazonas – Perú (Figura 97), tuvo un TRH de 7 días, produce biogás para la cocina y bioabonos para la plantación de cítricos del Padre Juan, Párroco de Cumba.

Todos los sistemas de producción de biogás y bioabonos instalados están funcionando, brindan beneficios a sus usuarios y al medio ambiente; además, sirven como un módulo de enseñanza y divulgación de la tecnología del biogás.



Figura 96. Biodigestor instalado en la UNT.



Figura 97. Biodigestor en la Parroquia de Cumba a cargo del Padre Juan.

Para determinar el consumo diario de biogás en una cocina familiar se realizaron mediciones durante el uso de dos hornillas. La Tabla 15 muestra el tiempo necesario para la preparación de comidas típicas de zonas rurales. Las cantidades de comida preparadas fueron de 1 Kg o 1 L. En zonas rurales, normalmente se prepa-

ra los alimentos una vez al día para el almuerzo, para la cena solo calientan los alimentos que quedaron del almuerzo. Adicionalmente hierven agua para té o café (Barrena-Gurbillón *et al.*, 2015).

El consumo de biogás cambia drásticamente con la posición de la llave de paso de las dos hornillas de la cocina; también es importante considerar si solo una hornilla o las dos hornillas juntas son utilizadas. Con una presión inicial de biogás de 4,5 cm de agua, las dos hornillas funcionan 7 horas con las llaves totalmente abiertas hasta que el biogás en el gasómetro está agotado completamente. Esta posición de las llaves es un escenario extremo y hace posible una altura de llama de 50 cm que no es adecuado para cocinar porque envuelve a la olla haciendo un consumo exagerado de biogás. Con una posición de las llaves más cerradas sería posible un tiempo de funcionamiento de la cocina más largo (Barrena-Gurbillón *et al.*, 2015).

Tabla 15. Tiempo para la cocción de alimentos típicos de zonas rurales

Alimento	Tiempo para cocción (min)					Promedio (min)
Agua	15,5	17	14,	14,5	17,75	15,75
Arroz	47	41	37	30	32	37,4
Papa	50	45	37	37	37	43,5
Plátano	60	63	56	56	58	58,6
Frijoles	52	60	48	40	38	47,6
Carne	71	65	66	59	57	63,6
Sopa	73	69	65	74	67	69,6

Fuente: (Barrena-Gurbillón *et al.*, 2015)

El consumo de biogás por hora en la cocina varía mucho y requiere entre 2 cm y 5 cm de presión de agua. El consumo depende de la presión inicial en el sistema y de la posición de las llaves de paso de las hornillas. Con un tiempo de cocción diario de una hora y media se necesitaría un consumo de gas entre 3 cm y 7,5 cm de presión de agua. La hornilla pequeña puede ser utilizada hasta el vaciado completo del gasómetro por lo que no es necesaria ninguna presión especial adicional para que funcione. Si las dos hornillas están prendidas al mismo tiempo, la hornilla grande se apaga antes (Hellenthal, 2013).



Figura 98. Cocina a leña y a gas propano que son reemplazadas eficientemente por cocinas a biogás.



Figura 99. Cocinas industriales habilitadas para funcionar a biogás en reemplazo de cocinas a leña, para mejorar la calidad de vida en zona rural.

4.2. Lámpara a biogás

En el Perú, se empleaba kerosene (un derivado del petróleo) como combustible para cocinas y lámparas de uso doméstico. Sin embargo, el Decreto Supremo N° 045-2009-EM, prohíbe la venta de kerosene y Diesel 1 a nivel nacional y establece el Programa de sustitución de consumo doméstico de kerosene por gas licuado de petróleo (GLP) y sustitución de cocinas a leña por cocinas mejoradas a leña.

Es una lástima que no se haya incluido como sustitutorio del kerosene al biogás, que es una fuente de energía ideal para zonas rurales, además reduce la contaminación de la vivienda y la tala para leña. Quizá se deba a que no se ha difundido esta tecnología junto con los beneficios que genera para mejorar la calidad de vida y la inclusión social, sobre todo del poblador rural.

El biogás producido en el biodigestor instalado en el Campus de la UNTRM se emplea como combustible para cocina, lámpara (Figura 100) y motores de combustión interna. Sirve como módulo demostrativo y se han realizado varios cursos teórico-prácticos para difundir la tecnología del biogás.

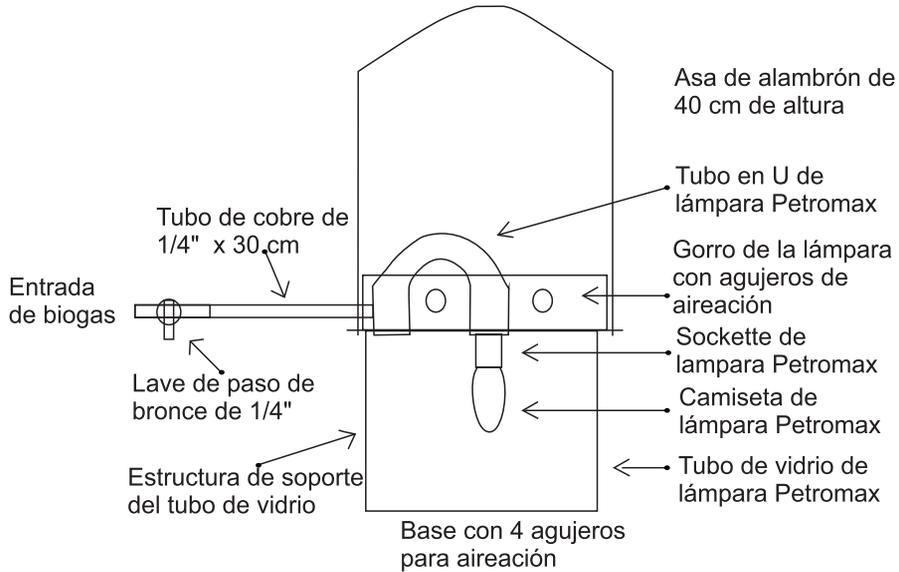


Figura 100. Esquema de la lámpara a biogás en el Campus de la UNTRM.

Las lámparas a gas propano pueden funcionar a biogás, para ello se debe retirar el niple de bronce (válvula de expansión en el círculo rojo de la Figura 101) de la llave de paso de biogás y volver a ensamblar la lámpara. A esta lámpara adaptada se le debe hacer un asa larga de alambre galvanizado para colgarla de una viga. De esta manera se tiene un sistema seguro para iluminación con biogás para vivienda en zona rural, como se hizo en la plantación de café de Jóhmer Julca Noriega, en Providencia, Región Amazonas – Perú (Figura 102), en el marco de su tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Agroindustrial en la UNTRM. El tiempo de uso de la lámpara depende del lugar, en la vivienda de la chacra necesitan menos luz que en una vivienda urbana. En la chacra se utiliza la lámpara más o menos una hora diaria, en viviendas urbana hasta tres horas. Se determinó que el consumo de biogás en la lámpara ocasiona una disminución de presión de 2 cm cada hora. Es posible utilizar la lámpara hasta el vaciado completo del gasómetro. No es necesaria ninguna presión mínima para encenderla, sólo la luminosidad baja con la disminución de la presión del biogás (Hellenthal, 2013).



Figura 101. Lámpara adaptada para funcionar a biogás.



Figura 102. Lámpara a biogás en Providencia, Región Amazonas – Perú.

4.3. Motores a biogás

En el año 2008, en el marco de una pasantía de investigación y fortalecimiento de capacidades en energías renovables, en Colombia; se visitó la Granja Pozo Verde en Cali para conocer del proyecto de investigación realizado por la Fundación Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria del Valle (CIPAV). El biodigestor es de manga de polietileno calibre 800, protegido con resina contra la luz UV, de 1,25 m de ancho y 24 m de largo, de operación continua donde se procesa el estiércol de la granja de cerdos y opera a 4 cm de presión de agua. El H_2S se elimina en un cartucho de tubo de PVC de 6" de diámetro por 2 m de largo relleno con 2/3 de viruta de fierro y 1/3 de esponja de fierro (en la entrada y en la salida).



Figura 103. Biodigestor de la Granja Pozo Verde, Cali – Colombia. La flecha señala el regulador de presión del sistema.



Figura 104. Drenaje de agua, balón de manga de polietileno para almacenar el biogás para los motores y segundo cartucho para eliminar el H_2S remanente.

El biogás se conduce a través de una tubería de PVC de 1,5" hasta el hangar donde están los grupos electrógenos, en esta tubería hay un ramal en T (Figura 104) que permite eliminar el agua condensada. De esta manera llega el biogás sin H_2S y sin vapor de agua para emplearlo como combustible de motores a combustión interna a petróleo. Del balón de almacenamiento se conduce el biogás por tubería de PVC de 1,5" hacia el filtro de aire de cada motor, por donde ingresa para su combustión en los cilindros.

Se debe tener en cuenta que un motor petrolero no tiene bujías y que la combustión del petróleo en los cilindros ocurre por la elevada compresión; por ello, no se puede reemplazar el 100% del petróleo por biogás. En la Granja Pozo Verde tienen un motor Blackstone de 3 cilindros, 100 kW de potencia (135 HP), 600 rpm, acoplado a generador eléctrico de 92 kW, en este motor se reemplaza el 47% del petróleo diesel por biogás; y un motor Perkins de 6 cilindros, 74 kW de potencia (100 HP), 1800 rpm, acoplado a generador eléctrico de 63 kW, en este segundo motor se reemplaza el 67% del petróleo diesel por biogás.



Figura 105. Motores Blackstone y Perkins de la Granja Pozo Verde, Cali – Colombia, que funcionan con la mezcla petróleo diesel y biogás.



Figura 106. Tablero de control de la energía eléctrica generada por los grupos electrógenos de la Granja Pozo Verde, Cali – Colombia.

Los motores de combustión interna a gasolina tienen bujías que generan una chispa eléctrica casi al final de la etapa de compresión, para dar inicio a la combustión. Por ello, se puede reemplazar el 100% de la gasolina por biogás, lo que se muestra en las Figuras 107 y 108; en demostraciones con el apoyo de Evans Tejedo Soberón, mecánico de motocicletas, en las que se hizo funcionar dos motocicletas a biogás. Estos logros motivaron a Evans Tejedo para hacer su tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Agroindustrial en la UNTRM, en la que se adaptó el motor a gasolina de 2,4 hp de un grupo electrógeno de 1 kW para que funcione a biogás y también el motor a gasolina de 9 hp de una picadora de pasto. Las evaluaciones se hicieron en el Campus de la UNTRM y en la Estación Experimental de Pomacochas del INDES-CES de la UNTRM.



Figura 107. Motocicleta Yamaha de 200 cc funcionando a biogás en la UNTRM.

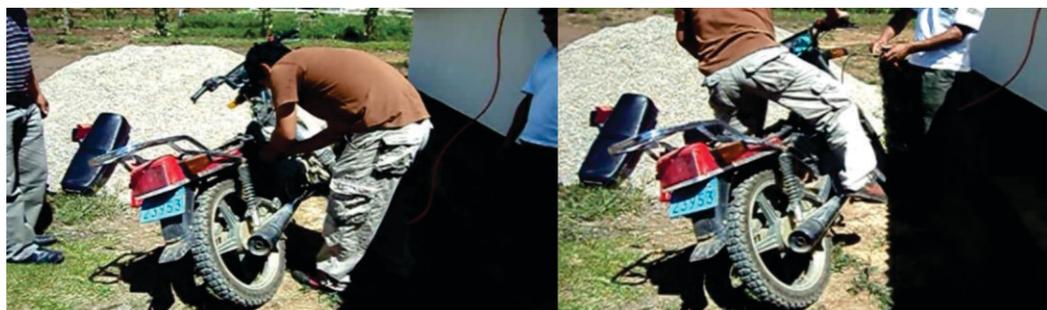


Figura 108. Motocicleta de 125 cc funcionando a biogás en la UNTRM.



Figura 108. (Continuación).

Para adaptar el motor a biogás se construyó un dispositivo en forma de T, con accesorios de PVC de $\frac{1}{2}$ " y una llave de compuerta de bronce de $\frac{1}{2}$ " para regular el paso del biogás. Para el ingreso de la mezcla biogás-aire al carburador se empleó accesorios de PVC de $1\frac{1}{2}$ ", en el extremo una llave de paso de $1\frac{1}{2}$ " de plástico para regular el ingreso de aire (Figura 109 y 110). Este dispositivo se conectó en el lugar del filtro de aire del motor.

El grupo electrógeno a biogás produjo 244 W (24,4 % de la generada por el mismo motor a gasolina) para el encendido de un foco de filamento de 100 W y 8 focos ahorradores de 18 W cada uno (Figura 109). El arranque se hizo con gasolina y luego se pasó a operación con biogás (Tejedo y Yopán, 2014). Aunque el motor reduce su potencia nominal, produce energía para el funcionamiento de 8 focos ahorradores de 18 W que iluminan como foco de filamento de 80 W, suficientes para la iluminación de varios ambientes de la vivienda en zona rural.

Con un dispositivo con los mismos componentes empleados para el grupo electrógeno, conectado en el lugar del filtro de aire, se adaptó el motor gasolinero de 9 hp de la picadora de pasto (Figura 110) con el que funcionó a biogás sin problemas como se aprecia en la Figura 111. La llave de compuerta de bronce permite regular finamente el paso del biogás al motor hasta estabilizar su funcionamiento. El arranque se hizo con gasolina y luego se pasó a operación con biogás (Tejedo y Yopán, 2014).



Figura 109. Grupo electrógeno a biogás en Pomacochas. Hace funcionar 8 focos ahorradores de 18 W.



Figura 110. Dispositivo para hacer funcionar el grupo electrógeno de 1 kW; y otro para hacer funcionar el motor de 9 hp de la picadora de pasto. Ambos a biogás.



Figura 111. Picadora de pasto a biogás en Pomacochas.

Durante la pasantía de investigación y fortalecimiento de capacidades realizada el año 2012 en Pirassununga, Estado de Sao Paulo – Brasil, se visitó la Hacienda de la Fuerza Aérea de Brasil (FAYS), donde tienen instalado un biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC) para procesar el estiércol de su granja de cerdos. El biogás producido se emplea como combustible para un grupo electrógeno con motor Ford de 6 cilindros, con el que se suministra toda la energía eléctrica que requiere la granja de cerdos. El sistema de tratamiento de efluentes de la granja es autofinanciado por la energía eléctrica que produce (Figura 112).



Figura 112. Biodigestor de la Hacienda de la Fuerza Aérea de Brasil.



Figura 113. Biodigestor que abastece al motor Ford de 6 cilindros a biogás acoplado a generador eléctrico de la granja de cerdos de la Hacienda de la FAYS en Pirassununga.



Figura 114. Motor Ford de 6 cilindros a biogás acoplado a generador eléctrico de la granja de cerdos de la Hacienda de la FAYS en Pirassununga.

El otro efluente del biodigestor tipo laguna cubierta de la FAYS es el biol, que por rebose del biodigestor pasa a la laguna de forma de tronco de pirámide invertida, excavada en el suelo e impermeabilizada con geomembrana de PVC; donde es aireado por un agitador accionado con motor eléctrico montado sobre una balsa. De aquí el biol es bombeado al campo para hacer fertirriego para pastizales.



Figura 115. Laguna para almacenar biol para fertirriego.



Figura 115. (Continuación)

En base a los trabajos de investigación para adaptar y evaluar motores de combustión interna a biogás en la UNTRM, se tomó la decisión de hacer un vehículo que funcione a gasolina y a biogás. El objetivo fue diseñar y construir un mini automóvil que funcione a biogás en el Laboratorio de Mecanización de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias de la UNTRM. El plano mini automóvil fue dibujado por el estudiante de Ingeniería Agroindustrial de la UNTRM Roy Dennis Alvis Tuesta, con el software CAD para modelamiento SOLIDWORKS versión 2016; con la asesoría del Dr. Miguel Barrena Gurbillón y del Mg. Meregildo Silva Ramírez; considerando los siguientes términos de referencia:

- Espacio suficiente para dos asientos con espaldar para comodidad del conductor y del pasajero.
- Diseño ergonómico para personas con talla promedio de 1,70 m.
- Estructura de tubo de acero estructural de 1" para el chasis y la cabina, con los refuerzos para dar seguridad a los pasajeros ante impactos laterales, frontales o posteriores; y también en caso de vuelco.
- Suspensión con doble trapecio y un amortiguador independiente en cada eje delantero, con las rótulas correspondientes.
- La estructura del chasis y la cabina del vehículo es acoplada, con bisagras reforzadas, a la estructura posterior donde se instalará el motor; además, tendrá un amortiguador en cada lado para una suspensión suave.
- Un solo eje posterior de 1,5" de diámetro, sujeto en chumaceras que se empernan a la estructura posterior, con bocamasa en ambos extremos para fijar las ruedas con pernos. En este eje se fijan con chaveta y prisioneros una bocamasa para la catalina y otra bocamasa para el freno de disco.
- Dirección de cremallera y timón de automóvil para viraje suave en la misma dirección y simultáneo de ambas ruedas delanteras.

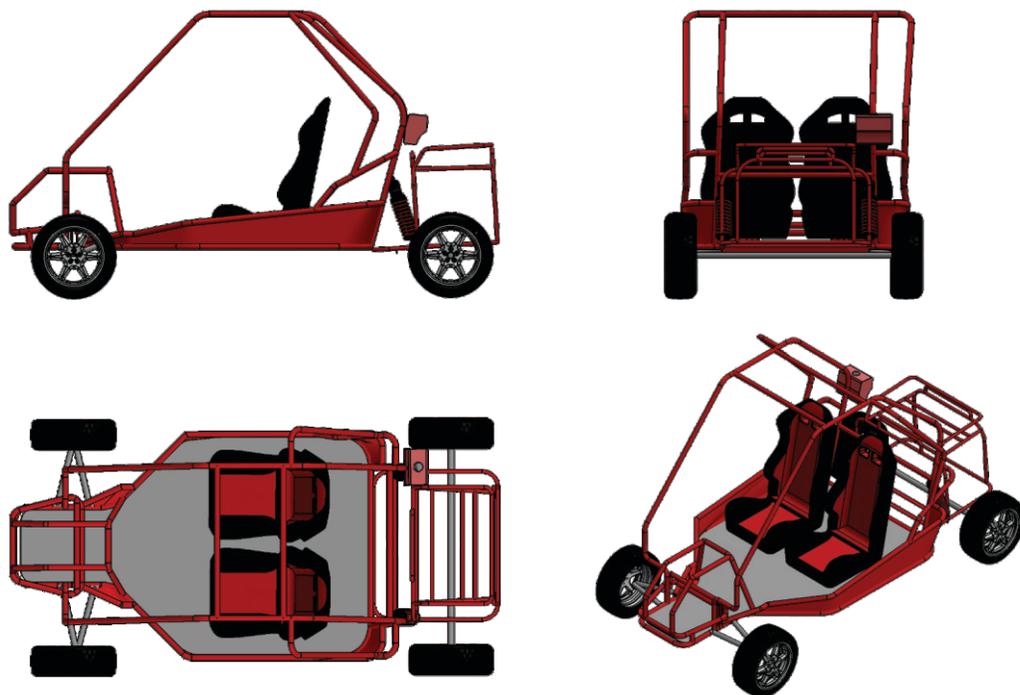


Figura 116. Vistas del mini automóvil diseñado con SOLIDWORKS.

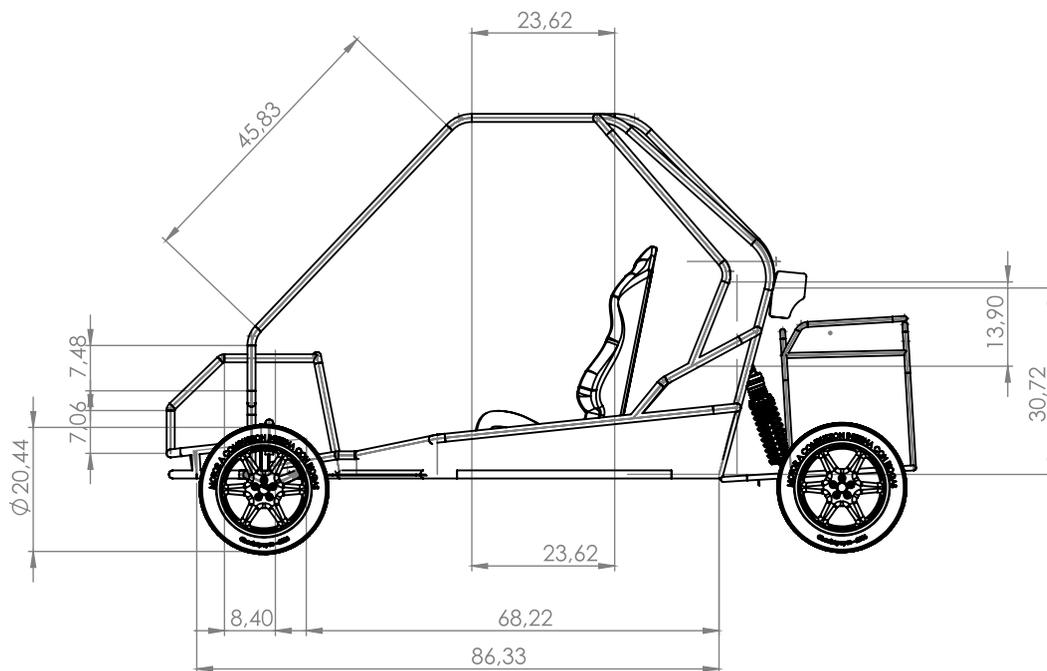


Figura 117. Vista lateral acotada del mini automóvil (Unidad Medida: Pulgada).

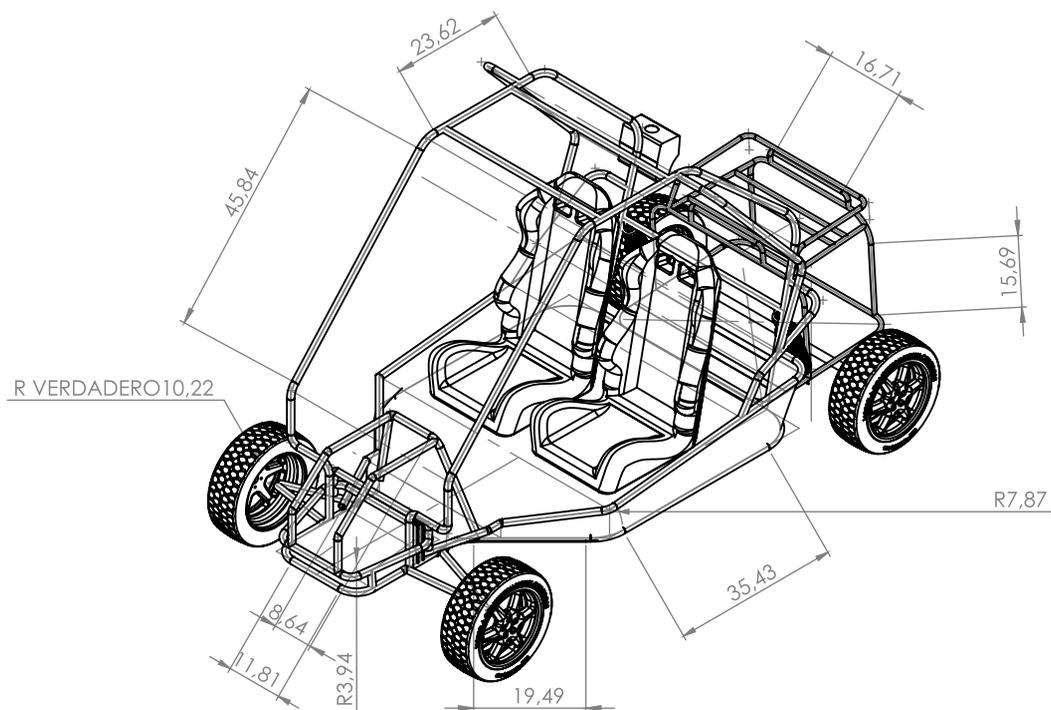


Figura 118. Perspectiva acotada del mini automóvil (Unidad Medida: Pulgada).



Figura 119. Construcción del mini automóvil.



Figura 119. (Continuación).

La construcción del mini automóvil ha sido financiada por el Dr. Miguel Barrena Gurbillón y el Mg. Meregildo Silva Ramírez. En la construcción ha participado el Ing. Agroindustrial Jorge Purizaca Jiménez y la instalación del motor y su adaptación a biogás ha sido realizada por el Ing. Agroindustrial Evans Tejedo Soberón quien también es mecánico de motocicletas.

El mini automóvil ha sido denominado β -150, tiene motor de cuatro tiempos de motocicleta de 150 cm³. En base a los términos de referencia y al diseño realizado, las dimensiones de este vehículo son las siguientes: 2,40 m de largo, 1,20 m de ancho, 1,63 m de alto, 1,88 m de distancia entre ejes y 0,15 m de altura sobre el nivel del suelo; con cuatro llantas R12.



Figura 120. Pruebas de manejo del mini automóvil β -150 a gasolina.



Figura 120. Pruebas de manejo del mini automóvil β -150 a gasolina.

Las pruebas de manejo del mini automóvil β -150 fueron realizadas por dos estudiantes de la Universidad de Concepción – Chile, un estudiante de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Arte (HAWK) de Göttingen – Alemania, y por estudiantes del Colegio Alfred Nobel de Chachapoyas (Figura 120). Todos coincidieron en manifestar que el vehículo se puede conducir con facilidad, que tiene buena potencia para la salida y que el sistema de frenos funciona bien.



Figura 121. El mini automóvil β -150 se presentó por primera vez en la Feria Agroindustrial en el marco del CONEIA 2016 y luego en la Bio Feria de la UNTRM.

El mini automóvil β -150 tiene un conjunto de pedales como un automóvil: acelerador, freno y embrague (Figura 122); funciona a gasolina con cinco cambios de velocidad hacia adelante accionados por embrague y palanca en su piso al lado derecho del asiento del conductor, con sistema de cables de acero que actúan sobre la caja de cambios del motor de motocicleta. El número del cambio de velocidad se muestra en una pantalla que está conectada a un sensor en la caja de cambios, esto facilita la conducción sobre todo en pendientes pronunciadas evitando sobre esfuerzo del motor por no estar en el cambio adecuado. La marcha en reversa es activada con una palanca ubicada en la parte posterior de la cabina, al alcance de la mano, que acciona una caja de retroceso de motocicleta carguera.

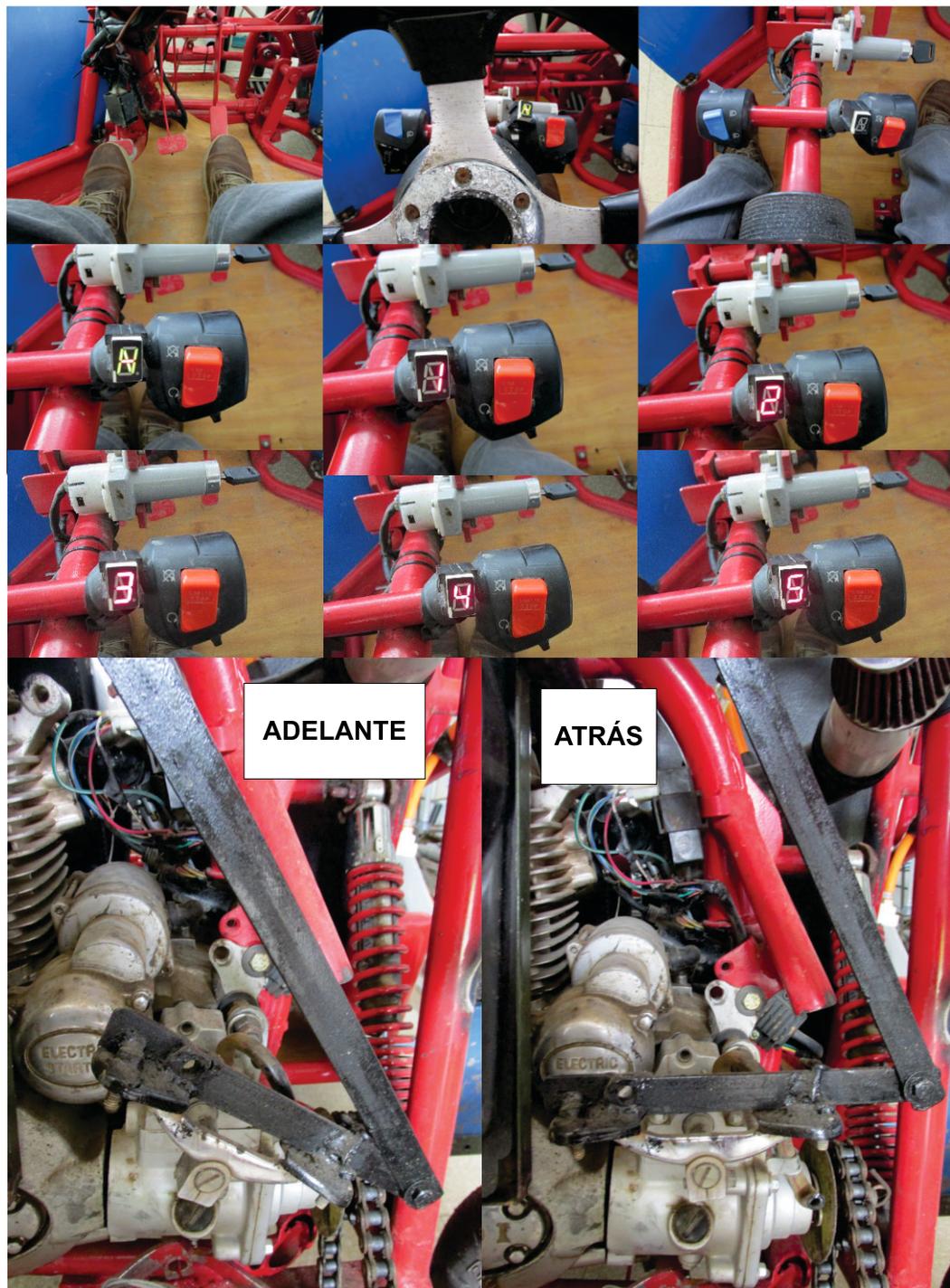


Figura 122. Pantalla indicadora del cambio de velocidad y palanca de retroceso.

El vehículo a gasolina puede transportar por cualquier tipo de vía dos personas cómodamente. Tiene espejos retrovisores para facilitar el manejo a la defensiva. Los faros delanteros, posteriores e intermitentes permiten que pueda circular de noche con buena visibilidad para el conductor y para que otros conductores o transeúntes lo vean claramente en la vía para evitar accidentes. Tiene dirección de cremallera y timón de automóvil; amortiguación en cada eje delantero con doble trapecio y dos amortiguadores en el eje posterior, donde está el freno de disco y la tracción con cadena y catalina. Arriba del motor tiene una parrilla para transportar carga.

Para las pruebas de funcionamiento del motor a biogás, del sistema de producción de biogás de la Estación Experimental de Pomacochas de la UNTRM, se trajo el biogás en un gasómetro o balón de geomembrana de PVC de 2 m de largo, 1,2 m de diámetro y 0,6 mm de espesor, a una presión de 8 cm de agua; amarrado en la tolva de una camioneta de la UNTRM (Figura 123).



Figura 123. Transporte del biogás desde Pomacochas hasta Chachapoyas.

Con un compresor (Tecumseh) de refrigerador de 1/2 hp se trasvasó el biogás a una cámara de llanta provista de manguera de 1/4", llave de compuerta de bronce de 1/2" para regular la salida del biogás y unión universal de PVC de 1/2" para acoplar a la manguera que llega al carburador del motor o acoplar a la manguera de descarga del compresor (Figura 124). La presión final en la cámara llena con biogás fue de 60 cm de agua, que equivale a 4,5 cm de mercurio (Figura 125).

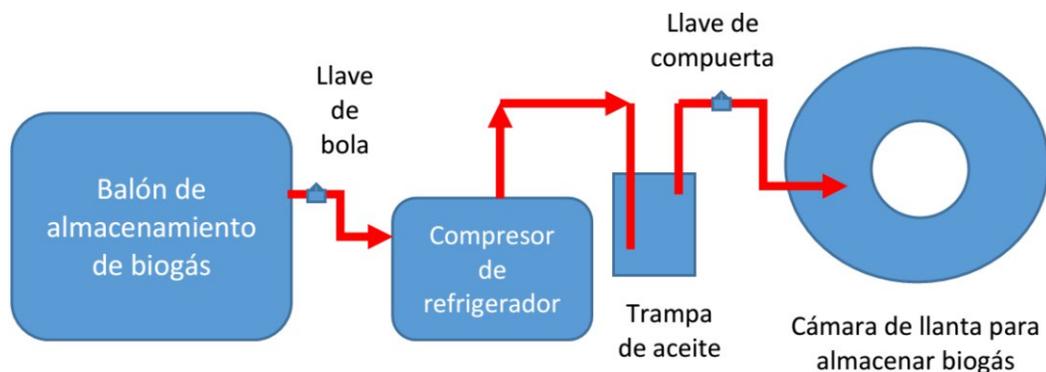


Figura 124. Esquema para trasvase de biogás del balón a la cámara de llanta.



Figura 125. Balón con biogás, inicio y fin del trasvase de biogás a la cámara, prueba de combustión del biogás en la cocina.

Como una demostración que la cámara contiene biogás, se la conectó a la cocina y se la hizo funcionar, apreciándose en la Figura 125 la llama en la hornilla de la cocina. De esta manera, se dispone del biogás, un combustible ecológico, para las pruebas de funcionamiento del motor del mini automóvil β -150, para lo cual se colocó la cámara sobre el techo del vehículo. En la entrada de aire al carburador se conectó la manguera que conduce el biogás desde la cámara, para que ingrese al

carburador (Figura 126) y de allí al cilindro del motor junto con el aire (admisión), cuando el pistón comprimió esta mezcla (compresión), la chispa de la bujía produjo la combustión (explosión), enseguida salen los gases de combustión (escape); y el ciclo se repite.

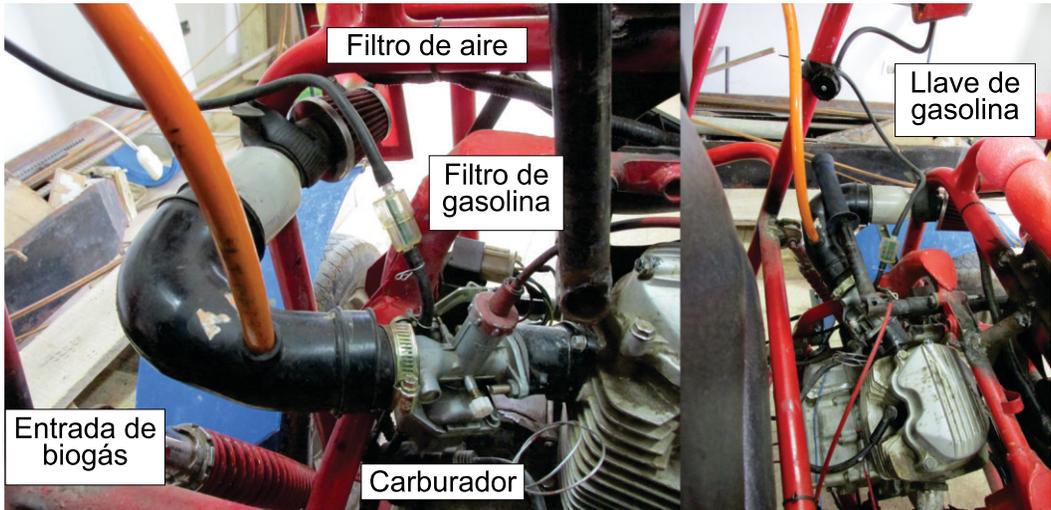


Figura 126. Adaptaciones para que el biogás entre al motor del β -150.

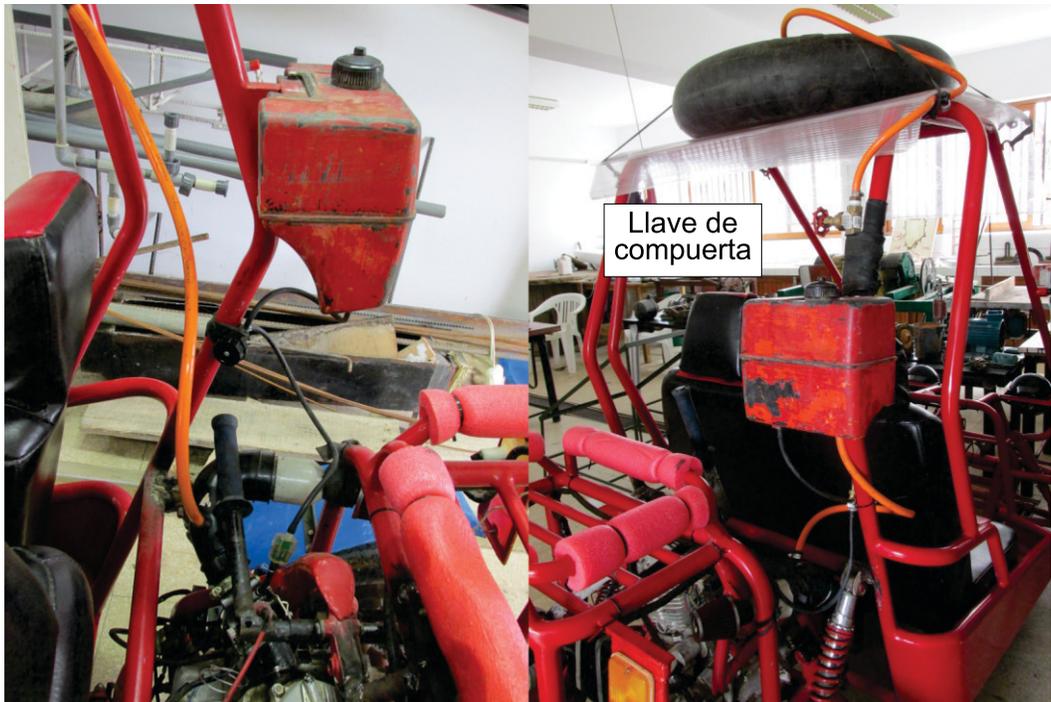


Figura 127. Abastecimiento de gasolina y de biogás al motor del β -150.

Las pruebas de manejo con el motor funcionando a biogás se han realizado en terreno plano (Figura 128), siendo la secuencia de operación del motor la siguiente:

- Llenar la cámara con biogás hasta una presión de 60 cm de agua.
- Colocar la cámara sobre el techo del β -150 y conectarla a la manguera que conduce al carburador.
- Utilizar gasolina para el arranque y durante el calentamiento del motor, de 3 a 5 minutos, según las condiciones ambientales.
- Acelerar el motor antes de cambiar de gasolina a biogás. Es más fácil hacer este cambio con el motor acelerado, que a bajas revoluciones. Una vez hecho el cambio se podrá ajustar a las revoluciones requeridas.
- Cerrar el paso de gasolina al carburador. Esperar que se termine la gasolina del carburador y, en el momento en que el motor esté por detenerse, se abre lentamente la llave de compuerta para que pase el biogás al motor. Esto evitará que el motor succione demasiado biogás y se apague por una mezcla (aire y biogás) demasiado rica en biogás.
- Regular el funcionamiento del motor con la apertura de la llave de compuerta que deja fluir el biogás, de acuerdo a lo que requiera el motor.

Después de las evaluaciones del β -150, se concluye que:

- Se ha diseñado con el software SOLIDWORKS versión 2016, un vehículo liviano, ergonómico para dos pasajeros; cuyas dimensiones que cumplen con los términos de referencia establecidos para el diseño son las siguientes: 2,40 m de largo, 1,20 m de ancho, 1,63 m de alto, 1,88 m de distancia entre ejes y 0,15 m de altura sobre el nivel del suelo; con cuatro llantas R12.
- Se ha construido en talleres de la ciudad de Chachapoyas toda la carrocería del vehículo de acuerdo al diseño realizado, con lo que se demuestra que se pueden hacer realidad proyectos innovadores con la tecnología y máquinas disponibles.
- Se evaluó el desempeño del vehículo con motor de motocicleta de 150 cm³ funcionando con gasolina de 90 octanos, haciéndose evidente la facilidad de su manejo y la operatividad de todos sus componentes: cinco cambios de velocidad hacia adelante y una marcha en reversa, luces delanteras y posteriores, luces direccionales, claxon y espejos retrovisores. Puede transportar cómodamente dos personas por vías de pavimento o a campo traviesa.

- El motor del vehículo puede funcionar a biogás, con el que se reemplazó el 100% de la gasolina sin problema, debido al encendido por chispa eléctrica generada por la bujía del motor.
- La operatividad del vehículo con motor a biogás se demostró en terreno plano, donde se desplazó sin problemas.
- El vehículo opera a gasolina o biogás, siendo esta dualidad que le permitirá funcionar con la potencia requerida de acuerdo al terreno y la carga que soporta.



Figura 128. Pruebas de manejo del β -150 a biogás.

El mini automóvil β -150, con motor de cuatro tiempos de motocicleta de 150 cm³, funciona a gasolina y a biogás. El funcionamiento del β -150 a biogás que reemplaza el 100% de la gasolina por tener encendido con bujía, lo convierte en un vehículo ecológico útil para zonas rurales, con independencia energética respecto a combustibles fósiles. El β -150 tiene funcionamiento dual: a gasolina y a biogás, con lo que se ha cumplido uno de los objetivos de la investigación.



Figura 129. El β -150 junto al origen de su combustible en el Establo de la UNTRM; entre ellas Alma C-1 primer clon animal del Perú.



Figura 130. Estudiantes evaluando el β -150 en la UNTRM y el M.Sc. Torben Oeser (egresado de la HAWK).

4.4. Calefacción a biogás

En la Granja Pozo Verde de Cali – Colombia, además de emplear el biogás como combustible para grupos electrógenos, lo emplean para calefacción de lechones en la zona de maternidad con la finalidad de prevenir las enfermedades bronquiales. Esto representa un ahorro al evitar el uso de combustibles fósiles o electricidad para esta actividad. El biogás se conduce por tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ " hasta la llave de paso ubicada sobre la tapa de cada campana en la que entran los lechones. De esta llave de paso hacia el interior de la campana, la tubería es de fierro galvanizado que tiene soldada un disco de arado en desuso, debajo del cual la tubería con accesorios tiene la forma de U (Figura 131). La llama del biogás calienta el disco de arado y de éste el calor se disipa hacia todo el interior de la campana para brindar confort térmico a los lechones, protegiéndolos de la baja temperatura exterior durante la noche y en especial en la madrugada.



Figura 131. Calefacción a biogás para lechones en la Granja Pozo Verde.

En el Campus de la UNTRM, se empleó el biogás como combustible para un sistema de calefacción compuesto por un canal de fierro de 1,5 m de largo x 0,20 m de alto x 0,20 m de ancho, con sus extremos cerrados, en cuya base se instaló dos quemadores de biogás de 10 cm de diámetro, hasta los que se condujo el biogás por tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ " desde el gasómetro (Figura 132). De esta manera se generó calor para mantener la temperatura ambiente en 22°C para un experimento de producción de biogás (Figura 133).



Figura 132. Sistema de calefacción a biogás.



Figura 133. Operación del sistema de calefacción a biogás.

En este sistema, la llama de los quemadores da directo a la base del canal de hierro calentándolo totalmente, el que a su vez irradia calor al ambiente. La temperatura se puede regular abriendo más o cerrando un poco la llave de paso de biogás a cada quemador. Un sistema similar se puede instalar para calefacción de una vivienda, teniendo la precaución de colocar una chimenea para salida de los gases de combustión al exterior de la vivienda.

4.5. Acciones para incrementar la presión del biogás



Figura 134. Acciones para incrementar la presión del biogás disponible.

Como se aprecia en la Figura 134, el biodigestor y el gasómetro están llenos de biogás al comienzo del día. Cuando el contenido del gasómetro se agota, se debe ejercer presión sobre la cúpula del biodigestor para ayudar a trasvasar el biogás hacia el gasómetro; para ello, una persona se puede sentar sobre el biodigestor, colocar sacos con piedras, o ambas acciones a la vez. Para incrementar la presión del biogás y mantener una llama alta en la cocina, o más luminosidad en la lámpara, o atender la demanda de un motor a biogás; la solución es colocar una alforja con piedras sobre el gasómetro como si se tratara del lomo de un caballo.

4.6. Agitación en el biodigestor

Una bomba volumétrica de mano de 200 mL por ciclo de bombeo; diseñada, construida y evaluada por Acuña (2012), con la que se bombeó agua desde un canal hasta 10 m de altura, o desde 5 m de profundidad hasta 5 m de altura, para abastecer una vivienda en zona rural; se instaló en el sistema de producción de biogás y bioabonos de la UNTRM, para recircular biol con la finalidad de reducir el tiempo de producción de biogás y agitar el contenido del biodigestor.



Figura 135. Bomba volumétrica manual de 200 mL.

Se bombeó 50 L de biol en la mañana y 50 L de biol en la tarde. El biol recirculado desde la poza de descarga hacia la poza de alimentación, actúa como inóculo porque contiene bacterias que colonizan más rápido el sustrato fresco alimentado,

con lo que reduce el tiempo de conversión de la materia orgánica en biogás; asimismo, contribuye a la agitación del sustrato (Hellenthal, 2013).



Figura 136. Succión y descarga de la bomba volumétrica operada por Hellenthal.

4.7. Jühnde, primer pueblo bioenergizado de Alemania

Durante la pasantía de investigación y fortalecimiento de capacidades realizada el año 2013 en Alemania, se visitó Jühnde que es el primer pueblo bioenergizado de Alemania, donde se hizo un recorrido por una planta industrial para producción de biogás que es empleado como combustible para un grupo electrógeno de 16 cilindros, en cuyo sistema de refrigeración se emplea agua que absorbe el calor de la combustión de los cilindros del motor y del tubo de escape. El agua calentada de esta manera se almacena en dos tanques con aislamiento térmico de 50 m³ cada uno, desde donde se bombea al pueblo de Jühnde para calefacción de las 140 viviendas. La energía eléctrica generada es vendida a la red nacional a un precio subsidiado por provenir de fuentes renovables.

Jühnde está al sur de Baja Sajonia, Göttingen – Alemania, tiene 200 familias integradas por 750 personas, hay 9 granjas, tiene 1300 hectáreas de campos de cultivo y 800 hectáreas de bosque. El objetivo de la planta industrial de Jühnde es convertir material biológico renovable (biomasa) en potencia eléctrica y calor; para ello se construyó una estación de generación de energía eléctrica y calor que funciona a biogás. Para calefacción adicional durante el invierno tienen un sistema para calentar agua en caldera quemando chips de madera o paja. El proyecto fue desarrollado por el Centro Interdisciplinario para el Desarrollo Sustentable (IZNE) de la Georg August University de Göttingen y fue el primero en Alemania.



Figura 137. Cordial bienvenida al pueblo bioenergizado de Jühnde – Alemania.



Figura 138. Vista aérea de la planta de biogás de Jühnde – Alemania.

¿Porqué biomasa?; porque la energía del sol se almacena en las plantas, su combustión tiene un balance neutro de CO_2 y hace participar a los agricultores. Para convencer a los pobladores de Jühnde se les habló que se reducirá el CO_2 , serán independientes en suministro de energía y que generará ingresos para el pueblo, alrededor de 350 mil euros por año que equivale a 140 hogares abastecidos con calefacción y agua caliente de la bioenergía. Para hacer realidad el proyecto se formaron los siguientes grupos de trabajo: planta de biogás, planta de energía eléctrica, planta de calefacción, chipeado de madera, red de distribución de agua caliente, tecnología en el hogar, relaciones públicas y gerencia.

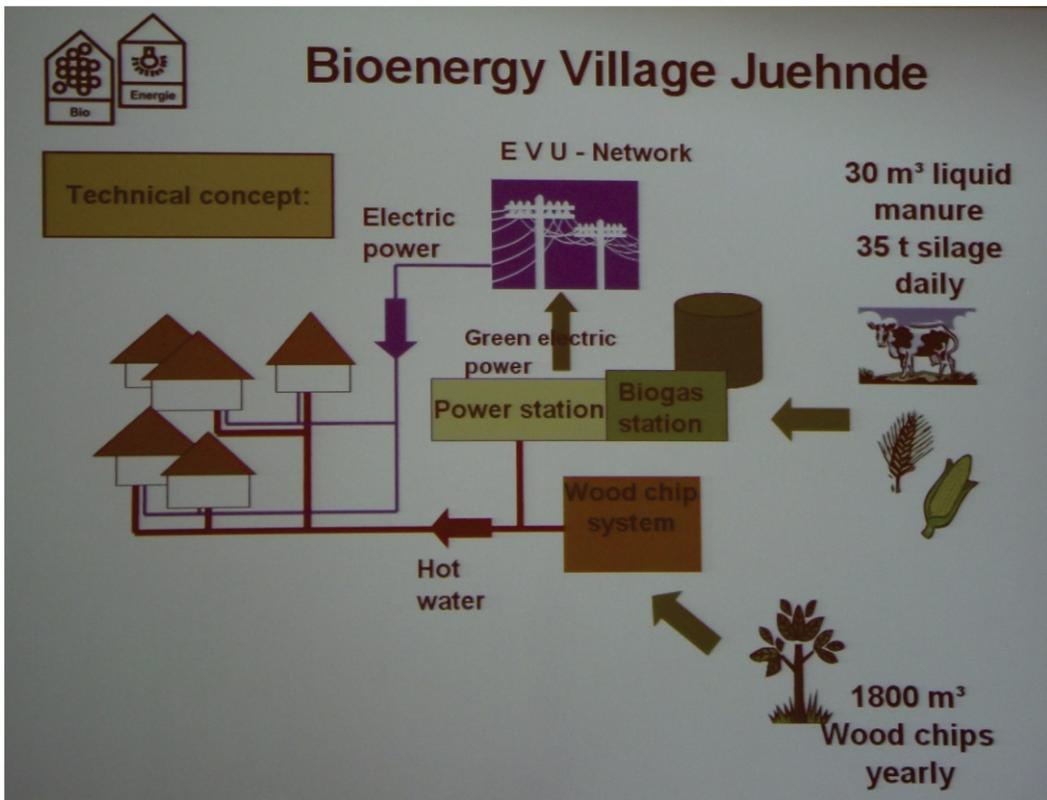


Figura 139. Diagrama de flujo del sistema de Jühnde.

Jühnde se autoabastece de energía y evita que se produzcan 3200 T de CO_2 /año. El Proyecto inició el año 2000. El Intendente aceptó y tuvieron que convencer a todo el pueblo hablándoles del cambio climático y como afecta a los glaciales. Los habitantes han reducido sus costos en energía eléctrica y calefacción. La planta se abastece con maíz, triticale, grass y estiércol de ganado vacuno y porcino. Todos los beneficiarios aportan económicamente al Proyecto. Produce electricidad y agua caliente para calefacción del pueblo de Jühnde ubicado a 2 km de distancia de la planta de biogás.

La cosechadora de maíz chala corta la caña a nivel del suelo, la chipea y la lanza a la tolva que se desplaza a su lado (Figura 140). Cuando la tolva se llena, de inmediato la llevan a la planta. El agricultor destina el 25% de su propiedad para abastecer a la planta, esto le genera 1/3 de sus ingresos, tienen un contrato firmado y cobran a los 14 días de haber entregado la materia prima. El cultivo de 300 ha sirve para abastecer a la planta. El pueblo tiene suficientes hectáreas de bosque para abastecer a la planta con madera para chips, que se emplearán para calentar agua cuando la demanda se incrementa. Ahora hay 60 pueblos en Alemania que hacen lo mismo que Jühnde.



Figura 140. Cosecha mecanizada de maíz para ensilado.



Figura 141. Extendido y apisonado de chips de maíz para su ensilado.



Figura 142. Pilas de ensilado de maíz para alimentar el biodigestor en Jühnde.

La planta de calefacción de agua necesita 1800 m³ de chips de madera para cada año de operación. La planta de biogás necesita para cada año de operación:

- Estiércol de ganado vacuno: 8000 m³
- Estiércol de cerdo: 1500 m³
- Ensilado: 11000 T

La inversión para construir la planta de energía de Jühnde ha sido la siguiente:

- Planta de biogás: 2,0 millones de euros
- Planta de calefacción: 0,7 millones de euros
- Red de distribución de agua caliente: 1,5 millones de euros
- Estructuras: 1,1 millones de euros
- TOTAL: 5,3 millones de euros

En la cooperativa, cada socio tiene poder de decisión pero no dispone del dinero. Todos son dueños. Cada socio tiene un voto, si aportó más sólo puede recibir más ingresos. Tienen 1,2 millones de euros de ingresos brutos: 80% por venta de energía eléctrica y 20% por venta de agua caliente para calefacción. En 15 años devolverán el préstamo. Amortizan 160 mil euros/año (capital + intereses). Por 20 años recibirán un pago especial por la energía que producen.



Figura 143. Componentes de la planta de energía de Jühnde.



Figura 144. Carga de ensilado al contenedor-balanza de alimentación del fermentador de Jühnde. Tornillos sin fin transportan el ensilado al interior del fermentador.

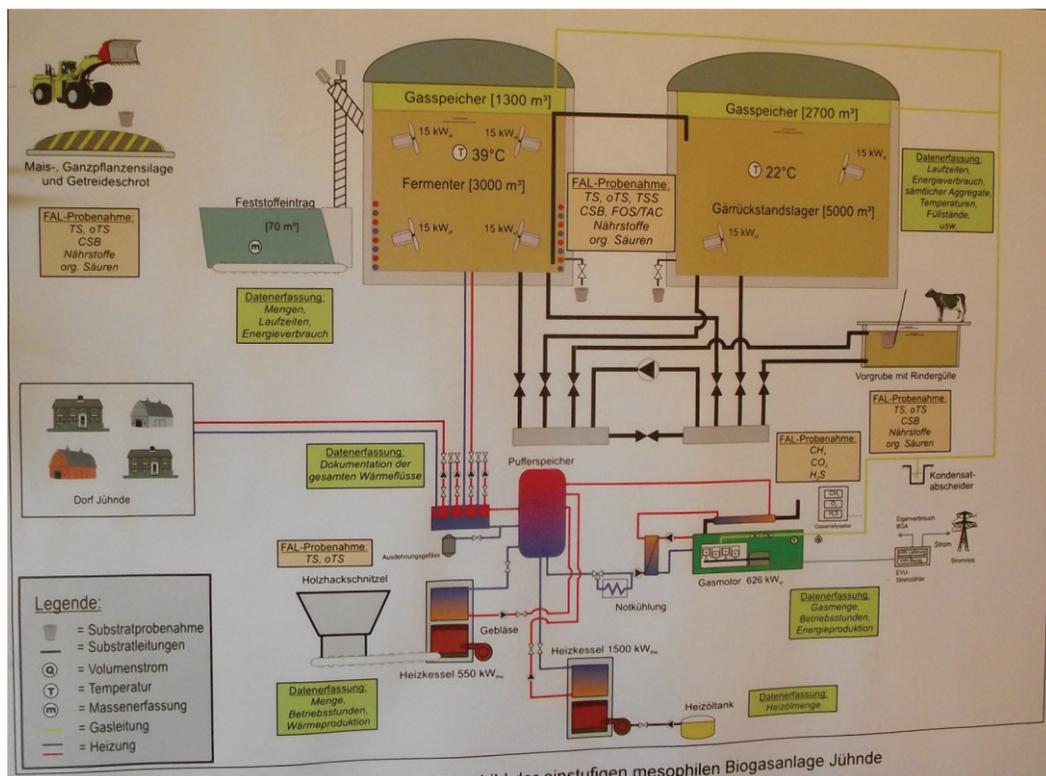


Figura 145. Diagrama de flujo del procedimiento de la etapa mesofílica de la planta de biogás de Jühnde.

Resultados preliminares: los chips de madera producen un máximo de 9800 kWh de calor por día. El grupo electrógeno produce 13200 kWh de energía eléctrica por día y 16500 kWh de calor, la utilización actual es del 88% de su potencia instalada. La velocidad de carga del fermentador es actualmente de 4,5 Kg o TS / m³ x d, con un tiempo de residencia (TRH) de 58 días.

En la Figura 145 se muestra el diagrama de equipos de la planta de energía de Jühnde, donde también se aprecia que la capacidad del contenedor-balanza de alimentación es de 70 m³, del fermentador es de 3000 m³ de mezcla en fermentación a 39°C, con cuatro agitadores de una potencia de 15 kW cada uno y una capacidad de almacenamiento de biogás de 1300 m³; la capacidad del tanque de almacenamiento del digerido es de 5000 m³, opera a 22°C, tiene dos agitadores también de 15 kW cada uno y puede almacenar 2700 m³ de biogás.



Figura 146. Panorámica de la planta de biogás de Jühnde. A la derecha están los tanques de almacenamiento de agua caliente.



Figura 147. Tubería que conduce el biogás al sistema de purificación para ser empleado como combustible del grupo electrógeno.

De la corriente de biogás se elimina el agua condensada, luego se analiza su composición (CH_4 , CO_2 , H_2S) y pasa como combustible al motor del grupo electrógeno que genera 626 kW. El agua de refrigeración del motor retira calor del monoblock y también recupera calor del tubo de escape del motor; esta agua caliente se almacena en dos tanques con aislamiento térmico de 50 m^3 cada uno, desde donde se bombea a los serpentines de intercambio de calor del fermentador para mantenerlo a su temperatura de operación de 39°C , también se conduce a la red de distribución de agua caliente para calefacción de las viviendas del pueblo de Jühnde. Para la refrigeración y la calefacción se emplea agua blanda (libre de Ca^{2+} y Mg^{2+}) que recircula en todo el sistema (Figura 155). Cuando se incrementa la demanda de agua caliente en invierno, entra en funcionamiento la caldera que quema chips de madera y en caso extremo la caldera a petróleo.



Figura 148. Ducto de ventilación y tubo de escape del motor del grupo eléctrico de 16 cilindros a biogás.



Figura 149. Tubería que conduce el digerido (biol) al tanque de almacenamiento. Sistema de bombeo de biol al tanque para su dispersión en el campo.



Figura 150. Área de secado de chips de madera con aire caliente.



Figura 150. (Continuación)



Figura 151. Tanques de almacenamiento de agua caliente para calefacción.



Figura 152. El agua para calefacción entra a 24°C a los intercambiadores de calor y sale a 66°C. La fuente de calor es el agua de enfriamiento del grupo electrógeno.

Cuando la demanda de agua caliente se incrementa en el invierno y no se abastece el sistema con el agua que retira calor del grupo electrógeno (enfriamiento), entra en funcionamiento la caldera cuyo combustible son chips de madera, para calentar el agua para calefacción (Figura 153). Si aún falta atender la demanda, entra en funcionamiento una caldera a petróleo como último recurso (Figura 154). Como se aprecia, el orden de empleo de fuentes de energía prioriza a las renovables y en última instancia se recurre a combustibles fósiles.



Figura 153. Caldera cuyo combustible son chips de madera, para calentar el agua para calefacción.



Figura 154. Caldera a petróleo para atender en caso de mayor demanda de agua caliente para calefacción.

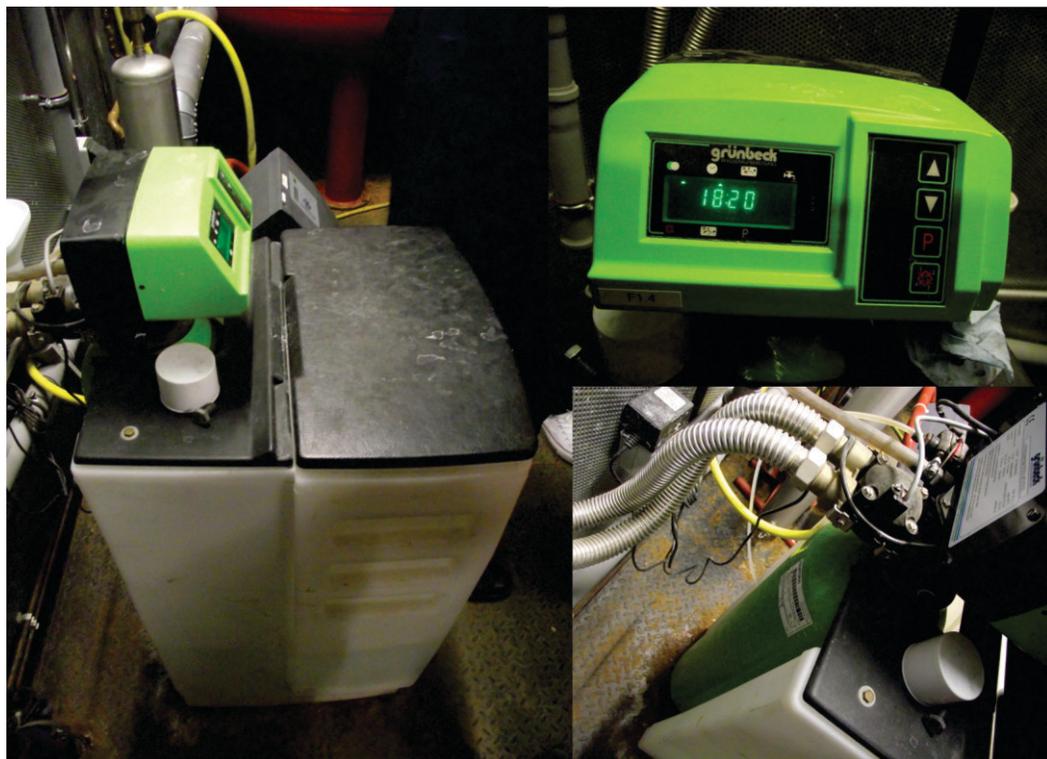


Figura 155. Ablandador de agua para el sistema de agua para calefacción.



Figura 156. Tanques para compensar la presión en el sistema de abastecimiento de agua para calefacción del pueblo de Jühnde.

La tubería de hierro galvanizado, aislada con poliuretano, para conducir el agua caliente para calefacción al pueblo de Jühnde, tiene en toda su extensión dos alambres de cobre, uno aislado completamente y el otro con recortes en su aislamiento cada centímetro. Estos alambres permiten ubicar exactamente fugas de agua de la tubería por roturas o picaduras, lo que ayuda para que el mantenimiento sea rápido y las pérdidas o desabastecimiento de agua caliente sea mínimo.



Figura 157. Tubería de hierro galvanizado, aislada con poliuretano, para conducir el agua caliente a Jühnde para calefacción.

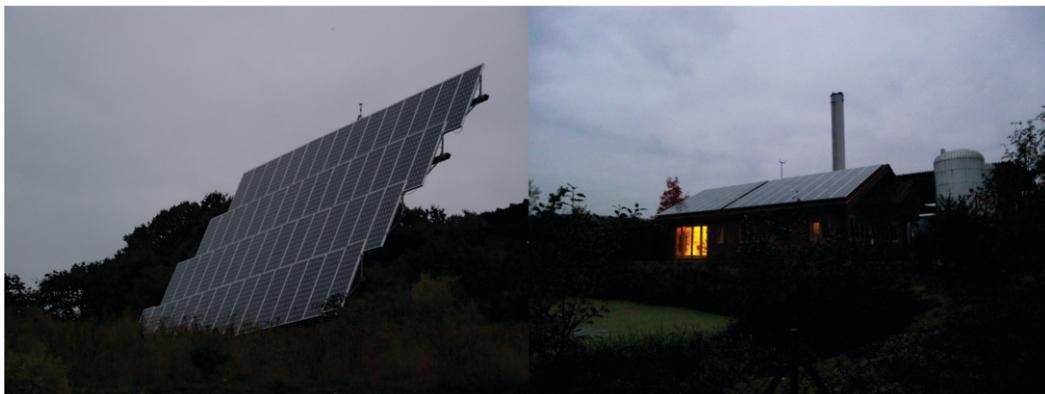


Figura 158. Paneles solares en un área aledaña y sobre el techo del módulo donde está la sala de conferencias de la planta de biogás de Jühnde.



Figura 159. En la planta de energía de Jühnde, junto a estudiantes de Maestría de la Universidad de Hefei, China.

Capítulo 5: Diseño del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)

5

Diseño del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)

5.1. Biodigestor tipo laguna cubierta

El biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC) consiste de una laguna impermeabilizada con un material polimérico que recibirá la mezcla estiércol:agua para su tratamiento anaeróbico; cuya superficie se cubre con una manta también de material polimérico, para asegurar la anaerobiosis y atrapar el biogás que se producirá, el que luego será conducido hacia el área donde se le empleará como combustible. El BTLC es operado a volumen constante para maximizar el tratamiento biológico, producción de metano y control de olores. Para el caso de los BTLC se podrá considerar hasta una relación mínima agua sólidos de 3:1 y máxima de 9:1 (SEMARNAT *et al.*, 2010).

El pH permitirá considerar en el diseño, la alcalinidad o acidez del influente, ya que estos, en caso de no encontrarse en un intervalo óptimo, limitarán o en su caso inhibirán, las diferentes etapas microbiológicas de la degradación anaerobia (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis). En caso de que la materia orgánica contenga una gran cantidad de acidez o alcalinidad, la producción de biogás podrá verse inhibida. Como referencia, un buen rendimiento en la producción de metano dentro del biogás, estará en un rango de pH entre 6,5 y 7,5 (SEMARNAT *et al.*, 2010).

El efluente líquido del BTLC, que es un abono orgánico llamado biol, es conducido por tubería hacia una laguna de similares dimensiones que la laguna del BTLC, también impermeabilizada con el mismo tipo de material polimérico. El biol estará disponible para su empleo en fertirriego de pastos o de otros cultivos. Esta laguna trabaja a volumen variable.

La temperatura es el factor clave en la operación de un BTLC. En climas cálidos se requiere lagunas pequeñas y tienen menos variación estacional en la producción de biogás. Temperaturas bajas reducen la producción de biogás; sin embargo, se puede compensar con un mayor tiempo de retención hidráulica (TRH), es decir, mayor tiempo de permanencia de la mezcla estiércol-agua en el interior del biodigestor, lo cual permitirá obtener bioabonos de mayor poder fertilizante.

5.2. Componentes del biodigestor tipo laguna cubierta

Separador de sólidos. Es una trampa de sólidos por gravedad ubicada entre la fuente de estiércol y el BTLC. Será de concreto armado. Por el sistema de manejo de excretas y estiércoles y la cantidad de material sólido (contenido de fibras y tamaño de los residuos) que puedan encontrarse en el influente, se consideró la instalación de un separador de sólidos antes de ingresar al biodigestor, para evitar taponamientos en las tuberías, degradación lenta, mayor tiempo de retención, y por ende, mayor tamaño de biodigestor (SEMARNAT *et al.*, 2010).

Laguna cubierta. En la que el estiércol se deposita mezclado con agua. Ahí permanece el tiempo necesario (TRH) para ser digerido por las bacterias que generan el biogás. Tendrá forma de tronco de pirámide invertida, excavada en el suelo e impermeabilizada con geomembrana de PVC. Su cubierta será del mismo material y tendrá forma de una cúpula. Los sólidos se asientan en el fondo de la laguna y los líquidos sobrenadan hasta que son transferidos a la laguna secundaria. El biogás producido por digestión bacteriana de la materia orgánica, quedará atrapado entre el nivel de líquido en la laguna y la cubierta de ésta, la inflará y estará disponible para su uso como combustible. El biodigestor estará protegido por un techo para evitar el impacto de la radiación solar y del agua de lluvia.

Laguna secundaria. Es una laguna abierta para captar el líquido (biol) que resulta del proceso de generación de biogás. Tendrá forma de tronco de pirámide invertida, excavada en el suelo e impermeabilizada con geomembrana de PVC. El biol puede emplearse como fertilizante en la agricultura dado su alto nivel de nutrientes, o reutilizarse en el procesamiento de más estiércol. La laguna secundaria tendrá una capacidad igual al volumen de efluente del biodigestor de 10 días, con la finalidad de tener un volumen de biol suficiente para aplicar a las parcelas de pasto para incrementar su producción. Esta laguna tendrá un techo para evitar que el agua de lluvia la inunde.

Cámara de secado de lodos de fondo. Aquí se depositarán los lodos de fondo del digestor extraídos cada seis meses, como purgas de mantenimiento para la buena operación en continuo del sistema de producción de biogás. Tendrá forma de tronco de pirámide invertida, excavada en el suelo, con paredes estabilizadas con piedra tipo canto rodado y cemento. Los lodos húmedos o secos se podrán extraer con un cargador frontal pequeño para aplicarlos al campo como abono orgánico. Esta cámara será techada para evitar que el agua de lluvia la inunde.

Sistema de purificación y control de biogás. En la tubería de conducción de

biogás, se instalarán dos filtros rellenos con clavos de fierro de 2" para eliminar el H_2S , un manómetro en U con agua en sus ramas para medir la presión del sistema en cualquier instante y una válvula de seguridad para operar el sistema a una presión máxima de 15 cm de agua.

Tabla 16. Dimensiones de biodigestores de membrana de caucho AQFLEX

Volumen (m^3)	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Angulo talud (°)
25	3,6	3,6	2,50	75
50	5	3	2,50	75
75	7,5	4,5	3,00	75
100	9	5	3,50	75
150	12	5	3,50	75
200	14	9	3,50	45
300	20	9	3,50	45
400	24	9	3,50	45
500	29	9	3,50	45

5.3. Variables de diseño de la laguna cubierta

Tipo de suelo. La laguna se localizará en suelos de baja a moderada permeabilidad, o en suelos que se puedan sellar por acción biológica o de los sedimentos. Evitar suelos arenosos o de gravilla, suelos superficiales o de roca fracturada. Sin embargo, todo esto se supera impermeabilizando la laguna con manta de material polimérico. El suelo del sitio donde se instalará el BTLC es de tipo arcillas expansivas.

Talud. Se conformarán con pendientes que proporcionen estabilidad duradera acorde al estudio de mecánica de suelos. Se recomienda, conformar el talud de las paredes del biodigestor en una relación de 1:3 y no mayor de 1:1. (Si los taludes aumentan más de 1:1, las paredes se volverán inestables. y menor de 1:3 se requerirá más espacio). Se empleará un talud de 45° debido a que el suelo es de tipo arcillas expansivas. Las superficies de los taludes deberán tener una compactación del 90% Proctor para garantizar que no exista ningún tipo de protuberancias, evitando con ello daños durante la colocación de la geomembrana (SEMARNAT *et al.*, 2010).

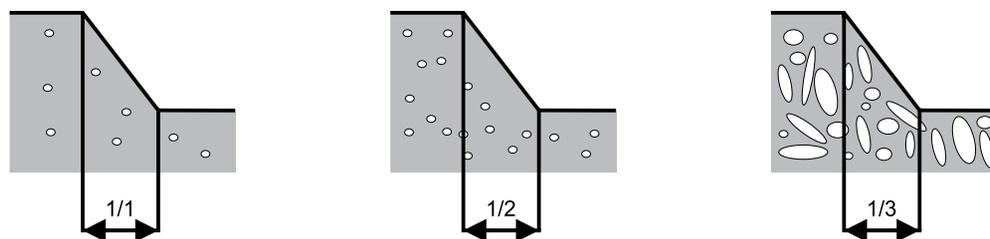
Tabla 17. Inclinación para taludes en diferentes tipos de suelo

Naturaleza del suelo	Angulo del talud (grados)	Densidad (g/m^3)
Arena fina seca	10 a 20	1,4
Arena fina húmeda	15 a 25	1,6
Tierra vegetal húmeda	30 a 45	1,6 a 1,7

Tabla 17. (Continuación)

Naturaleza del suelo	Angulo del talud (grados)	Densidad (g/m ³)
Tierra compactada	40 a 50	1,6 a 1,8
Arcilla seca	30 a 50	1,6
Arcilla húmeda	0 a 20	1,2 a 1,8
Terreno rocoso	50 a 90	2 a 2,5

Fuente: EPA, 2001



a) Talud 1/1, terreno poco estable, terreno arenoso.

b) Talud 1/2, terreno estable, terreno arcilloso.

c) Talud 1/3, terreno bastante estable, terreno rocoso.

Figura 160. Inclinaciones recomendadas de taludes, en función de los tipos más comunes de suelo (L'Institut de L'Elevage. 1996).

Corona del biodigestor. La corona del biodigestor deberá tener una compactación del 85% al 90% proctor. El ancho de la corona, será de un mínimo de 3 m (libre de tuberías, registros, salida de gas, etc.). Una vez construido el sistema, no se deberá realizar maniobras con maquinaria pesada sobre la corona del biodigestor. A una distancia de un metro desde el borde de la laguna y por todo el perímetro del biodigestor, se debe excavar una zanja de 0,25 m de profundidad x 0,15 m de ancho, para la viga de anclaje de la geomembrana de la cámara y de la cúpula (SEMARNAT *et al.*, 2010).

Profundidad. Es importante para una adecuada operación. Una laguna profunda ayuda a mantener la temperatura que promueve el desarrollo bacteriano. Profundidades mayores permiten áreas superficiales menores, en consecuencia menor problema por lluvias y menor tamaño y costo de la cobertura. La profundidad mínima de líquido en la laguna cubierta debe ser de 3,0 m (RCM DIGESTER, 2013).

Tiempo de retención hidráulica y dimensionamiento de la laguna cubierta. La laguna anaeróbica se dimensiona en función a un TRH mínimo que se basa principalmente en el clima, se emplea para dimensionar la laguna de manera que las bacterias tengan el tiempo adecuado en ella para descomponer el estiércol.

Tiempo de retención hidráulica mínimo. Debido a que se emplea grandes volúmenes de agua en la limpieza de los establos, puede circular la mezcla estiércol-agua a través de la laguna cubierta tan rápido que las bacterias no pueden descomponer todo el estiércol. Para evitar este lavado se debe emplear un TRH mínimo para dimensionar la laguna. En base a trabajos previos de instalación y operación de biodigestores (Barrena-Gurbillón *et al.*, 2013), en diversos lugares con diferente temperatura ambiente, se concluyó que la producción de biogás está en función a la temperatura ambiente (Capítulo 3, Ver Tabla 11 y Figura 29).

Volumen del biodigestor. El volumen del biodigestor debe ser igual al volumen del material a degradar, multiplicado por el tiempo de digestión necesario (TRH) y un volumen adicional para el almacenamiento de biogás (Barrena-Gurbillón *et al.*, 2013, SEMARNAT *et al.*, 2010).

Material de la cobertura. Servirá para almacenar el biogás producido. Muchos tipos de materiales se han utilizado para cubrir lagunas en agricultura e industria. Este material debe ser resistente a la radiación ultravioleta, hidrofóbico, resistente al desgarro y pinchaduras, no tóxico a las bacterias, densidad cercana a la del agua. Disponibilidad del material, servicio post venta y costo deben considerarse al escoger el material de cobertura. La geomembrana, que se considere utilizar para la implementación de los proyectos, deberá cumplir como mínimo con las propiedades mostradas en la Tabla 18.

Tabla 18. Propiedades mínimas de la geomembrana

Propiedad	Unidad	Valor Nominal
Densidad	Kg/m ³	940
Resistencia al Desgarre	N	210
Resistencia al Límite Elástico	N/mm	25
Estiramiento al Límite Elástico	%	13
Resistencia a la Rotura	N/mm	43
Estiramiento a la Rotura	%	700

Fuente: SEMARNAT *et al.*, 2010

El espesor de la geomembrana que cubrirá la base del biodigestor deberá ser de al menos 1,0 mm y debe ser igual al de la cubierta, para evitar roturas en el material más débil, en caso de incrementos de presión por acumulación de biogás. La vida útil de la geomembrana deberá ser de más de 20 años, y se deberá garantizar al menos 10 años. El trabajo de instalación debe ser ejecutado por técnicos calificados (como mínimo el responsable del grupo de instaladores), con experiencia certificada en este tipo de trabajos.

Cerco perimétrico. Una vez terminada la construcción de todos los componentes del sistema de producción de biogás, se debe instalar un cerco perimétrico de

alambre de púas, para evitar que personal no autorizado o animales accedan a esta área. En el cerco perimétrico se colocarán letreros de aviso de restricción de acceso, asimismo en la puerta de entrada.

5.4. Dimensiones de la cámara del biodigestor

Para el dimensionamiento del biodigestor se considera que se tendrá un establo con **40 vacas** de un peso promedio de 550 Kg, cada una de ellas evacuará aproximadamente 15 Kg de estiércol por día.

$$40 \text{ vacas} \times \frac{15 \text{ kg estiércol}}{\text{vaca} \times \text{día}} = 600 \text{ kg estiércol/día}$$

En base a la experiencia adquirida en la operación de biodigestores alimentados con mezcla estiércol:agua, la proporción más adecuada de esta mezcla es 1:5, lo que hace 6 partes en total.

$$\frac{600 \text{ kg estiércol}}{\text{día}} \times \frac{6 \text{ L mezcla estiércol: agua}}{\text{kg estiércol}}$$

$$= 3600 \text{ L mezcla estiércol:agua/día}$$

$$= 3,6 \text{ m}^3 \text{ de mezcla estiércol:agua/día}$$

El tiempo de retención hidráulico (TRH) para Chachapoyas es de 35 días. Tener en cuenta el TRH correspondiente al lugar donde se realizará la instalación. Recomendamos que se considere como mínimo 25 días.

$$\frac{3600 \text{ L mezcla estiércol: agua}}{\text{día}} \times 35 \text{ días}$$

$$= 126000 \text{ L mezcla estiércol:agua} = 126 \text{ m}^3$$

Entonces, la cámara o laguna del BTLC tendrá un **volumen útil o de trabajo (Vt) de 126 m³** que representará el 80% de su volumen total (Vc), en base a la experiencia de operación de biodigestores tubulares.

$$Vt = 0,8Vc \qquad 126 = 0,8Vc \qquad Vc = 157,5 \text{ m}^3$$

Para el diseño, el volumen de la cámara (Vc) del BTLC se redondeará a 160 m³.

Según diversas publicaciones y en base a la experiencia en la operación de biodigestores (Barrena-Gurbillón *et al.*, 2013), el volumen de biogás que se producirá por día será igual al 35% del volumen de mezcla estiércol:agua contenida en el BTLC (volumen de trabajo (Vt)).

$$V_{\text{biogas}} = 0,35Vt \qquad V_{\text{biogas}} = 0,35 (126) \qquad \mathbf{V_{\text{biogas}} = 44,1 \text{ m}^3/\text{día}}$$

Para conservar el calor en el BTLC, su **profundidad será de 3,0 m**. La cámara del biodigestor tendrá la forma de un tronco de pirámide invertida, siendo la fórmula para calcular su volumen (Vc):

$$Vc = \frac{h}{3} (AB + Ab + \sqrt{AB \cdot Ab})$$

Donde:

AB = área de la base mayor (m²)

Ab = área de la base menor (m²)

h = profundidad de la cámara (m)

Según la EPA (2001), $AB = 2Ab$

$$157,5 = \frac{3}{3} (2Ab + Ab + \sqrt{2Ab \cdot Ab})$$

$$157,5 = 3Ab + 1,414Ab$$

$$Ab = 35,68 \text{ m}^2; \quad L = 5A; \quad l = 5a$$

$$Ab = l \times a = 5a \times a = 5a^2 = 35,68 \text{ m}^2$$

$$a = 2,67 \text{ m}; \quad l = 13,35 \text{ m}; \quad AB = 2(35,68) = 71,36 \text{ m}^2$$

$$AB = L \times A = 5A \times A = 5A^2 = 71,36 \text{ m}^2$$

$$A = 3,78 \text{ m}; \quad L = 18,9 \text{ m}$$

El terreno donde se instalará el biodigestor es de arcillas expansivas por lo que es recomendable emplear un **talud de 45°** con respecto al nivel del suelo. Se mantendrá constante el ancho de la cámara del biodigestor tanto en la base menor como en la base mayor y se realizará reajustes en el largo de dicha cámara, para llegar al volumen de 160 m^3 . Recalculando el volumen de la cámara:

$$V_c = \frac{3}{3} ((12 \times 9) + (6 \times 3) + \sqrt{108 \times 18})$$

$$V_c = 170 \text{ m}^3$$

Entonces, las **dimensiones de la cámara del biodigestor** serán:

Base superior: **largo = 12 m; ancho = 9 m**

Base inferior: **largo = 6 m; ancho = 3 m**

Profundidad = 3 m

Talud = 45°

Volumen = 170 m³

El biodigestor tendrá una corona de 3 m de ancho, con una compactación del 85 al 90% Proctor. A 0,5 m del borde de la cámara del biodigestor se excavará una zanja de 0,25 m de profundidad x 0,15 m de ancho, en todo su perímetro para la viga de anclaje de la geomembrana de la cámara y de la cúpula, sobre la corona.

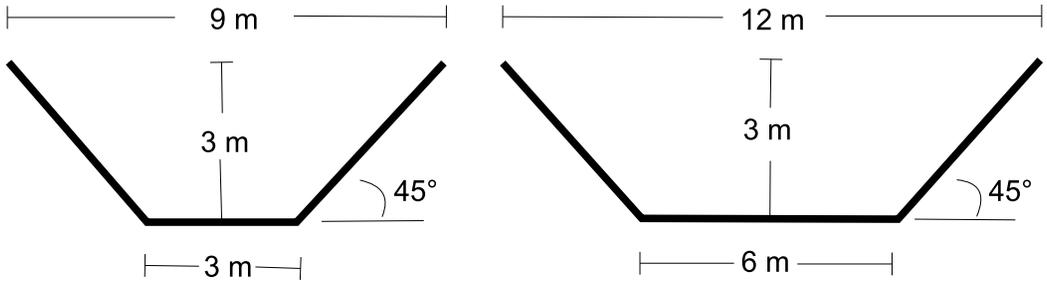


Figura 161. Dimensiones de la cámara del biodigestor.

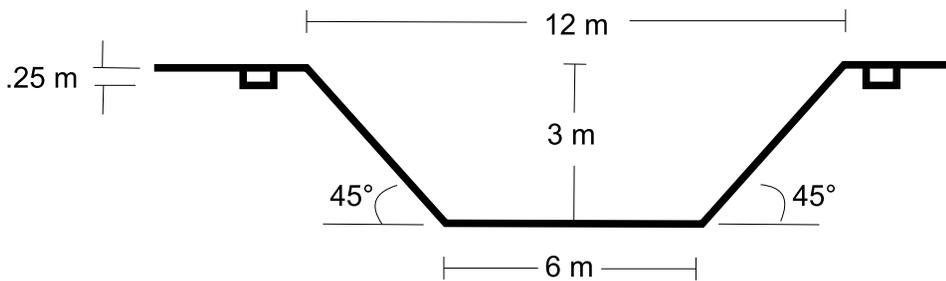
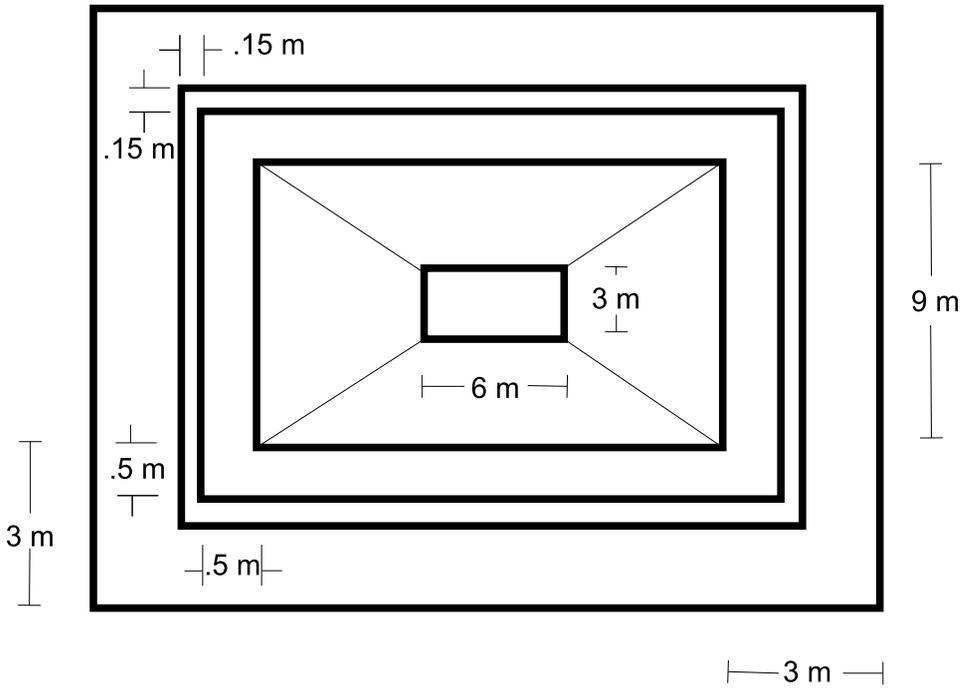


Figura 162. Vista superior y lateral de la cámara del biodigestor.

Se empleó una retroexcavadora para hacer la poza del biodigestor y el acabado se hizo manualmente con pala. Debido a que suelo es arcilloso hubo problemas de derrumbes, por lo que se tuvo que colocar piedra tipo canto rodado con concreto en las paredes de la poza para estabilizarla (Figura 163).



Figura 163. Excavación y reforzado de la cámara del BTLC.

5.5. Cúpula del biodigestor

La cúpula del biodigestor servirá como gasómetro. Para el cálculo de sus dimensiones se tiene en cuenta la Figura 164, donde:

Lado del polígono inscrito (XY): $lp = 9 \text{ m}$

Sagita (WT): $S = 1,8 \text{ m}$

Radio: $r = (lp^2 + 4S^2)/8S$

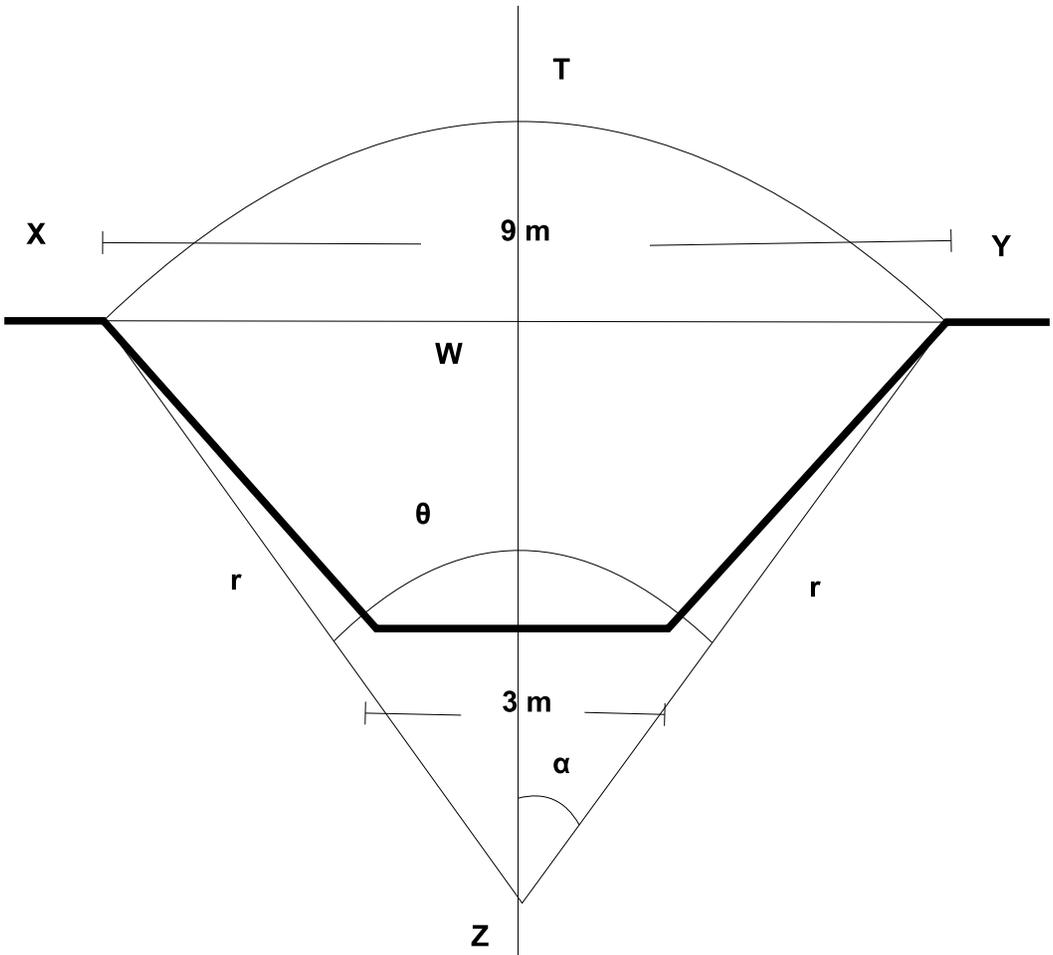


Figura 164. Cúpula del biodigestor.

$$r = (9^2 + 4(1,8)^2) / 8(1,8)$$

$$r = 6,53 \text{ m}$$

$$\text{sen } \alpha = (lp/2)/r$$

$$\text{sen } \alpha = 4,5/6,53$$

$$\alpha = \arcsen(4,5/6,53)$$

$$\alpha = 43,56^\circ$$

$$\theta = 2 \alpha$$

$$\theta = 87,12^\circ$$

Longitud del arco de la cúpula (la). Es la trayectoria XTY en la Figura 164. Se calcula con la fórmula:

$$la = \theta r \pi / 180$$

$$la = 87,12^\circ \times 6,53 \text{ m} \times \pi / 180^\circ$$

$$la = 9,93 \text{ m}$$

Apotema (ap) de la cúpula. Es el segmento WZ en la Figura 164. Se calcula con la fórmula:

$$ap = \sqrt{r^2 - \left(\frac{lp}{2}\right)^2}$$

$$ap = \sqrt{(6,53)^2 - (4,5)^2}$$

$$ap = 4,73 \text{ m}$$

Area del segmento circular (Aseg).

$$Aseg = \text{Area del sector circular (XTYZ)} - \text{Area del triángulo XYZ}$$

$$A_{seg} = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \theta \cdot r^2 \right) - \left(\frac{lp \cdot ap}{2} \right)$$

$$A_{seg} = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot (87,12^\circ) \cdot (6,53)^2 \right) - \left(\frac{9 \times 4,73}{2} \right)$$

$$\mathbf{A_{seg} = 11,13 \text{ m}^2}$$

Volumen de la cúpula del biodigestor (Vcb).

$$V_{cb} = A_{seg} \times \text{largo del biodigestor}$$

$$\mathbf{V_{cb} = 11,13 \text{ m}^2 \times 12 \text{ m}}$$

$$\mathbf{V_{cb} = 133,56 \text{ m}^3}$$

Capacidad de almacenamiento de biogás.

$$\text{Volumen libre en la cámara del biodigestor} = 170 \text{ m}^3 - 126 \text{ m}^3 = 44 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen disponible para almacenar biogás en la cámara y en la cúpula del biodigestor} = 44 \text{ m}^3 + 133,56 \text{ m}^3 = 177,56 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de biogás producido por día} = 44,1 \text{ m}^3$$

$$\text{Capacidad de almacenamiento de biogás} = 177,56 \text{ m}^3 / (44,1 \text{ m}^3/\text{día}) = 4,03 \text{ días}$$

En el caso que la mezcla estiércol:agua ocupe todo el volumen de la cámara del biodigestor ($V = V_t$), se producirán $59,5 \text{ m}^3$ de biogás/día. Sólo quedará disponible el volumen de la cúpula para almacenar el biogás, lo que corresponderá a la producción de biogás de 2,24 días.

5.6. Área de geomembrana para el biodigestor

Se calcula el área de geomembrana necesaria para la cámara del biodigestor, vereda, anclaje y cúpula, de la manera que se muestra a continuación.

Área lateral de la cámara del biodigestor (AL).

$$AL = ap\left(\frac{PB + Pb}{2}\right) + Ab$$

Donde:

ap= apotema de la cámara del biodigestor (de la figura 161)

$$ap = \sqrt{3^2 + ((12 - 6)/2)^2}$$

$$ap = 4,24 \text{ m}$$

PB= perímetro de la base mayor

Pb= perímetro de la base menor

Ab= área de la base menor

$$AL = 4,24\left(\frac{42 + 18}{2}\right) + (6 \times 3)$$

$$AL = 145,2 \text{ m}^2$$

Área de la vereda=AV

$$AV = 2(0,5 \times 13) + 2(9 \times 0,5)$$

$$AV = 22 \text{ m}^2$$

Área sobre la viga de anclaje=AA

$$AA = 2(0,20 \times 13,4) + 2(0,2 \times 10,00)$$

$$AA = 9,36 \text{ m}^2$$

Área de la cúpula=ACU

$$ACU = (l_a \times L) + A_{seg} + AV + AA$$

$$ACU = (9,93 \times 12) + 11,13 + 22 + 9,36$$

$$ACU = 161,65 \text{ m}^2$$

Área de geomembrana=Ageo

$$Ageo = AL + AV + AA + ACU$$

$$Ageo = 145,2 + 22 + 9,36 + 161,65$$

$$Ageo = 338,21 \text{ m}^2$$



Figura 165. Cartel de obra. Salida de biogás del digester. Electrobomba de 2 hp para recircular el sustrato en fermentación dentro del digester.

5.7. Laguna secundaria para almacenamiento del efluente

En esta laguna se almacenará el efluente líquido del biodigestor (biol), de diez días, que representará el 80% del volumen total de esta laguna (VL). El efluente diario será igual al volumen de alimentación diaria del biodigestor (3,6 m³ de mezcla estiércol:agua).

$$VL = (10 \text{ días} \times 3,6 \text{ m}^3/\text{día})/0,80$$

$$VL = 45 \text{ m}^3$$

La laguna tendrá forma de tronco de pirámide invertida con una profundidad de 1,5 m y un talud de 45°.

$$VL = \frac{h}{3} (YZ + WT + \sqrt{YZ \times WT})$$

YZ = área de la base mayor

WT = área de la base menor

h = profundidad

Según la EPA(2001), YZ = 2WT y h = 1,5 m

$$VL = \frac{1,5}{3} (2WT + WT + \sqrt{2WT \times WT})$$

$$VL = \frac{1,5}{3} (3WT + 1,414WT) = 45$$

$$WT = 45/(0,5 \times 4,414)$$

$$WT = 20,39 \text{ m}^2: \text{Area de la base menor}$$

El largo de la base menor (W) será igual a dos veces su ancho (T):

$$W = 2T$$

$$WT = 2T \times T = 2T^2 = 20,39$$

$$T = \sqrt{20,39/2}$$

Ancho de la base menor: $T = 3,19$ m

Largo de la base menor: $W = 6,38$ m

$YZ = 2(20,39) = 40,78$ m²: área de la base mayor

$$YZ = 2Z \times Z = 2Z^2 = 40,78$$

$$Z = \sqrt{40,78/2}$$

Ancho de la base mayor: $Z = 4,52$ m

Largo de la base mayor: $Y = 9,04$ m

Haciendo un reajuste en las dimensiones debido al talud de 45° y a la profundidad de 1,5 m, para llegar al volumen de 45 m³, se obtienen las dimensiones mostradas en la Figura 166.

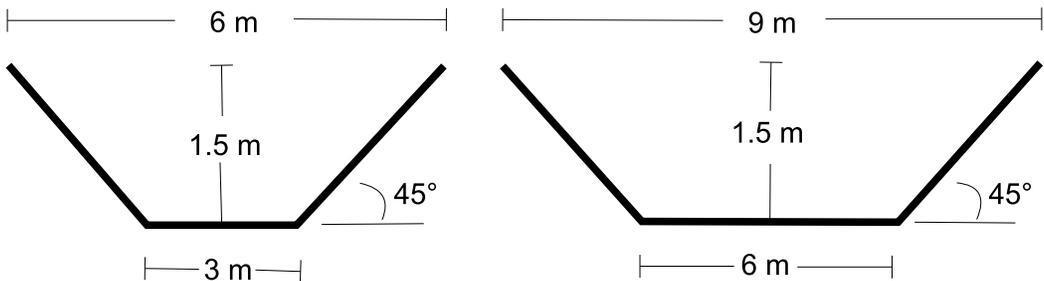


Figura 166. Dimensiones de la laguna de almacenamiento del efluente.

Entonces, las **dimensiones de la laguna** serán:

Base superior: **largo = 9 m; ancho = 6 m**

Base inferior: **largo = 6 m; ancho = 3 m**

Profundidad = 1,5 m

Talud = 45°

Volumen = 51,6 m³

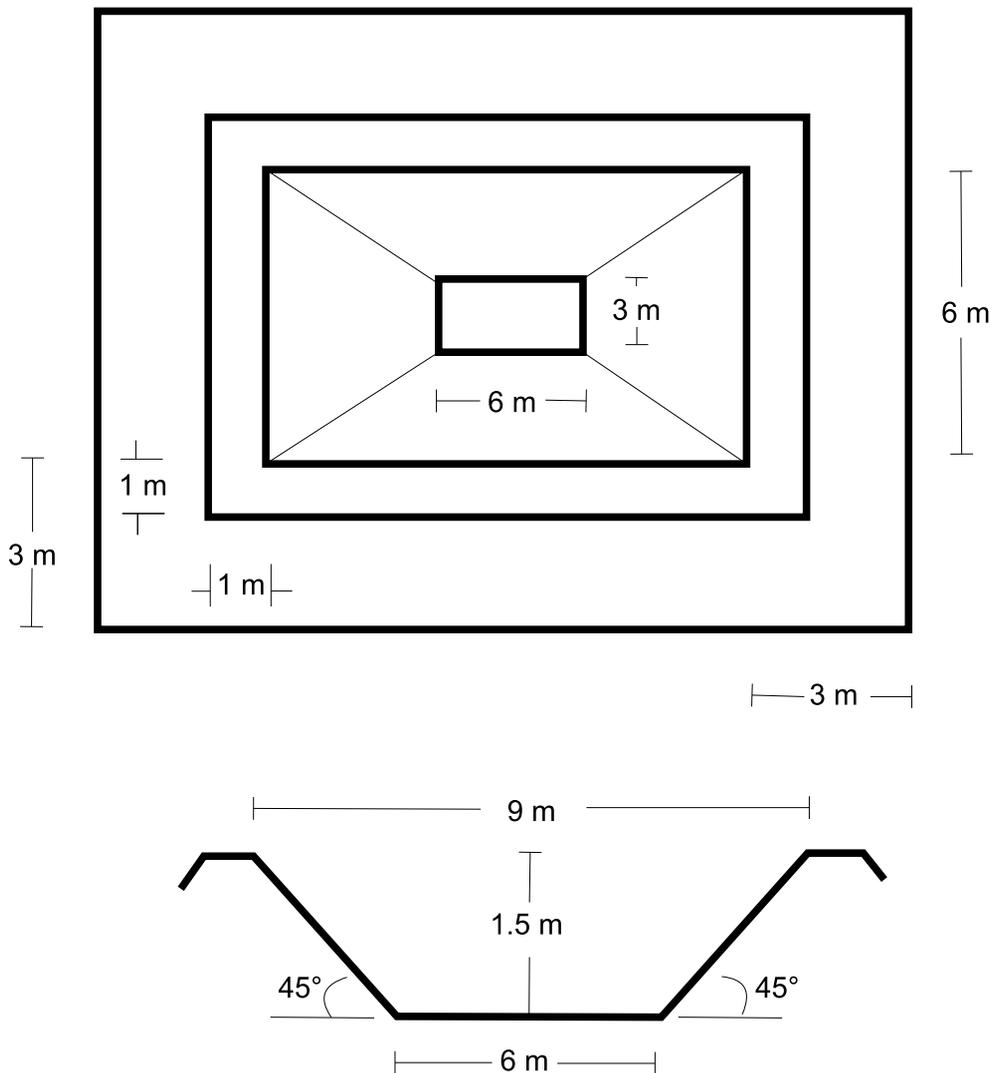


Figura 167. Vista superior y lateral de la laguna de almacenamiento de efluente.

Esta laguna tendrá una corona de 3 m con una compactación del 85 al 90% Proctor. Tendrá una vereda de 1 m de ancho en todo su perímetro, iniciando en el borde de la laguna, cubierta con la misma geomembrana que impermeabilizará la laguna. A continuación de la vereda se considera un metro más de geomembrana en todo el perímetro, la que se enterrará como anclaje (Figura 167).

Área lateral de la laguna=ALL

$$ALL = apL \left(\frac{PBL + PbL}{2} \right) + AbL$$

Donde:

apL= apotema de la laguna:

$$apL = \sqrt{1,5^2 + (9 - 6)/2)^2}$$

$$apL = 2,12 \text{ m}$$

PBL=perímetro de la base mayor de la laguna.

PbL=perímetro de la base menor de la laguna.

AbL=Area de la base menor de la laguna.

$$ALL = 2,12 \left(\frac{30+18}{2} \right) + 18$$

$$ALL = 68,9 \text{ m}^2$$

Área de la Vereda más anclaje=AVA

Vereda = 1m en todo el perímetro.

Anclaje = 1 m en todo el perímetro.

$$AVA = 2(13 \times 2) + 2(6 \times 2) = 76 \text{ m}^2$$

Area de geomembrana para la laguna=AGL

$$AGL = ALL + AVA = 68,9 + 76 \text{ m}^2 = 145 \text{ m}^2$$



Figura 168. Excavación y reforzado de la laguna secundaria.



Figura 169. Laguna secundaria terminada. Tubería que conduce el biol del digestor. Tubería de succión de la electrobomba de 2 hp para envasar biol o bombearlo al campo como abono orgánico.

5.8. Cámara para secado de lodos de fondo (biosol)

Esta cámara tiene dimensiones similares a la cámara del digestor, pero de una profundidad de 2 m, con una rampa para que pueda ingresar un cargador frontal pequeño para retirar los lodos frescos o secos, según se requiera para aplicar al campo como abono orgánico.

A las áreas donde se ubicó cada componente del sistema de producción de biogás se colocó techo para protegerlo de la lluvia y la radiación solar, con lo que se prolongará su vida útil. El techo evitará que el agua de lluvia diluya inadecuadamente el biol y los lodos de fondo que se desea secar.



Figura 170. Cámara para secado de lodos de fondo del digestor.

5.9. Sedimentador

Servirá para retirar los sólidos gruesos por flotación y los inertes (arena, tierra, piedras) por sedimentación, que vienen con el estiércol. Será de concreto armado, con un área útil de $1,20 \text{ m}^2$ y un volumen de $1,00 \text{ m}^3$; cuyas dimensiones principales

serán: 2,00 m de largo, 0,60 m de ancho y 1,00 m de profundidad. Tendrá una cámara de entrada y otra de salida de las mismas dimensiones (0,60 m de largo, 0,60 m de ancho y 1,00 m de profundidad), ambas con registro de 4" en el fondo para retirar los sedimentos a través de tubería de 4" de PVC; entre estas cámaras habrá una tercera cámara con fondo inclinado ascendente hacia la cámara de salida, a 0,40 m del fondo en el lado de la cámara de entrada y 0,60 m del fondo en el lado de la cámara de salida; con mamparas cada 0,40 m para dirigir el flujo de la mezcla estiércol-agua y favorecer la separación de los sólidos flotables y sedimentables. La entrada al decantador estará a 0,10 m del borde superior y equidistante de los lados; la salida estará en la parte central de la cara de salida de la cámara. Los detalles y dimensiones del decantador se muestran en la Figura 171.

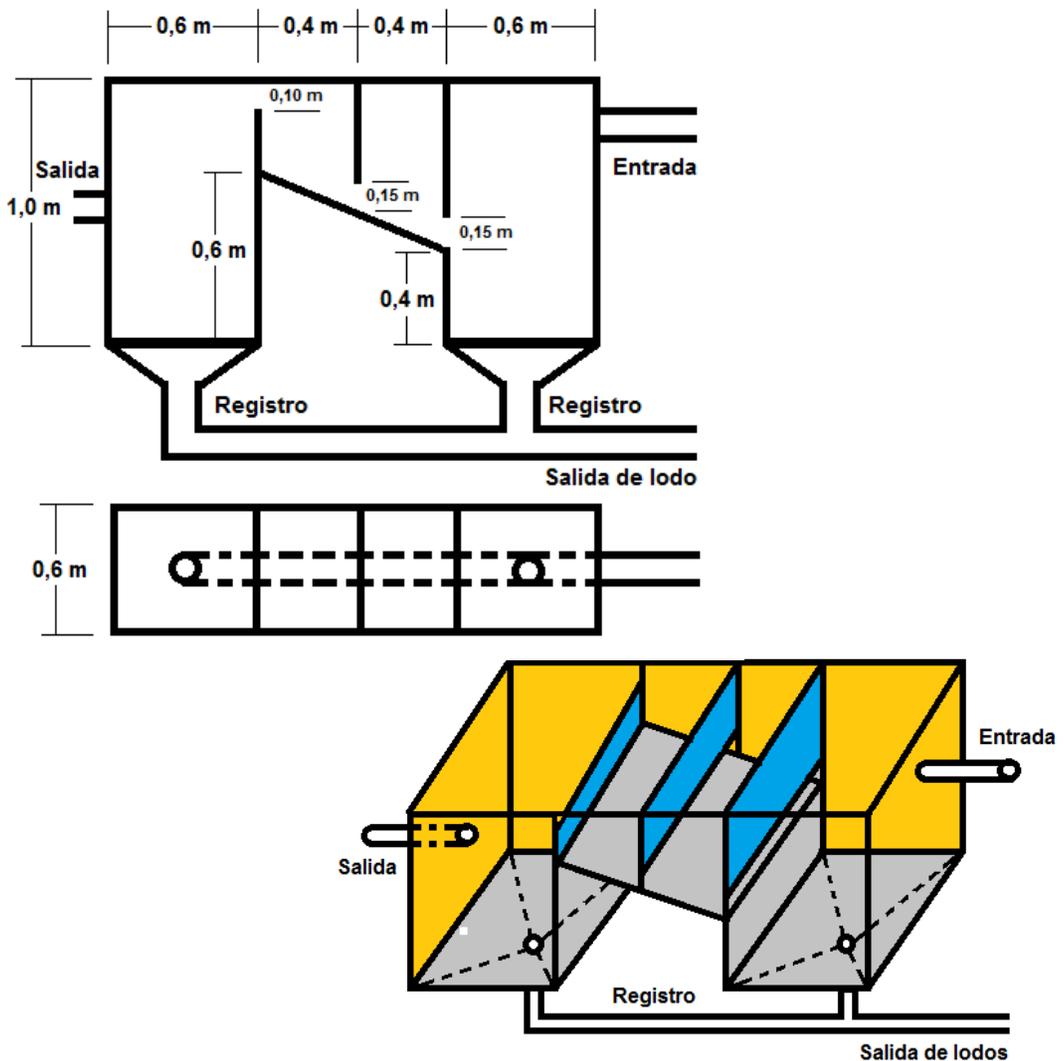


Figura 171. Esquema del sedimentador.



Figura 172. Sedimentador ubicado entre el establo y el digestor.



Figura 173. Ubicación de los componentes del sistema de producción de biogás en la UNTRM, Amazonas – Perú.



Figura 174. Los diseñadores del BTLC: M.Sc. Monika Hellenthal y Dr. Miguel Barrena.



Figura 175. Ganado de alta calidad genética Angus y Simmental en el establo de la UNTRM y crías producto de transferencia de embriones de ganado Simmental en vacas Brown Swiss.

6

Capítulo 6: Operación del biodigestor tipo laguna cubierta (BTLC)

6.1. Carga del BTLC

El estiércol del ganado vacuno del establo de la UNTRM es la materia prima para preparar la carga del BTLC. El piso de cemento del establo facilita su lavado con agua a presión, generándose una mezcla estiércol:agua que discurre por canaletas hacia el sedimentador.



Figura 176. Piso del establo de la UNTRM y canaleta de conducción de la mezcla estiércol:agua al sedimentador.

En el sedimentador se separan los sólidos por precipitación y los livianos que flotan, luego la mezcla uniformizada estiércol:agua discurre por la tubería de 6" de PVC hacia el BTLC. El rumen, empleado como inóculo, es transportado desde el Camal Municipal de Chachapoyas en cilindros de 80 L ocupando $\frac{3}{4}$ de su volumen total, debido a que fermenta rápidamente e incrementa su volumen por los gases producidos y tiende a derramarse. La tapa del cilindro debe asegurarse para evitar que sea expulsada por la presión de los gases.



Figura 177. Rumen para inocular el BTLC.

Los cilindros con el rumen se destapan cuidadosamente para no ser salpicados por el spray de rumen, enseguida se vierten a la poza final del sedimentador y se le adiciona agua para diluirlo, lo que facilita su ingreso al BTLC.



Figura 178. Inoculación del BTLC con rumen.

El recorrido de la mezcla estiércol:agua desde el establo al sedimentador y de allí al biodigestor tipo laguna cubierta, se representa en la Figura 179. La descomposición anaeróbica del estiércol dentro del BTLC produce biogás que infla la cubierta. El estiércol descompuesto soluble en agua (biol) pasa por rebose a la laguna para biol. Lo que no se solubiliza se acumula en el fondo del BTLC y se retira cada seis meses como purgas, para lo cual se abre la llave de paso, observándose la salida de un líquido espeso hasta que salga ligero como el biol, en ese momento se cierra la llave. Estas purgas mantienen operativo al sistema.

La conexión de los componentes del sistema de producción de biogás, biol y biosol se muestra en la Figura 180, donde se aprecia que la tubería de alimentación está más abajo que la tubería de drenaje del BTLC hacia la laguna para biol y ambas están bajo el nivel de la mezcla estiércol:agua contenida en el biodigestor, para evitar la fuga de biogás. La salida de biosol es regulada con la llave de paso. El BTLC tiene una bomba centrífuga para recircular biol, lo que a su vez agita la mezcla en fermentación.

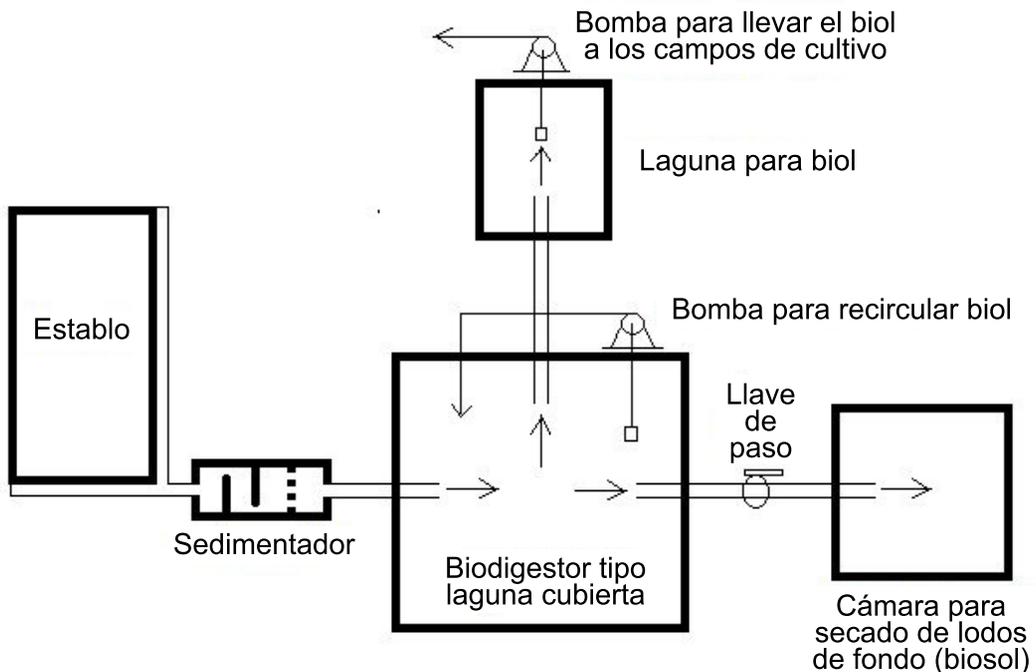


Figura 179. Esquema del sistema de producción de biogás y bioabonos con BTLC.

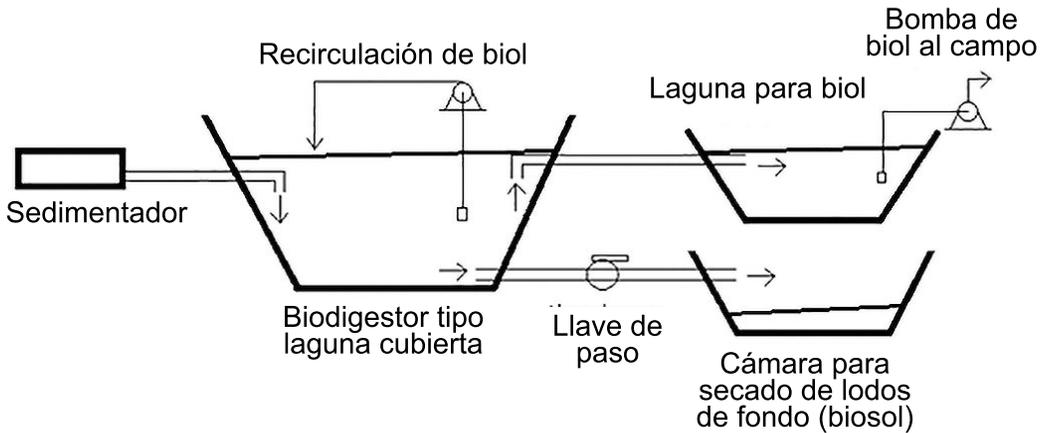


Figura 180. Esquema de desniveles entre los componentes del sistema de producción de biogás y bioabonos con BTLC.

6.2. Recirculación y extracción de biol

La recirculación del biol dentro del biodigestor se hace con una electrobomba centrífuga de 2 hp, la que debe cebarse con agua antes de encenderla, porque si tiene aire en la tubería de succión no bombeará. Para bombear biol a los campos de cultivo también se emplea una electrobomba centrífuga de 2 hp.



Figura 181. Cebado de la electrobomba para recircular biol en el BTLC y de la electrobomba para llevar biol al campo de cultivo.

6.3. Extracción de biosol

El BTLC tiene a ras del fondo dos tubos de PVC de 6" con llave de paso en su trayecto para retirar biosol cada seis meses a manera de purga, que permite el funcionamiento continuo del BTLC. Para retirar el biosol se abre una o ambas llaves de paso y se verá discurrir el lodo de fondo hacia la cámara de secado. Al

inicio sale el biosol un poco espeso y después sale más fluido, en ese momento se cierran las llaves. Esta operación se repite dos días más y deben transcurrir seis meses para una nueva purga.



Figura 182. Extracción de biosol del BTLC.

Para hacer reparaciones de la geomembrana del biodigestor o de alguno de sus componentes, se lo debe evacuar completamente; para ello, se abren ambas llaves por las que se extrae el biosol, con lo que el contenido del biodigestor pasará hacia la cámara de secado de lodos de fondo, cuya secuencia se muestra en la Figura 183.



Figura 183. Evacuación total del BTCL.

6.4. Parchado de la geomembrana del biodigestor

Cualquier corte o pinchadura de la geomembrana de polietileno del biodigestor se puede resanar colocando un parche del mismo material, mediante el siguiente procedimiento:

- Ubicar el área afectada.
- Cortar un parche de geomembrana de polietileno que cubra holgadamente la falla a resanar.

- Limpiar bien con trapo húmedo el área de la geomembrana a resanar y el parche a colocar.
- Desgastar, con una amoladora con disco abrasivo, 1 cm del borde de la cara del parche que quedará en contacto con la geomembrana.
- Soldar el parche a la geomembrana con una serie de puntos cada 5 cm aproximadamente, generados por la fusión de ambos por acción del aire caliente producido por un soplador eléctrico a 600°C.
- Desgastar, con la amoladora con disco abrasivo, 1 cm del borde del parche y 1 cm de la geomembrana.
- Aplicar, con la máquina que funde la mecha de polietileno a 276°C, un cordón de 2 cm aproximadamente, que une el parche con la geomembrana.



Figura 184. Parchado de la geomembrana del biodigestor.



Figura 184. (Continuación)



REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS



- Acuña, W. (2012). *Determinación de las ecuaciones que modelan el funcionamiento de una bomba volumétrica manual de 0,2 L* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú.
- Barrena-Gurbillón, M. A., Taramona-Ruiz, L. A., Gamarra-Torres, O. A., y Choy-Wong, M. (2013). *Biodigestores tubulares para la producción de biogás*. Lima, Perú: UNASAM y UNTRM.
- Barrena-Gurbillón, M. A., Julca-Noriega, J., Hellenthal, M., y Ordinola-Ramírez, C. (2015). Rendimiento del biogás como combustible para cocina e iluminación producido en biodigestor tubular en Providencia, Luya – Amazonas. *INDES Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable*, 3(1), 117-124.
- Cepero, L., Savran, V., Blanco, D., Díaz-Piñón, M. R., Suárez, J., y Palacios, A. (2012). Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forrajes*, 35(2) 219-226. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200009&lng=es&nrm=iso
- Chauca, N. (2010). *Propuesta para manejo sustentable de la ganadería en Santo Tomás – Región Amazonas* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú.
- Cubas, F. (2018). *Implementación y rendimiento de un sistema de producción de biogás y bioabonos de 12 m³ a partir del estiércol de ganado bovino en el fundo palmeras, Puma Hermana, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2001). *Cost Methodology Report for Beef and Dairy Animal Feeding Operations* (EPA-821-R-01-019). Recuperado de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/20002QB1.PDF?Dockey=20002QB1.PDF>.
- Greasham, R., y Inamine, E. (1989). Nutritional improvement of processes. En N. Solomon y A. Demain. (Eds.), *Manual of Industrial Microbiology and Biotechnology* (pp. 41-48). Washington DC, EEUU: American Society for Microbiology.
- Hellenthal, M. (2013). *Aumento de producción de biogás – representado por un biodigestor en la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas - Chachapoyas, Perú* (Tesis de Maestría). Universidad de Ciencias Aplicadas y Arte (Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst: HAWK), Göttingen, Alemania.

- Julca, J. (2012). *Rendimiento del biogás como combustible para cocina e iluminación producido en digester tubular en el distrito de Providencia, Luya – Amazonas* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú.
- L'Institut de L'Elevage. (1996). *Bâtiments d'élevage bovin, porcin & avicole: réglementation et préconisations relatives à l'environnement*. Paris, Francia: Direction de l'Espace Rural et de la Forêt (DERF).
- RCM DIGESTER. (2013), *RCM Technology*, Berkeley, EEUU: RCM International, LLC. Recuperado de <http://www.rcmdigesters.com/wp-content/uploads/2013/05/RCM-Covered-Lagoon-Technical-Details.pdf>.
- Silva, A., Gomez, A., Landazury, B., y Preciado, B. (2013). Evaluación de gases de efecto invernadero (GEI) en sistemas ganaderos asociados con pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoechst Ex Chiov). *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 6(1), 36-43.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), y Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO). (2010). *Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México*. Ciudad de México, México: SEMARNAT, SAGARPA Y FIRCO.
- Tejedo, E., y Yopán, E. (2014). *Rendimiento de biogás como combustible para grupo eléctrico de 1 kW* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú.
- Varnero, M. T. (2001). Desarrollo de substratos: Compost y Bioabonos. En: F. Santibáñez, R. Fuster, A. de la Fuente (Eds.) *Experiencias Internacionales en la Rehabilitación de Espacios Degradados. Publicaciones Misceláneas Forestales N° 3* (pp. 21 – 30). Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales.



Mg. Santos T. Leiva

Ingeniero Agrónomo Maestro en Gestión para el Desarrollo Sustentable, Candidato a Doctor en Agricultura Sustentable por la Universidad Nacional Agraria La Molina. Docente ordinario de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza Amazonas (UNTRM) e investigador del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES). Calificado como Investigador Concytec. Especialista en cultivos tropicales e investigador en las áreas de agricultura sustentable y protección de cultivos. Ha liderado programas y proyectos de investigación con financiamiento externo. Ha realizado pasantías de especialización a Brasil, México, Chile, España y Colombia.



Dr. Luis A. Taramona

Biólogo, Maestría en Didáctica de las Ciencias Experimentales y Doctor en Ciencias Ambientales; investigador en ecología y recursos naturales. Docente Visitante de la Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Cuba. Profesor Honorario de la Universidad de Remington, Medellín, Colombia. Profesor Visitante de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Profesor Visitante de la Universidad Nacional de Trujillo. Pasantías en investigación científica, aprendizaje servicio solidario, desarrollo sostenible y energías renovables en Argentina, Cuba, Colombia, Ecuador, Venezuela y Chile. Arbitro científico de revistas nacionales e internacionales. Editor de la Revista Científica Aporte Santiaguino (UNASAM), Editor de la Revista Científica INDES (Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva – UNTRM), Editor de la Revista Electrónica de Investigaciones de la Universidad Le Cordon Bleu. Dirigió la Oficina de Investigación y Cooperación Técnica de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Investigador y Miembro Activo del Centro Latinoamericano de Aprendizaje-Servicio de Argentina (CLAYSS) y del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (UNTRM). Docente Principal y Director del Centro de Investigación de la Universidad Le Cordon Bleu, ex Vicepresidente Académico de la Universidad Nacional de Quillabamba. Actualmente, Presidente de la Comisión Organizadora de la Universidad Nacional Ciro Alegría. Investigador CONCYTEC – REGINA, desde enero del 2019.



Ph. D. Milton A. Huanes

Es Ingeniero Agrónomo y Doctor en Filosofía (Ph.D.) en Agroquímica, por la Universidad de la Amistad de los Pueblos Patricio Lumumba, Rusia. Profesor Principal en la Escuela Profesional de Ingeniería Agrónoma de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo desde 1991, donde también ha ejercido varias direcciones académicas y administrativas y actualmente es el Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias. Ha asesorado tesis y realizado investigación en su especialidad, de lo cual ha publicado en revistas especializadas. Ha difundido el resultado de sus investigaciones en eventos académicos nacionales e internacionales. Se ha capacitado en temas de su especialidad en el Perú; en Trieste, Italia (1993); en la Universidad Estatal de Moscú, Rusia (1996); Universidad de Girona y Universidad Autónoma de Barcelona, España (2008).



Mg. Carla M. Ordinola

Obstetra, Maestra en Obstetricia con mención en Salud Reproductiva, Doctorando en Ciencias para el Desarrollo Sustentable, Especialista en Biología Molecular e Ingeniería Genética, Docente Auxiliar a Tiempo Completo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza Amazonas (UNTRM), Directora de la Escuela Profesional de Tecnología Médica, Secretaria Académica de la Facultad de Ciencias de la Salud, Editora Científica de la Revista de Investigación en Ciencias de la Salud, Docente de posgrado de la UNTRM. Ha publicado artículos científicos en el área de salud y energías renovables. Ha realizado ponencias y conferencias en eventos académicos nacionales e internacionales. Hizo pasantía en Brasil (2018).



FONDO EDITORIAL



PROCICEA
PROYECTO DE CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN CLIMATOLOGÍA Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS

