

REVISTA

SEGUNDA EDICIÓN • 2018

RedBioLAC



**ARTÍCULOS ORIGINALES,
ESTUDIOS DE CASO Y
GRUPOS DE INVESTIGACIÓN**

EN TEMAS RELACIONADOS
A LA DIGESTIÓN ANAEROBIA
EN LATINOAMÉRICA
Y EL CARIBE

La red existe gracias a la colaboración activa de personas e instituciones que permiten el desarrollo de la misma.

Las puertas están abiertas a tod@s los que quieran acercarse y aportar al desarrollo de la tecnología de los biodigestores en la región.



Editorial

A nuestros queridos lectores,

En este 2018 la RedBioLAC celebra su X° encuentro, ya casi se cumple una década de trabajo desde la primera reunión. Desde entonces, la RedBioLAC se fijó el objetivo de convocar a todos quienes quisieran colaborar para desarrollar la tecnología de la biodigestión en la región. Venimos abriendo el diálogo en torno a las lecciones aprendidas, los desarrollos y mecanismos de implementación, las oportunidades y las barreras que se encuentran en los diversos contextos que encontramos en América Latina, sin duda, mucho en común, y mucha información para intercambiar y continuar trabajando.

Con mucha alegría nos encontramos en la segunda edición de la revista, con su formato definitivo, artículos originales, casos de estudio, cápsulas educativas y presentación de grupos de investigación. En esta edición, y gracias al aporte de diversos autores, les ofrecemos una variedad de temas que son de relevancia para el sector de la biodigestión, y que representan una pequeña muestra de lo que sucede en terreno, en laboratorios, empresas, centros de investigación y desarrollo, la academia, entre otros.

En esta década de trabajo, hemos sido testigos de los cambios en la forma de implementación de biodigestores, desde un enfoque vertical (de arriba hacia abajo) en las primeras décadas de trabajo en la región, hacia una demanda y un interés genuino de quienes ven en la tecnología, una gran oportunidad al valorizar residuos para generar energía y abono. En este periodo, hemos visto una creciente satisfacción de las necesidades que harán de los biodigestores una tecnología de uso y aprovechamiento multidimensional. Poco a poco, la tecnología se introduce en círculos donde no se veía su aporte o necesidad. Cada vez más organismos ofrecen cursos, cada

vez son más amplias y multidisciplinarias las temáticas de investigación, cada vez más residuos son tratados en la pequeña y gran escala (en tipos y volúmenes), y numerosos son los grupos de investigación académica, público-privada y, por supuesto, los interesados en desarrollar y utilizar la tecnología, una vez conocidos sus beneficios e impacto.

Hoy en día, se realizan proyectos educativos con el involucramiento de niños y niñas, jóvenes estudiantes, comunidades y pequeños agricultores, se buscan soluciones a la problemática urbana del tratamiento de residuos orgánicos domiciliarios como solución en comunidades aisladas, y se introduce en las agendas de políticas públicas, agroecología, en el nexo agua-alimentos-energía, y en el abastecimiento de combustibles para fines productivos, que permiten introducir la tecnología a modelos de negocios.

Estamos conscientes de los grandes retos y desafíos aún existentes, y esperamos poder seguir trabajando para visibilizar, crear capacidades, y colaborar en crear, las sinergias necesarias para traer esta antigua tecnología, al abanico de las más nobles y orgánicas a disposición del ser humano. Gracias a las bacterias metanogénicas, tenemos a disposición la posibilidad de trabajar y acercar nuestros estilos de vida cada vez más hacia la economía circular y, de incluso, sin siquiera buscarlo, cumplir y alcanzar una buena parte de los "Objetivos de Desarrollo Sostenible del milenio", acorde a la ONU.

Sin duda, al trabajar en estos objetivos, sacamos de las sombras del amplio mundo de las energías renovables no convencionales (eólica, solar, mareomotriz, geotérmica), a los biodigestores, y de paso, diferenciamos a esta tecnología de otras formas de generación de biocombustibles que, en la gran escala, no tienen un análisis de

ciclo de vida tan ventajoso y positivo. En el proceso, al mismo tiempo, aportamos con algunas certezas frente a las cuestionables ventajas con las que se intenta promover la incineración de residuos, bajo la promesa de la "valorización energética" de los mismos.

La digestión anaeróbica de residuos, incide favorablemente en alcanzar ciertos grados de autosuficiencia energética; la disposición de materia orgánica en los suelos, y, con ello, una menor erosión; en la mitigación de gases de efecto invernadero por reemplazo de combustibles fósiles; y en los hogares más susceptibles, la disposición de un combustible que contribuye a una mejor calidad del aire, contribuyendo a disminuir la deforestación, y mejorar la calidad de vida de muchas familias rurales en América Latina.

Más que nunca, creemos que la comunidad latinoamericana puede, y debe incidir en la visibilización de los digestores (a todas las escalas y residuos disponibles), en relación a sus necesidades para el uso exitoso y seguro, las posibilidades que ofrece el mercado, las oportunidades y mecanismos de financiamiento. Debemos articularlos y darle prioridad en nuestras agendas, dada la relevancia de la tecnología, y la urgencia de implementación de tecnologías con genuino impacto positivo.

Es por esto, que la invitación es a vincularse al trabajo que hacemos en la red, y a buscar formas de desarrollo local responsable y sostenible en el tiempo, a ser creativos y participativos en la utilización de esta herramienta de divulgación.

RedBioLAC 2018

- 03. Editorial.
- 04. Índice.
- 05. Presentación de la red.
- 06. Algunas cifras. Misión, visión, valores y objetivos.
- 07. Generando memoria para construir futuro.

ARTÍCULOS

- 08. Evaluación de la eficiencia térmica en estufas fabricadas y modificadas a biogás.
- 14. El sistema *biogas done right* (biogás hecho correctamente) y su potencial impacto en Argentina.
- 20. Análisis del potencial energético de lodos de planta depuradora.
- 28. Presurización y uso de biometano como sustituto de combustibles fósiles en el sector agrícola en Arequipa, Perú.
- 33. Efecto de la aplicación de Biol en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), variedades Amadeus 77 y Dehoró, Zamorano Honduras.

CÁPSULA EDUCATIVA

- 40. Uso del digestato en un terreno en post cosecha: una alternativa a la quema de rastrojos mediante inoculantes provenientes de biodigestores.

ESTUDIO DE CASO

- 44. Tratamiento de aguas residuales agro-industriales con una planta anaeróbica- aeróbica: la experiencia de la Arrocería Los Corrales, Guatemala.

Índice

- 52. Consumo de biogás en hogares rurales y sus implicaciones económicas y ambientales. Caso El Porvenir, Limón.

CÁPSULA EDUCATIVA

- 59. ¿Cómo diseñar un filtro para biogás? La remoción de H₂S con óxido de hierro.

GRUPOS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

- 63. Gestión Ambiental de la Universidad de Santo Tomás en Villavicencio (GAUV).
- 65. Red Colombiana de la Energía de la Biomasa (RedBioCol).
- 66. Revalorización Energética de Residuos Orgánicos (RERO), Universidad Nacional de Villa María, CIT CONICET.
- 67. Generación de biogás a partir de residuos agropecuarios en el sur de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro Regional de Investigación Remehue.

Pasado, presente y futuro de una red autogestada y en crecimiento

10 años de la RedBioLAC

La Red de Biodigestores para Latino América y el Caribe, es una instancia de articulación de personas, profesionales e interesados en el uso, desarrollo, investigación, capacitación y educación en torno a las temáticas de biodigestores, tales como el uso y aprovechamiento del biogás y el digestato, y de variados temas relacionados. Se trata de un grupo interesado y comprometido en la creación de sinergias a nivel latinoamericano, cuyo objetivo prioritario es el de aportar, cada uno desde su espacio de actividades, a intercambiar información y a sacar adelante iniciativas y proyectos que pudieran ser de utilidad de otros colegas, en otros rincones de la región.

La red se ha venido organizando desde un equipo articular central, organizado en un consejo directivo, un consejo honorario, un equipo coordinador, y desde 2016, hemos venido buscando la incorporación de grupos de trabajo para el fortalecimiento del grupo humano detrás de las actividades que organizamos.

Desde su gestación, la red ha buscado sistematizar información y publicar, convocado a ONGs, a grupos de investigación en universidades, a organismos de cooperación en agricultura y energías renovables, a proyectos y programas nacionales de biogás, a agentes de organismos públicos, a (potenciales) usuarios y estudiantes, a proveedores de la tecnología, a quienes brindan cursos de biodigestores, a fundaciones, y a profesionales del sector, para poder dialogar y darse a conocer, local y regionalmente.

De esta manera, se ha logrado organizar y apoyar intercambios de estudiantes y de personas interesadas en conocer otra realidad, y aprender de quienes hacen de anfitriones, de un país a otro, o de una ciudad a otra. Se

han logrado organizar temas específicos de investigación, de comunicación y de generación de capacidades, a través de grupos de trabajo. Gracias a la colaboración de organizaciones locales, se han organizado anualmente, y en 9 países diferentes, nuestros eventos anuales, denominados "Encuentros", en donde se realizan variadas actividades con el objetivo de visibilizar, compartir conocimiento y aprendizajes, y, sobre todo, crear lazos de confianza entre personas de la región. Compartimos webinars, resultados de proyectos y temáticas de interés común, como también consultas generales y particulares de temas afines.

En concreto, la red es una iniciativa en la cual, todos quienes se identifiquen con nuestra misión, visión, objetivos y valores pueden tener un espacio. Por consiguiente, están todos invitados a proponer y comprometerse en ideas o proyectos, y a hacerse parte de los canales virtuales (redes sociales, foro en línea y página web) y presenciales de acción. Queremos que, a través de nuestro trabajo articulador, seamos capaces de llevar la discusión y el conocimiento de la tecnología, desde nosotros y para nosotros, a donde todavía no ha llegado. Que la red sea utilizada como un espacio de expresión y discusión de temáticas, de forma transversal. Que constituyamos una gran base de datos para uso y aprovechamiento de lo que ya existe, que le saquemos provecho a las herramientas virtuales y que no nos sintamos solos (creando una vez más la rueda) en el proceso de desarrollar la tecnología. Así, esperamos poder convertirla en una solución disponible en el abanico tecnológico sostenible, con el fin de su aprovechamiento para nuestro beneficio y el del medio ambiente.

¡Te invitamos a visitar nuestro sitio web! www.redbiolac.org

Editores



Mariela Pino - Chile



Guillermo Zinola - Uruguay



Jean Velásquez - Brasil



Gloria Pedraza - Colombia



Joaquín Viquez - Costa Rica

Consejo Directivo
 Coordinadora General
 Mariela Pino / Chile
redbiolac@gmail.com
www.redbiolac.org
 Fernando Acosta / Perú
 Mariano Butti / Argentina
 Leidiane Mariani / Brasil
 Gloria Pedraza / Colombia
 Lylian Rodríguez / Colombia
 Joaquín Viquez / Costa Rica
 Guillermo Zinola / Uruguay
 Rafael González / Brasil

Revisores
 Gloria Pedraza
 Lylian Rodríguez
 Joaquín Viquez
 Leidiane Mariani
 Jean Velásquez
 Guillermo Zinola
 Mariano Butti
 Fernando Acosta

Filología
 Javiera Arriagada

Registro:
 Referencia:
 Revista RedBioLAC, Segunda Edición, 2018. Publicación anual. Red de Biodigestores de Latinoamérica y el Caribe

ISSN: 2393-7394 / Formato físico
 ISSN: 2393-7408 / Formato digital

Imagen de tapa
 Producción y uso de biometano presurizado como sustituto de combustibles fósiles en el sector agrícola. Instituto de Investigación y Desarrollo para el Sur, Universidad Católica de Santa María. Perú. 2016-2018.

Impresión
 Litoprint
 Travessa Santos, 52 Jd Canadá. CEP 85861-290 Foz do Iguaçu - PR - www.litoprint.lind.br

Diseño gráfico
 Juan Manuel Bove
www.juanmanuelbove.com

Puede hacer uso de esta revista y sus partes citando esta publicación y a la RedBioLAC.

El espacio publicitario es con fines de financiar la impresión de la Revista y no implica que la RedBioLAC promueva las marcas o tecnologías publicitadas.

El contenido de los trabajos publicados es de responsabilidad de sus autores.

Esta revista ha recibido el apoyo de WISIONS y GREENEMPOWERMENT



Algunas cifras

- Realización de 10 Encuentros, en 9 países diferentes.
 - » Participación presencial de más de 1.000 personas en los congresos de la red.
 - » Introducción a la tecnología en cursos de pequeña y gran escala (400 personas).
 - » Articulación con 15 organizaciones locales (Universidades, ONGs, institutos de investigación, etc), para generar eventos de interés y cobertura nacional.
 - » Visitas a 30 biodigestores locales, e instalación de biodigestores apropiados.
- Grupo Google, con casi mil participantes y activa discusión, información de eventos y cursos, y consulta de temas técnicos.
- Grupos de trabajo internacionales.
- 2 cursos virtuales y 10 webinars (conferencias en línea) con participación efectiva de unas 200 personas.
- Biblioteca virtual con más de 600 documentos y presentaciones relacionados a la DA, biodigestores, biogás y biol.
- Redes sociales y página web informativa de noticias, eventos, fondos concursables, y proyectos.
- Generación de guías y material educativo.
- Publicaciones: libro y revista.
- 5 Intercambios internacionales de estudiantes y organizaciones.
- Posicionamiento de estudiantes en prácticas e investigación académica o de campo.
- Presentaciones en numerosos seminarios y talleres en la región, y fuera de ella.
- Incontables vínculos a nivel profesional de personas que han consultado por contactos locales.
- Colaboración con empresas, universidades y organizaciones trabajando en línea.

visión

Ser la organización de referencia en la investigación, desarrollo, implementación y difusión de biodigestores para estimular el manejo adecuado de los recursos naturales y promover el bienestar socioeconómico de Latinoamérica y el Caribe.



misión

Ser una red que aglutina a las instituciones relacionadas con la investigación aplicada y en la difusión de la biodigestión anaeróbica para estimular el tratamiento integral y el manejo de los residuos orgánicos, como estrategias para mejorar el bienestar de la población de Latinoamérica y el Caribe.

Ejes estratégicos: Intercambio de conocimientos, monitoreo y evaluación, investigación, creación de capacidades y educación, incidencia y políticas públicas.



valores

Los valores guían nuestro quehacer estratégico y cotidiano. Se operativizan a través de nuestra práctica. Los valores priorizados por los integrantes de la RedBio-LAC son:

Conciencia Ambiental, Justicia social, Intercambio de conocimiento, Colaboración y trabajo en equipo, Innovación, Responsabilidad.

objetivos

- Intercambiar información y experiencias entre las instituciones participantes en la RedBioLAC Identificar y superar las barreras técnicas, ambientales, sociales y económicas.
- Proponer proyectos, mecanismos e ideas para difundir la tecnología de biodigestores en LAC.
- Generar alianzas que faciliten la adopción de la tecnología de biodigestores.
- Sistematizar la investigación y la disseminación entre socios (Salubridad, Financiamiento, Política, Educación, Industrialización y Comercialización).
- Promover la incorporación de otras organizaciones, instituciones e investigadores en el campo de los biodigestores.
- Fomentar acciones de influencia e incidencia de políticas relacionadas a los biodigestores.

Consejo directivo

Fernando Acosta, Gloria Pedraza, Guillermo Zinola, Joaquin Viquez, Leidiane Mariani (Rafael González), Lylian Rodriguez y Mariano Butti.

Consejo Honorario

Jaime Martí y Alex Eaton.

Equipo coordinador

Caitlyn Peak (Secretariado), Elise Kittrell (Secretariado), Macarena Guajardo (Comunicaciones), Mariela Pino (Coordinación general), Sam Schlesinger (Secretariado).

Colaboradores y organizaciones desde grupos de trabajo, webinars e intercambio de estudiantes

Jean Velásquez, Yudiantuly Acuña, Lawrence Quipezco, Marco Vega, Rafael González, Iara Bethania, Ricardo Steinmetz, Emmanuel Carrasco, Gina Georges, Rodolfo Amador, Carolina Hernández, Víctor Meza, etc. Organizaciones: UTA Foundation, El Común, Heifer, INTA, Alterna, CIDELSA, etc.

Organizadores locales de Encuentros

Soluciones Prácticas de Perú, Universidad Earth de Costa Rica, IRRI de México, AsoFenix de Nicaragua, Universidad El Zamorano de Honduras, CIPAV de Colombia, Viento Sur de Chile, AsoBiogas Costa Rica, Energizar de Argentina, y CIBiogas de Brasil. Y muchos otros profesionales e individuos que han compartido en los congresos, brindando información e interesados en seguir aportando desde proyectos concretos.

Generando memoria para construir futuro

Este segundo número de la revista RedBioLAC se publica en el marco del décimo Encuentro de la red. Este Encuentro y esta revista son testimonio del alto nivel de consolidación que ha logrado la red en una década de trabajo mancomunado. Llegar hasta aquí es un motivo de alegría y orgullo para todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido con sus granitos de arena (algunas también con paladas rebosantes) en este proceso.

Luego de casi diez años de evolución vale la pena preguntarse de nuevo el porqué de una red de actores vinculados al desarrollo y difusión de la tecnología de biodigestores en la región. Yo propongo empezar esta reflexión recordando la motivación inicial que impulsó el comienzo de esta historia: proveer una plataforma para compartir y discutir las experiencias y aprendizajes sobre la tecnología de los biodigestores y sus aplicaciones en la región. Des-

de la primera reunión en Cajamarca (Perú) y a través de cada Encuentro hemos ido (literalmente) encontrándonos con una cada vez mayor cantidad y diversidad de experiencias y aprendizajes. La red a través de sus diferentes herramientas provee un espacio en el que estas experiencias individuales pueden ser discutidas y procesadas en relación con otras y así ir construyendo una "memoria colectiva" sobre la tecnología y sus aplicaciones en la región.

Ahora bien, a la par con la construcción de esa "memoria" la red contribuye a formar o aglutinar un "colectivo de personas" que comparten, valoran y siguen construyendo esa memoria. Yo me permitiré usar el término "comunidad" para denotar a ese colectivo, con el fin de enfatizar que la red también es un espacio en el que se podrían estar gestando otros componentes comunes que mantienen los lazos entre quienes nos sentimos parte de ella. Estos

lazos van más allá de la memoria que hemos construido, y se proyectan hacia el futuro, un futuro que se puede pronosticar, calcular y prever al leer los signos del presente. Estoy pensando en futuro como algo a construir. Y entonces recuerdo la visión propuesta para la red en el plan estratégico 2016-2025: "Una Latinoamérica y Caribe resiliente donde los biodigestores y su uso universal aportan a una mejor calidad de vida". Pienso que aquí radica una fuerza clave de la red.

Es la comprensión de la tecnología como un medio (y no como un fin) para soñar e incluso para construir un futuro mejor. Un futuro por el que vale la pena seguir trabajando juntos.

Willington Ortiz
Wuppertal Institute
Proyecto WISONS



Evaluación de la eficiencia térmica en estufas fabricadas y modificadas a biogás

ARTÍCULO

Joaquín Viquez Arias / Mukhtaar Caydiid / Phenny Adhiambo Omondí

Universidad EARTH

jviquez@earth.ac.cr

RESUMEN

El biogás es probablemente el beneficio más directo y tangible que ofrece un biodigestor. Puede ser aprovechado de diferentes formas, siendo el uso térmico, uno de los más utilizados (ej. cocción de alimentos). Una estufa puede ser calificada por su eficiencia térmica. Varias investigaciones han reportado eficiencias térmicas entre 48% y 55% funcionando con biogás, sin embargo, se desconoce la eficiencia de estufas tradicionales sin aire primario. Esta investigación, realizada en la Universidad EARTH, evaluó la eficiencia térmica de 4 estufas fabricadas, modificadas o adaptadas a biogás.

Se determinó, que en el consumo de biogás, el tamaño o color de la flama, no son indicadores para conocer qué tan eficiente y apropiada es una estufa a biogás. Una estufa con una buena eficiencia térmica, puede representar la mitad de consumo de biogás con respecto a la misma estufa con menos eficiencia térmica. La estufa fabricada a biogás, mostró una de las mejores eficiencias térmicas, además, se demostró que una modificación correcta, puede llevar a eficiencias similares e inclusive superiores. También se concluyó, que una estufa mal adaptada, puede tener una baja eficiencia.

INTRODUCCIÓN

El biogás es probablemente el beneficio más directo y tangible que ofrece un biodigestor. Se produce por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, y está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono. Sus usos se pueden clasificar en cuatro grandes categorías:

- 1. Térmico**, donde se utiliza la combustión del biogás para aprovechamiento directo del calor o del frío (Ej. estufar, calentar agua, calentar aire, entre otros).
- 2. Mecánico**, donde el biogás es usado como combustible para un motor (Ej. mono cilíndrico, 4 tiempos de combustión interna), y este acciona otro implemento (bombeo de agua, ordeñadora, picadora de pasto, entre otros).
- 3. Eléctrico** (o Cogeneración), donde el biogás acciona un motor y este acciona un generador para la producción de electricidad (y potencialmente calor).

4. Biometano, que es la purificación y compresión del biogás para su uso en transporte vehicular o interconexión a redes de gas.

El uso térmico, es la forma de aprovechamiento más utilizada para biodigestores de pequeña escala (o escala doméstica), siendo la cocción uno de los principales usos. La cocción se realiza con una estufa que funciona con biogás. Fulford, D. (2015), presenta una excelente guía para entender cómo funciona una estufa a detalle. En resumen, el gas combustible (gas licuado de propano, GLP; gas natural, GN; o biogás, B), ingresa a la estufa por medio de un inyector (con un diámetro conocido). El gas, al pasar por este inyector aumenta su velocidad, la cual es inmediatamente reducida al ingresar a la "garganta", creando una presión negativa (efecto venturi). Esta presión negativa, permite la succión de aire atmosférico. Este aire, conocido como aire primario, se mezcla con el gas, previo a su combustión en la hornilla. La proporción entre biogás y aire primario debe ser tal, de modo que concuerde con la relación estequiométrica de la combustión en-

PALABRAS CLAVE:

PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA; EFICIENCIA TÉRMICA; ESTUFAS A BIOGÁS.

KEYWORDS:

WATER BOILING TEST; THERMAL EFFICIENCY; BIOGAS STOVES.

tre CH₄ y O₂, y esto se logra definiendo el diámetro del inyector y el diámetro de la garganta, tomando como base la presión del biogás a la entrada. La Figura 1, muestra un diagrama de una estufa con las ecuaciones involucradas en su diseño.

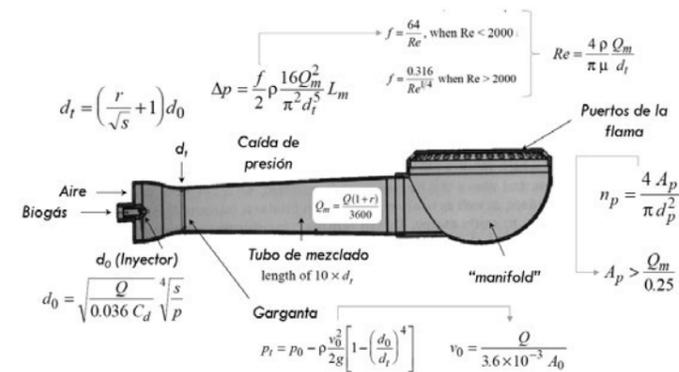


Figura 1. Dibujo de una estufa señalando las diferentes secciones con un resumen de las ecuaciones involucradas.

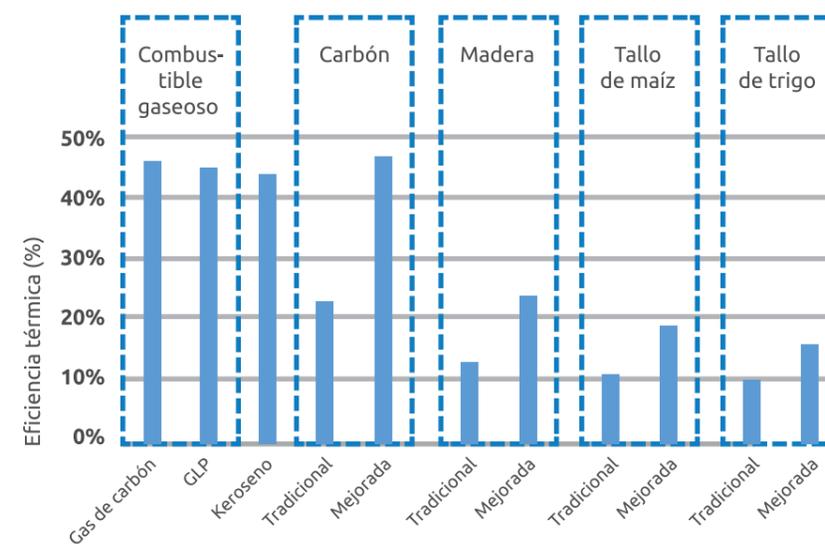
Fuente: Adaptado y tomado de: Fulford, D. 2015.

Small-scale rural biogas programmes: A handbook. Practical Action Publishing.

Ahora bien, una estufa puede ser juzgada por su eficiencia térmica. La eficiencia térmica, es un indicador que permite evaluar la habilidad de una estufa (o una condición particular de operación) en entregar energía neta a una olla (cazuela o cacerola), de la energía recibida en forma de biogás. En otras palabras, si una estufa recibe por ejemplo 18 MJ de energía (gracias al metano en el biogás), y esta "entrega" 7 MJ en forma de calor absorbido por la olla, significa que tiene 38,9 % de eficiencia térmica ($7 \text{ MJ} \div 18 \text{ MJ}$).

Pruebas realizadas a varias estufas modificadas a biogás, utilizadas en el marco del Programa Nacional de Biogás en Nicaragua (Viquez, J. 2016), presentaron eficiencias térmicas entre 48% y 55%, lo cual es excelente si lo comparamos con una estufa tradicional con leña, que tiene una eficiencia térmica inferior al 15%, e inclusive una mejorada con hasta 25%. Otras eficiencias se pueden ver en la Figura 2.

Figura 2. Resumen de eficiencias térmicas de diferentes estufas que utilizan variedad de combustibles. Fuente: (Bailis, P. et al. 2007).



Debido a la baja presión del biogás en los biodigestores flexibles (también conocidos como tubulares, de bolsa, de geomembrana, salchicha, Taiwán, entre otros), una práctica común para "adaptar" estufas a biogás, es eliminar los inyectores en las estufas, y realizar una conexión directa (tal y como se muestra en la Figura 3). Esto elimina por completo el ingreso de aire primario en premezcla, dejando únicamente el aire secundario (aire que se acerca a la llama durante la combustión) para la combustión.



Figura 3. Estufa a biogás sin inyección de biogás, con eliminación de ingreso de aire primario.

Fuente: Elaboración propia.

La estufa de la Figura 3, al usarse, presenta una llama azulada, sin embargo, se sospecha que la eficiencia térmica puede ser fuertemente reducida por falta de oxígeno atmosférico, y, en proporciones no estequiométricas para una combustión completa. Por lo tanto, este estudio buscaba evaluar el impacto del aire primario en la eficiencia térmica, principalmente para la estufa tradicional (como la de la Figura 3), que elimina por completo este concepto, pero comparando con otras estufas que inyectan biogás a presión en diferentes condiciones. Estos son los resultados del Proyecto de Graduación realizado por los estudiantes Mukhtaar Caydiid2, y Phenny Adhiambo Omondí3, como requisito para su título en la Universidad EARTH, quienes, por tanto, merecen todo el crédito por los resultados de esta investigación.

METODOLOGÍA

El experimento se realizó en la finca pecuaria de la Universidad EARTH, ubicada en Las Mercedes, Guácimo, Limón, Costa Rica. La temperatura media anual es de 25°C, con una humedad relativa de 85%, precipitación de 3.687 mm y una elevación de 35 msnm. Se utilizó biogás del biodigestor flexible de geomembrana de PVC, alimentado con estiércol bovino y porcino, con un volumen líquido de 60 m³, y un TRH de 35 días en diseño. El biogás fue filtrado para remover sulfuro de hidrogeno únicamente, y se agregó presión, utilizando una bomba de diafragma y un regulador de presión.

Se evaluó la eficiencia térmica de cuatro estufas. La primera estufa tradicional (T), es una simple hornilla de aluminio fundido, conectada directamente a la tubería de biogás, sin aire primario (similar a la de la Figura 3). La segunda estufa, fue fabricada exclusivamente para biogás (B) (según el fabricante Puxin). La tercera estufa viene de fábrica para gas licuado de propano (GLP). La cuarta estufa, es la tercera estufa, pero modificada a biogás, incrementando únicamente el diámetro del inyector a 1,6 mm (GLPaB-1,6) y 4,3 mm (GLPaB-4,3). La Tabla 1, presenta un resumen de las estufas utilizadas, y la Figura 4, muestra el inyector de la estufa GLP, GLPaB-1,6 y GLPaB-4,3.

Estufa	Combustible	Acrónimo	Descripción
Tradicional	Biogás	T (tradicional)	Sin aire primario.
Fabricada para biogás	Biogás	B (biogás)	Diseñada para biogás.
Fabricada para GLP	GLP	GLP (Gas licuado de Propano)	Diseñada para GLP.
Fabricada para GLP, modificada a biogás	Biogás	GLPaB-1,6 (propano a biogás)	Diseñada para GLP, pero modificada a biogás, con incremento del inyector a 1,6 mm.
	Biogás	GLPaB-4,3 (propano a biogás)	Diseñada para GLP pero modificada a biogás, con incremento del inyector a 4,3 mm.

Tabla 1. Resumen de las estufas señalando el combustible, acrónimo y la descripción de cada una.

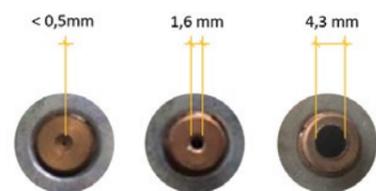


Figura 4. Muestra de los inyectores de la estufa GLP, antes y luego de su modificación a biogás. Fuente: Elaboración propia.

Se evaluó la eficiencia térmica de cada estufa, siguiendo la metodología de "Prueba de agua en ebullición", WBT (por sus siglas en inglés), Versión 4.2.3 (Global Alliance for Clean Cookstoves, 2014). Esta prueba, consiste en elevar la temperatura de 3 kg de agua, de temperatura ambiente a 98°C. Se documentó la pérdida de agua por evaporación (peso inicial menos peso final con balanza electrónica), además del consumo de biogás (medido con un medidor Ritter de 50 L *Bellows-type*), y su calidad con un analizador de gases *GeoTech* (GA-5000). Para las estimaciones de eficiencia térmica, se asumieron los valores de calor específico del agua en 4,2 kJ/kg.K y la entalpía de evaporación en 2.980 kJ/kg. Cada prueba fue realizada cuando la estufa estaba fría, caliente y luego operada en "fuego lento" (45 min manteniendo una temperatura constante), tal y como sugiere la metodología, con una única repetición. También, cada estufa fue evaluada variando la cantidad de aire primario que es succionado por el efecto venturi, reduciendo la apertura de la compuerta para tal fin, en 100%, 50% y 0% abierta (la Figura 4 muestra la tres posiciones en la estufa de biogás (B).

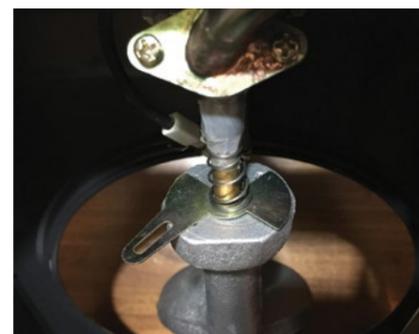


Figura 5. Ejemplificación de la apertura de la compuerta de aire primario en la estufa a biogás. Fuente: Elaboración propia

1. 100% abierta



2. 50% abierta



3. 0% abierta

Adicionalmente, de cada estufa se estimó su potencia, una característica que dice que tan "grande" es la estufa, en términos de la cantidad de energía que es capaz de entregar por unidad de tiempo, altamente influenciado por la eficiencia térmica y consumo de biogás.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2, presenta el promedio de la eficiencia térmica obtenida para cada estufa, incluyendo los resultados de las variaciones de aire primario (presentado como % de O₂). Se incluye también la potencia estimada en kW y el consumo de biogás de cada estufa en Nm³/hr.

Tabla 2. Resultados de la eficiencia térmica promedio (entre frío, caliente y fuego lento) de cada estufa, según la cantidad de aire primario proporcionado, además de la potencia y consumo de biogás.

Estufa	Acrónimo	Inyector (Ø mm)	Eficiencia térmica			Potencia (kW)	Consumo de biogás (Nm ³ /hr)
			0% aire	50% aire	100% aire		
Biogás	B	4 mm	36%	41%	37%	2,2	1,0
Tradicional	T	N/A	20%	-	-	1,4	1,3
GLP	GLP	0,46	41%	53%	49%	1,4	0,1
GLP a biogás (1,6 mm)	GLPaB-1,6	1,6	41%	37%	44%	0,8	0,3
GLP a biogás (4,3 mm)	GLPaB-4,3	4,3	29%	23%	23%	2,0	1,1

ACERCA DE LA EFICIENCIA TÉRMICA, LA ESTUFA Y SU REQUERIMIENTO DE AIRE PRIMARIO

El efecto venturi, se logra al crear una caída en la presión en la "garganta" de la estufa, al reducir la velocidad del biogás saliendo del inyector. El diámetro de la garganta, se calcula para proporcionar estequiométricamente la cantidad de oxígeno requerido para una combustión completa. Por ejemplo, 1 L de biogás con 55% de metano, requiere 6,7 L de aire para una combustión completa (Viquez, J. 2018), y por tanto, una mejor eficiencia térmica. Sin embargo, se acostumbra a sobredimensionar la garganta, regulando la entrada de aire con una compuerta.

Observando los resultados de la Tabla 2, la estufa a biogás (B) tiene su mejor eficiencia térmica (41%) cuando el aire es proporcionado a 50% de apertura de la compuerta. Estos son resultados similares a eficiencia de otras estufas a biogás (Viquez, J. 2016). En esta estufa (B), al incrementar el aire primario (abriendo la compuerta), la mezcla se empobrece¹, reduciendo su eficiencia térmica. Aunque no es un efecto visual significativo (ambos son una llama azulada), los resultados muestran una reducción de hasta 10% en la eficiencia térmica.

Un efecto similar es visto en la estufa de GLP, que operó con su mayor eficiencia térmica (53%) a 50% de apertura. Al empobrecer o enriquecer la mezcla (cerrando o abriendo la compuerta de aire), la eficiencia térmica se ve afectada negativamente (bajando de 8% hasta un 28%).

Este mismo efecto no se repite con la estufa de GLP modificada a biogás (GLPaB). En esta ocasión, a mayor entrada de aire, mejor su eficiencia térmica (un 16% de incremento en 100% de apertura). La estufa está originalmente fabricada para GLP, por lo que la proporción entre aire y combustible está establecida (Aproximadamente a 1:23 (Viquez, J. 2018)). Al modificarla para biogás, esta proporción debe ajustarse, incrementando el biogás, y reduciendo el aire (proporcionalmente); esto se logra al incrementar el diámetro del inyector a 1,6 mm con la compuerta 100% abierta. Interesantemente, al incrementar el inyector a 4,3 mm, en ninguno de los ajustes (0%, 50% ni 100% de aire) se logra una buena eficiencia térmica (máxima de 29%), lo que indica que existe una limitación de hasta donde se puede incrementar el inyector. Esto no fue analizado con más detalle en esta investigación.

La estufa tradicional (T), prevista sin ingreso de aire primario, fue la que obtuvo la menor eficiencia térmica, con un promedio de 20%, siendo menos de la mitad, si lo comparamos con la estufa fabricada a biogás (B), demostrando la importancia de una mezcla correcta de aire: combustible premezclado antes la combustión.

¹ Una mezcla en donde proporcionalmente exista más aire y menos combustible (de los requerido), se considera "pobre". Mientras que una mezcla donde haya más combustible y menos aire (de lo requerido), se considera "rica".

ACERCA DEL CONSUMO DE BIOGÁS Y LA POTENCIA DE UNA ESTUFA

La estufa a biogás (B), la tradicional (T), y la de GLPaB-4,3, presentaron consumos de biogás muy similares (entre 1,0 a 1,3 Nm³/hr). Este es un consumo típico de una estufa a biogás (Viquez, J. 2016), aunque otras fuentes reportan menores consumos, hasta de 0,5 Nm³/hr (Fulford, D. 2015).

La estufa de GLPaB-1,6 presentó el menor consumo de biogás, con 0,3 Nm³/hr, pues, evidentemente, el diámetro del inyector por el cual fluye el biogás, es significativamente más pequeño que su contraparte, con un inyector de 4,3 mm (GLPaB-1,6 y GLPaB-4,3 son la misma estufa solo se varió el diámetro del inyector, ver Figura 4).

El consumo de biogás a través de una estufa, puede ser estimado por la Ecuación 1. Para todas las pruebas, el biogás fue presurizado y regulado, entrando a la estufa con una presión constante de 23 mbar. El flujo para todas las estufas concuerda con las estimaciones de la Ecuación 1, por lo que se confirma que, el flujo es un efecto de presión del biogás pasando a través de un orificio.

Ecuación 1

$$Q_{\text{biogás}} = 0,036 \cdot C_d \cdot d^2 \sqrt{\frac{P}{S}}$$

Fuente: (Fulford, D. 2015).

Donde:

Q_{biogás}: Flujo de biogás en m³/hr
C_d: Es el coeficiente de flujo (valores entre 0,8 y 0,9)

D: Es el diámetro del inyector en mm

P: Es la presión del biogás en mbar.

S: Es la gravedad específica, usualmente de 0,94 kg/m³.

Erróneamente, estufas con mayor consumo de biogás, son vistas como estufas de mayor potencia o "capacidad", pero, en su defecto, es la potencia que determina este "tamaño o capacidad".

El cálculo de la potencia de una estufa, toma en consideración la eficiencia térmica, tal y como se muestra en la ecuación 2.

Ecuación 2

$$P = Q_{\text{biogás}} \cdot \varepsilon \cdot PCS$$

Fuente:

Elaboración propia.

Donde:

Potencia en kW

Q_{biogás}: Flujo de biogás en m³/hr

ε: Eficiencia térmica, en %

PCS: Poder calorífico superior del biogás; depende del contenido de metano en el biogás (ej. 6kWh/m³ para biogás con 60% de metano).

El impacto de la eficiencia térmica en la potencia de la estufa se observa claramente comparando las estufas (B), (T) y (GLPaB-4,3), quienes tuvieron un consumo de biogás muy similar, pero dado las variaciones en sus eficiencias térmicas, la potencia final también es significativamente diferente. Por ejemplo, la GLPaB-4,3 tiene una potencia 10% menor a la estufa a biogás (B), a pesar de que esta consume un 10% menos de biogás. El efecto es aún más marcado en la estufa tradicional (T), con un consumo de biogás de 30% más que la estufa a biogás (B), pero la potencia es 36% menor. En términos prácticos, esto se traduce en que la estufa a biogás (B), consume la mitad del biogás que la estufa tradicional (T), además, logra cocinar 56% más rápido. La Tabla 3 muestra un ejemplo práctico, simulando calentar 10 L de agua de 20°C a 60 °C, estimando el consumo de biogás requerido, y el tiempo en que lo puede hacer cada estufa analizada en esta investigación.

Tabla 3. Ejemplo práctico de los resultados del estudio. Caso hipotético de calentar 10 L de agua de 20°C a 60°C usando las estufas evaluadas.

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Estufa			
	Biogás	Tradicional	GLP a biogás (1,6 mm)	GLP a biogás (4,3 mm)
Estufa	B	T	GLPaB-1,6	GLPaB-4,3
Acrónimo	B	T	GLPaB-1,6	GLPaB-4,3
Eficiencia térmica (% max)	41%	20%	44%	29%
Potencia (kW)	2,2	1,4	0,8	2,0
Consumo de biogás (Nm ³ /d)	1,0	1,3	0,3	1,1
Agua por calentar (kg)	10			
Delta T (°C)	40			
Biogás necesario (m ³)	0,20	0,41	0,18	0,28
Tiempo (min)	12,45	19,48	37,14	16,00

CONCLUSIONES

La eficiencia térmica es un excelente parámetro para calificar una estufa, o inclusive juzgar, si su modificación (de GLP a biogás) mejoró o empeoró su eficiencia. Es una prueba fácil de realizar, sin la necesidad de equipos muy costosos.

Existen diferencias entre las eficiencias térmicas de diferentes estufas a biogás, aunque visualmente todas presentan una flama azulada. El consumo de biogás de cada estufa, el tamaño o color de la flama, no son indicadores para conocer qué tan eficiente y apropiada es la estufa a biogás. Una estufa con una buena eficiencia térmica, puede representar la mitad de consumo de biogás, en comparación con una estufa con baja eficiencia térmica.

Aunque es recomendable adquirir estufas fabricadas a biogás, se demostró que una modificación correcta puede llevar a eficiencias similares e inclusive superiores. Pero también se demostró, que una estufa mal adaptada (en este caso el inyector muy grande para GLPaB-4,3), puede tener un impacto significativo en la eficiencia final.

Aunque se evidenció que la cantidad de aire primario tiene un efecto significativo en la eficiencia térmica, no se evaluó el impacto de otros factores, como el diseño de la hornilla en sí, la posición de la llama sobre la olla, o los diferentes tipos de materiales.

Según los resultados de este estudio, una buena eficiencia térmica se logra al pre mezclar aire con el biogás, en la proporción correcta, previo a su combustión. Sin embargo, para biodigestores flexibles, que operan con bajas presiones (entre 0 y 15 mbar), esta opción es más difícil, por lo que se deberá continuar evaluando otras ideas para incrementar la eficiencia térmica cuando el biogás tiene poca presión, y no se tiene acceso o interés en usar bombas de biogás (para incrementar presión). Actualmente se están realizando más evaluaciones en la Universidad EARTH.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bailis, P. R., Ogle, D., Maccarty, N., From, D. S. I., Smith, K. R., & Edwards, R. (2007). The water boiling test (WBT).

Fulford, D. (2015). Small-scale Rural Biogas Programmes: A Handbook. Practical Action Publishing.

Global Alliance for Clean Cookstoves; GACC. (2014). The water boiling test- Version 4.2.3.

Viquez, J. (2016). Informe de validación de 4 equipos a biogás. Managua: SNV Nicaragua.

Viquez, J. (2018). Manual práctico en biodigestores. Enfocado para pequeña y mediana escala en Latino América. San José. Cooperación Española. Costa Rica.

El sistema *biogas done right* (biogás hecho correctamente) y su potencial impacto en Argentina

ARTÍCULO

Jorge Hilbert¹ / Bruce Dale² / Fabrizio Sibilla⁴ / Rosi Lorella⁴ / Claudio Fabbri³ / Thelen Kurt² / Jeremy Woods⁵

1. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 2. Michigan State University. 3. Research Centre on Animal Production (CRPA), Reggio Emilia Italy. 4. Comitato Tecnico Scientifico Italian Biogas Consortium (CIB), Lodi, Italy. 5. Imperial College London. hilbert.jorge@inta.gob.ar ✉

RESUMEN

El concepto biogás hecho correctamente (*biogas done right*, BDR) se aplica de forma práctica en Italia, consiste en un abordaje de esta tecnología con un criterio sistémico, integrándola a los sistemas productivos. BDR consiste en una serie de medidas, entre las cuales está el doble cultivo, uso de diversos residuos en biodigestión, empleo de los digestatos con mejoramiento de los suelos, uso integral de la energía térmica y eléctrica producida. El grupo internacional, encaró hace un año un estudio global, a fin de dimensionar la potencialidad de BDR en Estados Unidos, Italia, Francia, Reino Unido y Argentina. Se presentan en este trabajo, las conclusiones arribadas para Argentina, junto a una serie de observaciones y conclusiones. La potencialidad para el país, supera el volumen de gas importado actualmente, por una suma superior a los 2.300 millones de dólares. La difusión del BDR también permitirá dar solución a diversas problemáticas agronómicas, como la falta de nutrientes, el deterioro de los suelos, la resistencia a malezas, el uso de agroquímicos extensivo bajas rentabilidades y deficiencia en energía.

PALABRAS CLAVE:

BIOGÁS; BIOENERGÍA;
DIGESTATO; RECICLADO.

ABSTRACT

The concept of *biogas done right* (BDR) is applied in a practical way in Italy, and consists of an approach of this technology with a systemic criterion integrating it into the productive systems. BDR consists of a series of measures among which is the double cultivation, use of various residues in biodigestion, use of digestates with soil improvement, integral use of the thermal and electric energy produced. The international group faced a year ago a global study in order to measure the potential of BDR in the United States, Italy, France, the United Kingdom and Argentina. The conclusions arrived for Argentina are presented in the paper together with a series of observations and conclusions. The potential for the country exceeds the volume of gas currently imported for a sum exceeding 2,300 million dollars. The diffusion of the BDR will also allow solving several agronomic problems such as the lack of nutrients, the deterioration of soils, resistance to weeds, and the use of extensive agrochemicals, farms low profitability and energy deficiency.

KEYWORDS:

BIOGAS, BIOENERGY,
DIGESTATE, RECYCLING.

INTRODUCCIÓN

El sector agrícola de Argentina, uno de los proveedores de alimentos, forrajes, biocombustibles y biomateriales más im-

portantes del mundo, enfrenta enormes desafíos y oportunidades en el futuro cercano. La cantidad de residuos agrícolas, la necesidad de preservar la productividad de los suelos, y la de reducir los productos químicos, brinda una oportu-

nidad enorme para el biogás hecho correctamente (*biogas done right*, BDR). Por el lado de la energía, la política actual de energía renovable, y las crecientes importaciones de gas en dólares, también aumentan la trascendencia de un plan correcto de biogás.

En las últimas licitaciones públicas para proyectos de energías renovables (denominados renovar), el biogás está aumentando su participación en diferentes regiones del país. En esta etapa, el enfoque de los proyectos se ha concentrado en el potencial de la energía eléctrica y en el diferencial tarifario. Existe una necesidad urgente de mejorar este enfoque, al considerar las plantas de biogás de forma sistémica, incluyendo materias primas alternativas y el uso del digestato.

Los agricultores en Argentina son mundialmente conocidos por sus habilidades profesionales y su alta tasa de incorporación de tecnología innovadora a sus campos. En un sector no subsidiado, estas habilidades son fundamentales para sobrevivir en el negocio. El país atraviesa por un déficit importante en el intercambio comercial, y las facturas de importación de energía se están volviendo muy importantes (56% del déficit de 8.427 millones de dólares en 2017).

La participación del gas argentino en la matriz nacional es muy importante (alrededor del 50% en los últimos tres años), la extensión interna de la red de gas supera los 15.000 km, y el uso del sector de transporte, comprende a más de 1,6 millones de vehículos. Estas características abren un buen desafío para el potencial de biometano dentro del concepto BDR.

Desde el punto de vista agronómico, se podrían resumir los principales desafíos que enfrenta el sector en el siguiente listado:

- Déficit energético y creciente dependencia de combustibles importados.
- Déficit nutricional de los suelos.
- Incremento de los ciclos hídricos.
- Resistencia de malezas.
- Ajustados márgenes de ganancia.
- Reducción de la materia orgánica y deterioro físico de suelos.
- Costo creciente de los fertilizantes.
- Contaminación por efluentes de napas freáticas ríos y lagunas.
- Altos niveles de emisiones a la atmósfera de residuos orgánicos.

Una aplicación sistémica y profesional de la tecnología del Biogás, permitiría abordar y aportar soluciones a la mayoría de los puntos citados. Para la cual, se requiere una visión sistémica de la misma, teniendo en cuenta las implicancias del buen uso de todos sus productos.

Desarrollaremos una descripción del BDR y de los resultados específicos de los cálculos sobre la extensión de doble cultivo y del aumento en el uso de múltiples residuos.

El sistema *Biogasdone right*™ (BDR) es un ejemplo de agricultura multifuncional y sostenible según "La hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos"; basada en un suelo cultivado de un año, reciclaje eficiente de materia orgánica y nutrientes, y prácticas de labranza de conservación (Valli et al. 2017). El sistema se está aplicando en varios campos de productores agropecuarios en Italia.

Figura 1. Marco conceptual de BDR.



La agricultura tradicional, con preponderancia a los monocultivos como soja y maíz, sólo permite una producción de material verde fotosintético en un período limitado del año, quedando los suelos descubiertos por más de 5 meses al año, usando para ello, cada vez mayores dosis de herbicidas, generando resistencia de las malezas, y, una baja productividad anual. En campos comerciales en Italia, la introducción de cultivos de cobertura, ha provocado un incremento de la biomasa total sobre el suelo, pasando de 10 tMS/ha.año, a un sistema de cultivo secuencial (dos cultivos por año), con 30 tMS/ha.año. La biomasa adicional producida, se utiliza para alimentación de ganado y como parte de las materias primas para las plantas de biogás. El reciclado de digestato en las tierras de cultivo, da como resultado una mayor tasa de entrada de materia orgánica en comparación con el sistema convencional. Las pérdidas de carbono por el uso del biogás se compensan por la menor degradación del carbono después de la aplicación en el campo del digestato (Möller, 2015), y por el carbono adicional fijado por la segunda cosecha, parcialmente reciclado como digestato también.

Se ha demostrado, que el uso de abonos agrícolas orgánicos, eleva el carbono orgánico del suelo (COS) en los sistemas de cultivo de bioenergía, a un nivel suficiente, para superar la deuda de carbono (C) asociada con la producción de estiércol, recolección y almacenamiento, aplicación del suelo, y emisiones de campo, posteriores a la aplicación (Thelen et al. 2010). BDR aumenta COS en comparación con el sistema de referencia.

Utilizando un enfoque de balance de masa para cuantificar el cambio COS, las mediciones de campo de materia orgánica del suelo, muestran un incremento anual de COS de 0,5 a 1,0 Tc/ha en los primeros diez años de la aplicación de BDR, dependiendo, de varias condiciones. Se espera, que en el mediano plazo (10-20 años), aproximadamente el 20% del carbono orgánico del digestato, pueda convertirse en COS estable.

BDR ya se ha definido como un sistema de bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS) (Valli et al. 2017). La implementación de BDR en los campos de Argentina y Latinoamérica puede brindar una serie de beneficios, que reducen significativamente la Huella de Carbono de los productos agrícolas. Entre estos beneficios, el aumento de SOC puede ser particularmente significativo, en el corto y mediano plazo.

La Figura 2, muestra dos plantas de biogás integradas a un tambo y campo de producción agrícola bajo los conceptos de BDR. En este establecimiento, se producen camas para animales, fertilizantes foliares líquidos, bioabonos sólidos, y se brindan servicios utilizando la fracción térmica como secado de heno y pasteurizaciones de las camas celulósicas para animales.



METODOLOGÍA

Para obtener el potencial de biometano de las diferentes biomásas (residuos y subproductos), se tuvieron en cuenta los datos de producción específica, los contenidos de materia seca promedio (MS), y sus compuestos orgánicos volátiles (COV). La información fue obtenida de la base de datos del laboratorio C.R.P.A 2006. (Tabla 1).

Se consideraron como “biomásas de integración” del biogás las siguientes matrices:

- Cultivos secuenciales: los cultivos antes o después de cultivos principales.
- Cultivo principal: residuos.
- Efluentes del ganado.
- Subproductos agroindustriales.

La tierra disponible para cultivo secuencial para BDR, se estimó con un enfoque conservador. Se emplearon datos estadísticos oficiales de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015-16), para describir la distribución de cultivos en términos de superficie de tierra agrícola. De esta manera, fue posible cuantificar el área más conveniente, dónde los sistemas agrícolas reales, podrían integrarse con un sistema de cultivo secuencial.

Se consideró adecuado para el cultivo secuencial sólo el área no irrigada, por lo tanto, se estimó un rendimiento de cultivos secuenciales conservador (3-4 tMS/ha, Tabla 2). La producción de biometano específica aplicada para los cultivos secuenciales, fue 310-350 Nm³/t SV. El contenido de sólidos volátiles sobre la materia seca (MS) considerada, fue de 92-94%.

Figura 2. Planta de Biogás integrada bajo el principio BDR. Fuente: (HILBERT, 2016).

Tabla 1. Rendimiento específico Biogás para cada biomasa.

	Biogás (Nm ³ /t SV)	Sólidos volátiles – SV (% MS)
Residuos de cosecha (paja, marlos de maíz y tallos)	220	90%
Efluentes del ganado – bovinos	220	83%
Cerdos	280 - 320	83%
Gallinas ponedoras	280 - 320	70%
Pollos, pavo	250 - 280	83%
Subproductos animales-industria frigorífica	500	93%
Industria de la leche	370	90%
Subproductos vegetales-uvvas	110	95%
Otros	300 - 330	95%

Tabla 2. Cultivo secuencial: superficie de tierra disponibles, cultivos y cultivo rendimiento (para ser completado).

Sistema de principales cultivos y superficie considerada (millones ha)	Área de tierra disponible para cultivo secuencial		Cultivos secuenciales	
	% de sup. agrícola	(millones ha)	Especies	Rendimiento (tMS/ha)
Trigo, otros cereales, maíz, soja, girasol, tomate, patata (30,2 millones ha)	30	9,2	Triticale, cebada	3

Con respecto a estiércoles, se consideraron diferentes especies de animales: ganado (ganado de carne y vacas en engorde a corral), cerdos, aves de corral (pollos, gallinas ponedoras). La estimación de la cantidad de efluentes del ganado, y la cantidad relativa de materia seca excretada, se basó en el peso total ganado, teniendo en cuenta el número de animales “confinados” (fuente: USDA, SENASA, ISTAT, 2015-2016) y su peso vivo medio.

Para los cerdos consideramos sólo animales de engorde (de 40 a 120 kg). Para pollos de engorde, se consideró 4,5 ciclos por año para obtener el área de cabeza por año, valor necesario para estimar el biogás producido por año.

La disponibilidad se estimó en el 10 % para ganado de carne vacuno, el 50% para el cerdo, y el 70% para todas las aves de corral. Las cuantificaciones de la disponibilidad de los residuos de cosecha agrícola, se estimaron utilizando los siguientes parámetros:

- Total de producción para cada cultivo herbáceo, cereales y grano de maíz con rendimientos medios oficiales para cada región o país (fuentes: FAO, USDA, MINAGRO SENASA, 2015-2016).
- Relación específica entre el subproducto y el producto principal para cada cultivo considerado (datos de la bibliografía).

Para la valoración de los subproductos agroindustriales, se consideraron a las industrias de fabricación y procesamiento de uvvas, aceitunas, cítricos, tomate y papas industriales, la industria de la carne y la de procesamiento de la leche. Para cada proceso de la evaluación cuantitativa de los flujos de los subproductos generados, se basó en los siguientes elementos:

- Cantidades de insumos de materias primas procesadas por cada ciclo de producción (leche, tomates, uvvas, aceitunas). Se emplearon datos oficiales usados por diferentes fuentes: USDA, FAO, 2015-2016
- Cantidad de cada subproducto por unidad de peso de entrada materia prima (ISPRA, 2010). Estudio sobre el uso de combustibles de biomasa y residuos de biomasa para producción de energía (Rossi et al. 2010)

Se consideró como disponible para la digestión anaerobia, un 50% de la cantidad total de residuos de cosecha y de subproductos de origen agroindustrial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis e integración de la información sobre superficies disponibles, así como los animales en producción, y, tomando en cuenta los valores recolectables a nivel nacional, surgieron los siguientes resultados como valor potencial anual de producción para todo el país. El mismo se compara con el actual consumo total de gas natural.

Tabla 3. Potencial total de producción y consumo actual de metano en miles de millones de m³.

	Argentina
Cultivos secuenciales	10,53
Residuos agrícolas	2,84
Efluentes animales	0,86
Residuos agroindustriales	0,14
Potencial de biometano	14,40
Consumo actual de metano	45,94

Si bien se trata de valores potenciales teóricos, su dimensión es extremadamente importante. La implementación final estará condicionada por diversos factores, entre los que se encuentra la disponibilidad de infraestructura, de transporte para el manejo del material de carga, y los digestatos. El empleo práctico de la energía, también estará limitada por la posibilidad de inyección o uso, tanto de alternativas como gas, así como otros vectores posibles, eléctricos o térmicos.

CONCLUSIONES

El biogás ha tenido un desarrollo exponencial en todo el mundo. De acuerdo a las últimas cifras de la European Biogas Association (2016), el número total de plantas en Europa ha llegado a 17.662. Una producción de 63,3 TWh es suficiente para abastecer de energía a 14,6 millones de familias, es decir, la mitad de todo el consumo eléctrico de nuestro país. La Argentina está despertando a esta tecnología, el relevamiento 2016 detectó más de 100 plantas, y se expanden nuevos proyectos en el área agrícola y agroindustrial. En el último llamado Renovar (Plan de Energías Renovables, 2017) se han presentado 36 proyectos nuevos, con una potencia de 75 MW. Estas cifras marcan claramente la alta potencialidad que tiene el sistema para todo Latinoamérica.

La experiencia adquirida por el Consorcio Italiano de biogás, donde se aplica el principio del biogás hecho correctamente, puede resumirse en los siguientes puntos:

- Profundizar el concepto de economía circular y reciclado
- Incrementar el número y valor de los productos elaborados a campo.
- Equilibrar el balance nutricional de los suelos, reduciendo o eliminando los fertilizantes químicos.
- Minimizar el uso de tierra agrícola adicional, fomentando los intercultivos y cultivos de cobertura.
- Lograr plantas flexibles que se adapten a diferentes tipos de sustratos.
- Reducir la contaminación de suelos, agua, y gases efecto invernadero.
- Producir diferente tipo de vectores energéticos (térmico, eléctrico, mecánico y gaseoso).
- Potenciar el desarrollo económico y el empleo de calidad en las áreas rurales.

El grupo internacional de trabajo "biogas done right", conformado por científicos de Estados Unidos, Inglaterra, Francia, Italia y Argentina, estudiaron la potencialidad de esta tecnología y sus impactos, llegando a cifras potenciales de alta relevancia para Argentina. Dichos resultados fueron presentados durante la conferencia 2018 del Consorcio Italiano de Biogás (página oficial, disponible en: <http://www.biogasitaly.com/>). En la Argentina, la potencialidad del sector supera las actuales importaciones de gas, que equivalen a 2300 millones de dólares, y que, representan el 28 % del déficit comercial.

EL BDR también le permitiría al sector agropecuario afrontar varios de sus desafíos actuales, como el control de malezas y el cuidado de los suelos. A estos conceptos, se ha agregado este año la posibilidad que tiene la agricultura de aportar a una emisión negativa de gases efecto invernadero, y a modular el aporte de energía eléctrica, en un ambiente de creciente participación de la energía eléctrica y solar. Italia es un ejemplo a nivel mundial, puesto que, cuenta con 2.000 plantas operativas, 1.400 MW megavatios de generación, y con la creación de 12.000 empleos directos y 4.000 millones de euros.

Visto a nivel de productor, el biogás permite mejorar la estabilidad económica y el flujo de caja, posibilitando inversiones a mediano y largo plazo. Existen casos verificados de productores, que en ocho años pasaron de facturas de 100 mil euros/año, a 12-13 millones de euros por año. Si bien, el contexto europeo brinda condiciones óptimas en cuanto distancias cortas, buenos sistemas de comunicación y alta industrialización agroindustrial rural, en Argentina hay nichos donde se pueden aplicar en diversas regiones con un alto potencial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

C.R.P.A. editado por (2006). "Mapeo de matrices orgánicas de actividades agropecuarias y agroindustriales en la región de Emilia-Romagna" - Informe Final Pro-BIO región de Emilia-Romagna proyecto de biogás, abril de 2006.

ISPRA, 2010. Estudi., C. Fabbri, Piccinini S. (2012). La prueba (bmp) potencial bioquímico metano de biomasa residual de la industria agroalimentaria. Actas 20 Conferencia Europea de la biomasa y exposición 18-22 de junio de 2012 pp. 1420-1423.

Rossi L., Soldano M., C. de Fabbri. (2010). O sobre el uso de combustibles de biomasa y residuos de biomasa para producción de energía "Informe 111/2010 (ISBN: 978-88-448-0440-4).

Soldano M. Labartino N, Piccinini S. (2014). Metano bioquímica potenciales (bmp) de residuos y subproductos orgánicos, 6 ° Simposio Internacional sobre energía de la biomasa y residuos 14-17 noviembre de 2014.

Soldano M., N. Labartino, L. Rossi, Fabbri C., S. Piccinini (2014). Recuperación de subproductos agroindustriales para la digestión anaerobia: orujo de oliva y pulpa de cítrico. Procedimientos 22 Conferencia Europea de la biomasa y exposición 23-26 de junio de 2014 pp. 203-205.

C. de Fabbri, Soldano M., F. de Ruozzi (2015). Biogás, potenziale energetico dei antiguamente autunno-vernini. Agrario de L'informatore, n.45/2015, p. 61-64.

I. Porqueddu, Soldano M. y otros (2016). Hacia un procedimiento estándar italiano para evaluación de potenciales de metano bioquímicos. Actas del X Simposio sobre p-29 sanitario e ingeniería ambiental (SIDISA 2016), Roma 19-23 de junio de 2016.

M. Blandino, Fabbri C., M. Soldano, Ferrero C., Reynieri. A. (2016). El uso de las mazorcas, un subproducto de grano de maíz, para la producción de energía en la digestión anaerobia. Revista italiana de Agronomía, n.11/2016, p.195-198
LABARTINO N., M. Soldano, Fabbri C., S. Piccinini (2017).

Digestión anaeróbica de residuos biológicos: prueba en reactores de escala laboratorio, Atti del 1er Conferencia Internacional del ABWET: residuos de bioenergía: aplicaciones en áreas urbanas, pp 118-121. Parigi 19-20 enero 2017.

Möller, K., 2015. Efectos de la digestión anaerobia en el volumen de carbono y nitrógeno del suelo, las emisiones de N y la actividad biológica del suelo. Una revisión. Agron. Sostener. Dev 35:1021-1041, DOI 10.1007/s13593-015-0284-3.

Mantovi de Moscatelli, G., P., Piccinini, S., 2017. Una granja a escala sostenible, proceso basado en digestato y microfiltración a la fertirrigación a través de líneas de goteo. ManuREsource, 3rd Conferencia Internacional en manejo del estiércol y valorización, Eindhoven, los países bajos. Libro de resúmenes, 55-57.

Thelen, K.D., B.E. Fronning, S.A. Kravchenko, D.H. Min y G.P. Robertson. 2010. Integración de estiércol con Bioenergía de maíz-soja, sistemas de cultivo mejora a corto plazo, tasas de secuestro de carbono y potencial de Calentamiento Global Net. Biomasa y bioenergía. 34:960-966.

Valli, L., Rossi, L., Fabbri, C., Sibilla, F. el., Gattoni, P., Dale, B.E., Kim, S., Grlock Ong, R., Bozzetto, S., 2017. Gases de efecto invernadero, las emisiones de la electricidad y biometano producción usando el sistema de BiogasdonerightTM: cuatro estudios de caso de Italia. Biocombustibles, Bioprod. Bioref, DOI: 10.1002bbb

Análisis del potencial energético de lodos de planta depuradora

ARTÍCULO

Aristarán Luisina¹, Verónica Córdoba¹, Javier Hungría² Estela Santalla¹

1. Laboratorio de Bioenergía, Centro de Tecnologías Ambientales (cTAE), Facultad de Ingeniería (FIO), Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), Argentina

2. Departamento Ingeniería Química, Universidad de Córdoba, España

vcordoba@fio.unicen.edu.ar ✉

RESUMEN

Los lodos de planta depuradora (LPD) son los residuos sólidos resultantes del tratamiento de aguas residuales domésticas, cuyo alto contenido en materia orgánica degradable, los convierte en la principal fuente de emisión de gases de efecto invernadero de las plantas depuradoras. En el presente estudio, se evaluará el potencial de autoabastecimiento eléctrico de una planta de tratamiento de una ciudad de 100.000 habitantes, a partir de la digestión anaeróbica de los lodos, utilizando el biogás como combustible en un sistema de generación eléctrica.

Se determinó en forma experimental, el potencial de biometano, a partir de un ensayo estandarizado, obteniendo $212 \pm 15 \text{ mL CH}_{4,\text{CNPT}} \text{ g SV}^{-1}$ para una relación sustrato/inóculo de 1, en unidades de sólidos volátiles. Asumiendo una producción anual de 22.500 t de lodos, considerando un rendimiento de conversión de energía térmica a eléctrica del 30%, y una disponibilidad del sistema del 90%, se obtuvo una capacidad de producción de electricidad de 207.000 kWh anuales, lo que representa un potencial de autoabastecimiento de 63,5%, contribuyendo además, a mitigar anualmente 1.165 tCO₂e por la captura de metano, y 101 tCO₂e adicionales por la sustitución de la energía eléctrica en la matriz energética argentina.

ABSTRACT

The sewage sludge is the solid waste resulting from the treatment of domestic wastewater, whose high content of degradable organic matter makes them the main source of emission of greenhouse gases from wastewater treatment plants. It is proposed to determine the electric self-supply potential of a 100,000-hab plant from the anaerobic digestion of sludge and the use of biogas as fuel in a motogenerator for electricity production. The biomethane potential was determined from a standardized test obtaining $212 \pm 15 \text{ mL CH}_{4,\text{CNPT}}/\text{g SV}^{-1}$. Assuming an annual sludge production of 22,500 t, assuming an overall efficiency of 30% and a system availability of 90% it was obtained a potential electricity production of 207,000 kWh per year, which represents a self-supply capacity of 63.5%, also contributing to mitigate 1,165 tCO₂e per year due to methane capture and additional 101 tCO₂e/year for the replacement of electricity in the Argentina electric grid.

INTRODUCCIÓN

Las plantas depuradoras de aguas residuales, son las responsables de gestionar las aguas domiciliarias. Un inadecuado

funcionamiento, puede generar efectos adversos sobre el medio ambiente, tales como contaminación de aguas superficiales, o generación de gases de efecto invernadero (GEIs), así como sobre la salud humana, por la proliferación de vecto-

PALABRAS CLAVE:

LODOS PLANTA DEPURADORA; BIOENERGÍA; POTENCIAL DE BIOMETANO; REDUCCIÓN DE EMISIONES GEIS; BIOGÁS; ENERGÍA RENOVABLE.

KEYWORDS:

SEWAGE SLUDGE; BIOENERGY; BIOMETHANE POTENTIAL; GREENHOUSE GAS EMISSIONS REDUCTION; BIOGAS; RENEWABLE ENERGY.

res. Durante el tratamiento biológico de las aguas residuales, se originan barros denominados lodos de plantas depuradoras. Según Zhen et al. (2017), entre 1 y 2% del agua tratada en las plantas, es convertida en barros como consecuencia de la actividad biológica, y su gestión puede representar hasta el 50% de los costos operativos totales de la planta.

Entre las técnicas usualmente utilizadas para la eliminación de los lodos, se encuentran la deposición en sitios controlados, el compostaje, el secado-incineración, la digestión anaeróbica (DA), la aplicación en tierra, y el reciclaje de materiales de construcción entre otros (Zhen et al. 2017). De todos los tratamientos previamente mencionados, la DA suele ser una de las tecnologías más propicias para el tratamiento de los lodos, no sólo por la revalorización energética de los mismos, a partir de la captura del biogás generado, sino también, porque permite destruir los organismos patógenos, reducir el contenido de materia orgánica, y disminuir su volumen (Appels et al. 2008). A pesar de los beneficios inherentes a la tecnología, según Abelleira-Pereira et al. (2015), la DA de los lodos de depuradora, presenta una baja eficiencia en términos de producción de metano y degradación de materia orgánica, sugiriendo la necesidad de aplicar métodos de pretratamiento que aceleren la etapa de hidrolítica inicial, reconocida por varios autores como la etapa limitante del proceso (Abelleira-Pereira et al. 2015; Zhen et al. 2017). Si bien la aplicación de algunos pretratamientos genera mejoras en la producción de metano, según ha indicado Cano (2015), no se ha tenido en cuenta el aumento del consumo de energía implicada en los mismos, lo que supone una disminución de la eficiencia energética y económica del proceso global. Por lo tanto, se evaluará el potencial de producción de metano de los lodos estabilizados sin pretratamiento, determinando la capacidad de autoabastecimiento eléctrico de la planta.

En Argentina, según el informe del Plan Nacional del Agua (2017), tan sólo el 58,4% de la población cuenta con sistema de cloacas, aunque se proyecta que para el año 2019, este porcentaje aumente al 75%, con la consecuente adecuación del sistema de tratamiento de efluentes. El incremento del caudal de efluente tratado, supondrá un aumento de los lodos generados, pero también un desafío para aprovechar dicho recurso a través de la DA, tecnología que aún se encuentra en estado incipiente de desarrollo, tal como lo demostró el relevamiento de plantas de biogás en Argentina, realizado por el INTI entre los años 2015 y 2016 (Gil et al. 2016). Por otro lado, la Tercera Comunicación Nacional del Gobierno de Argentina, mostró a través del inventario de GEIs del sector residuos, correspondiente al año 2012, que no existe un registro a nivel nacional sobre las plantas depuradoras, su capacidad operativa y la producción de lodos, lo cual, salvo para algunas plantas de tratamiento de aguas domésticas del Área Metropolitana (AySA. 2017), donde los lodos son estabilizados, tratados como biosólidos, y dispuestos en rellenos sanitarios, en el resto del país sólo se los estabiliza y seca en playas al aire libre, sin control de las emisiones de metano. El presente trabajo, tiene como objetivo aportar conoci-

miento sobre las características físico-químicas de los lodos generados en las plantas de tratamiento de efluentes domésticos, determinar su potencial de producción de biometano, a través de un protocolo estandarizado, e identificar su cinética de degradación anaeróbica. La información obtenida, se utilizará para determinar el potencial de producción de energía eléctrica para el autoabastecimiento de la planta depuradora.

METODOLOGÍA

Sustrato e Inóculo

Los lodos utilizados como sustrato en el ensayo, se obtuvieron del sedimentador primario de la planta de tratamiento de efluentes de la ciudad de Olavarría (100.000 hab. - Buenos Aires), mientras que el inóculo utilizado, corresponde a los lodos previamente estabilizados durante 20 días en la misma planta.

Antes de su utilización, el inóculo fue desgasificado por un periodo de 5 días, con el objetivo de agotar la materia orgánica que pueda contener, y así, minimizar la producción endógena de biogás.

Caracterización fisicoquímica

La caracterización del sustrato se llevó a cabo mediante técnicas (APHA. 1999), incluyendo la cuantificación de sólidos totales (ST) y volátiles (SV), demanda química de oxígeno (DQO), pH, alcalinidad y nitrógeno amoniacal (N_{NH4+}). En cuanto al inóculo, además de los parámetros anteriores, también se determinaron sólidos suspendidos totales (SST) y volátiles (SSV).

Determinación del potencial de biometano (PBM)

La determinación del PBM se llevó a cabo en bioreactores batch de 1,2 L de capacidad, utilizando una concentración de inóculo en el reactor de 10 g SV/L, con un espacio de cabeza libre del 20%, de acuerdo a las directivas del protocolo propuesto por Holliger et al. (2016). Se realizaron dos ensayos por triplicado, utilizando dos relaciones inóculo/sustrato (I/S): 2/1 y 1/1 en unidades de SV, denominados ensayo A y B, respectivamente. Los ensayos se llevaron a cabo bajo condiciones mesofílicas (35°C ± 1°C), utilizando un baño termostático para mantener la temperatura del proceso constante, tal como se muestra la Figura 1.

La carga de los reactores para el ensayo de PBM fue realizada utilizando inóculo, sustrato y una solución de nutrientes en las cantidades detalladas en la Tabla 1. En paralelo al ensayo de PBM, se llevó a cabo un ensayo control o blanco, al cual no se le adicionó sustrato, y un ensayo de control positivo (CP), utilizando como sustrato celulosa microcristalina (Angelidaki et al. 2009; Holliger et al. 2016).

Tabla 1. Condiciones de los ensayos de PBM.

Fuente: elaboración propia.

Composición de las mezclas				
ENSAYO	Inóculo [mL]	Sustrato [mL]	Solución de nutrientes [mL]	Volumen total [mL]
A (2/1)	486,49	192,51	281,00	960
B (1/1)	486,49	385,03	88,49	960

El volumen de biogás generado se determinó por desplazamiento de agua acidificada (pH=2), y la composición del mismo (CH₄, CO₂, O₂), se cuantificó diariamente mediante un medidor portátil (Landgem GA2000, Fig. 2) provisto de celdas infrarrojas para la medición de metano y dióxido de carbono (máximo error ±0.5%), y celdas electroquímicas para la medición de oxígeno (máximo error ±1.0%). La calibración de las celdas se realizó con una mezcla de gases certificados patrón (CH₄-CO₂, AGA Certificado 165342). Dicho equipo permite determinar también la presión y temperatura del biogás en cada uno de los sistemas de desplazamiento.

La producción de metano de cada ensayo se corrigió a condiciones normales de presión y temperatura, tal como se indica en la ecuación (1).

Ecuación (1)

$$PBM_{CNPT} \left(mL CH_4 / g SV \right) = \frac{CH_{4\text{acumulado}} \left(mL CH_4 / g SV \right) \cdot P_m \cdot T_{\text{estándar}}}{T_m \cdot P_{\text{estándar}}}$$

Donde T_m y P_m, son los valores de temperatura y presión medidos en el ensayo, respectivamente. Para corregir a condiciones normales, se consideraron los valores de temperatura y presión de 273°K y 1 atm, respectivamente. El valor de CH₄ acumulado, corresponde a la producción neta de metano por parte de sustrato, obtenida restando cualquier producción de metano generada por el inóculo.

Determinación de la reducción de materia orgánica

De cada reactor se determinó el contenido en SV al inicio y al final de las experiencias, con la finalidad de determinar el porcentaje de reducción en el contenido de materia (R_{MO}%), según la ecuación (2).

$$Ecuación (2) \quad R_{MO} \% = \frac{|SV_{\text{inicio}} - SV_{\text{final}}|}{SV_{\text{inicio}}} \cdot 100\%$$

Appels et al. (2008), reportan una forma rápida para estimar la reducción de materia orgánica (V_d) en unidades de SV, a través de la siguiente ecuación empírica:

$$Ecuación (3) \quad V_d = 13,7 \cdot \ln (TRH) + 18,9$$

Donde TRH representa al tiempo de proceso o digestión en días.

Se utilizarán ambas ecuaciones para determinar la reducción de materia orgánica, como una medida de la eficiencia del proceso anaeróbico, identificando posibles diferencias entre ambas expresiones.

Análisis cinético

El estudio cinético de un proceso anaeróbico proporciona información útil para el análisis, diseño y operación de las plantas de producción de biogás (Angelidaki et al. 1993). Los datos experimentales de la producción acumulada de metano se

Figura 1. Biorreactores en baño termostático y medición de gases, equipo de medición portátil Landgem GA2000.

Fuente: elaboración propia.

ajustarán a la ecuación de Gompertz, utilizando Statgraphics Centurion XVI (v.16.2.04). Esta ecuación ha sido ampliamente utilizada por varios autores (Nielfa et al. 2015; Córdoba et al. 2016; Pellerá and Gidaracos 2016) para modelar la producción de biogás y/o metano de diferentes sustratos.

Ecuación (4)

$$M(t) = P \cdot \exp \left(-\exp \left(\frac{R}{P} \right) \cdot (\lambda - t) \cdot e^{\lambda} + 1 \right)$$

Donde M es la producción acumulada de metano [mL g SV⁻¹] en el tiempo t [horas]; λ es el tiempo de retardo [horas]; P es la producción potencial máxima de metano [mL gSV⁻¹] y R, es la velocidad máxima de producción de metano [mL gSV⁻¹ hs⁻¹].

Potencial de Producción de energía eléctrica

La evaluación de la capacidad de generación de energía eléctrica de los lodos, se determinó asumiendo eficiencias de captura del sistema de generación de biogás y de conversión de energía térmica a eléctrica (considerando el uso de un motogenerador), a partir de la ecuación (5),

(5) Ecuación

$$EE = V_{CH_4} \cdot \eta_c \cdot \rho_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4} \cdot \eta_e \cdot f_{cap}$$

Donde EE es la potencial de generación de energía eléctrica [kWh año⁻¹], V_{CH₄} es el volumen anual de metano generado, η_c es la eficiencia de captura de biogás (asumido 85%), ρ_{CH₄} es la densidad del metano (0,656 kg m⁻³), PCI_{CH₄} es el poder calorífico inferior del metano (11.900 kcal kg⁻¹), η_e es la eficiencia en la conversión de energía térmica a eléctrica (considerado 30%) y f_{cap} es un factor de capacidad que representa la disponibilidad total del sistema (se asumió 90%). El volumen anual de metano generado V_{CH₄} (L CH₄ año⁻¹) se calculó a partir de la ecuación (6):

$$Ecuación (6) \quad V_{CH_4} = PBM \cdot SV \cdot G$$

Donde PBM es el potencial de biometano [L CH₄ CNPT kgSV⁻¹], SV es la concentración en sólidos volátiles de los lodos [kgSV kgSV⁻¹ lodo] y G es la generación anual de lodos (kg año⁻¹).

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados se realizó utilizando t-student, con un nivel de confianza del 95,0%. Los datos se expresaron como el valor medio (±) de la desviación estándar de las repeticiones (n = 3). Se realizó una prueba ANOVA para determinar la significancia de los valores medios. Se utilizó Statgraphics Centurion XVI (v.16.2.04).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización fisicoquímica del sustrato y del inóculo

La metodología sugerida por Holliger et al. (2016), establece que, el inóculo a utilizar en la determinación del PBM, debe cumplir ciertos criterios de calidad para asegurar un proceso estable, y evitar problemas de inhibición de la digestión. Por un lado, el valor de pH debe encontrarse en el rango de 7 a 8,5, debe presentar un contenido en nitrógeno amoniacal inferior a 2.500 mg N-NH₄⁺ L⁻¹, y una alcalinidad superior a 3.000 mgCaCO₃ L⁻¹. En la Tabla 2, donde se presentan las características fisicoquímicas del sustrato y del inóculo, se puede observar que el inóculo cumple con todas las condiciones de calidad sugeridas.

El sustrato, por su parte, presenta un contenido en materia orgánica significativamente superior al inóculo, y pH cercanos a la neutralidad, a pesar de que su valor de alcalinidad (1.287,61 ± 7,98 mg CaCO₃ L⁻¹) es relativamente bajo comparado con la del inóculo.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica del sustrato y del inóculo.

Parámetro	I	S
ST [g L ⁻¹]	43,03 ± 1,26	41,83 ± 7,98
SV [g L ⁻¹]	19,73 ± 1,04	24,93 ± 4,34
SST [g L ⁻¹]	40,70 ± 1,50	-
SSV [g L ⁻¹]	19,27 ± 1,53	-
pH	7,60 ± 0,03	6,58 ± 0,02
Alcalinidad [mg CaCO ₃ L ⁻¹]	3.133 ± 60	1.288 ± 8
NNH ₄ ⁺ [mg NH ₄ ⁺ L ⁻¹]	245 ± 26	156 ± 6
DQO [mg L ⁻¹]	41.829 ± 2.754	38.966 ± 6.973

Los valores corresponden al promedio de triplicados ± desvío estándar.

Fuente: elaboración propia.

Producción de biogás y metano

La duración de la DA en ambos ensayos fue de 29 días, al cabo de los cuales, la producción de biogás del tratamiento A alcanzó $343 \pm 18 \text{ mL gSV}^{-1}$, 9,3% superior al tratamiento B ($311 \pm 18 \text{ mL gSV}^{-1}$), aunque sin presentar diferencias significativas ($p=0,0875$). En cuanto al volumen de metano producido, tampoco se observaron diferencias significativas ($p=0,3393$) entre los tratamientos, obteniéndose 201 ± 10 y $212 \pm 15 \text{ mL CH}_4 \text{ CNPT gSV}^{-1}$ para los tratamientos, A y B, respectivamente, tal como puede observarse en la Figura 2. La concentración promedio de metano en el biogás resultó $58,75 \pm 0,23$ y $68,32 \pm 1,18 \%$ para A y B, respectivamente.

Los valores experimentales de la producción de biometano para los ensayos A y B resultaron 18,8 y 14,3% inferiores a los obtenidos por Cabbai et al. (2013), quienes bajo condiciones mesófilas y utilizando una relación I/S de 3/1, obtuvieron $248 \pm 4 \text{ mL CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$ en la DA de los lodos de depuradora. No obstante, los resultados obtenidos en este estudio, se encuentran en el rango de los reportados por Abelleira-Pereira et al. (2015), cuando evaluaron la producción de biogás de lodos, obteniendo valores entre 250 y 300 mL gSV^{-1} con concentraciones de metano promedio entre 71 y 73%.

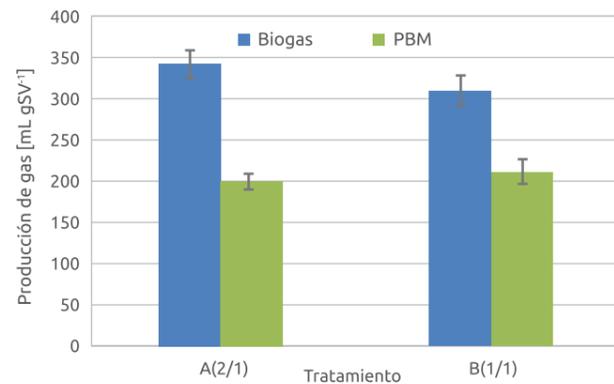


Figura 2. Producción de biogás y metano.

Fuente: elaboración propia.

A fin de validar, el procedimiento aplicado en la determinación del PBM, se analizaron los criterios establecidos en el protocolo propuesto por Holliger et al. (2016), los cuales deben ser cumplidos por los valores experimentales, a fin de aceptar o rechazar su validez. La falta de cumplimiento de alguno de ellos, implicará el rechazo del valor de PBM obtenido. La Tabla 3, muestra junto con los criterios analizados, los valores obtenidos experimentalmente, y el rango máximo aceptable para cada uno de ellos.

Tal como puede observarse de la Tabla 3, los valores experimentales se encuentran dentro de los rangos de aceptación y, por lo tanto, el valor del PBM obtenido para cada ensayo, corresponde a un valor representativo de la producción de biometano de los lodos de depuradora.

Tabla 3. Criterios de aceptación del ensayo PBM.

	Criterio de aceptación	Valor experimental
RSD Blanco	<5%	0
RSD Control positivo	<5%	4,83%
RSD A (2/1)	<10%	4,77%
RSD B (1/1)	<10%	7,00%
PBM del control positivo (NL CH ₄ kgSV ⁻¹)	$352 < \text{BMP}_{\text{cp}} < 414$	$348,8 \pm 16,84$

RSD: Desviación estándar relativa

Fuente: elaboración propia

Remoción de materia orgánica

La remoción de materia orgánica en unidades de SV, no presentó diferencias significativas entre los ensayos, tal como se observa en la Tabla 4, donde se indica el % RMO y el valor de Vd obtenido como resultado de la aplicación de la ecuación empírica propuesta por Appels et al. (2008).

Tabla 4. Remoción de materia orgánica.

	A (2/1)	B (1/1)
% RMO	$46,18 \pm 1,31$	$46,52 \pm 0,84$
Vd (SV)	65,06	65,06

Fuente: elaboración propia

Las diferencias entre la máxima remoción de materia orgánica, para los 29 días que duró el proceso de DA, en ambos ensayos (ecuación 3), y los porcentajes calculados según la ecuación 2, resultaron 41 y 29%, para los ensayos, A y B, respectivamente. Esto puede ser resultado de una ralentización de la etapa hidrolítica, tal como han indicado diversos autores Cano. (2015); Gil et al. (2018), dando como resultado una baja degradación de la materia orgánica junto con elevados tiempos de proceso. De todas maneras, los resultados experimentales, obtenidos en el presente estudio, coinciden con los reportados por autores como Abelleira-Pereira et al. (2015), quienes alcanzaron remociones del orden del 41 al 42%, en tiempos de digestión de 28 días.

Estudio Cinético de la DA de los lodos de depuradora

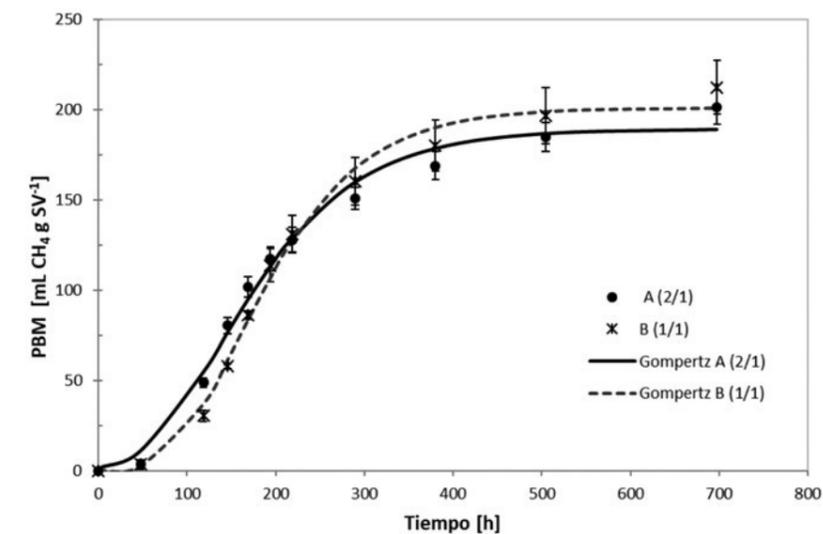
Se realizó el análisis de la cinética de la producción de biometano, mediante el ajuste de los datos experimentales a la ecuación de Gompertz (4). Los valores de los parámetros cinéticos P, R y λ obtenidos, se detallan en la Tabla 5, donde se puede observar, que el modelo propuesto, ajustó adecuadamente los valores experimentales ($R^2 > 99\%$), en los dos ensayos realizados.

Tabla 5. Parámetros cinéticos de la ecuación de Gompertz.

Parámetro	P [mL _{CH₄} gSV ⁻¹]	R [mL _{CH₄} gSV ⁻¹ h ⁻¹]	λ [h]	R ² [%]
A (2/1)	$189,19 \pm 5,46$	$0,8110 \pm 0,082$	$51,24 \pm 11,83$	98,94
B (1/1)	$200,94 \pm 4,95$	$0,9635 \pm 0,087$	$82,18 \pm 8,69$	99,28

Fuente: elaboración propia

De la Tabla 5, se puede observar, que no se presentan diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos para la producción final de metano (P) y para la velocidad de producción de metano (R), indicando que, la concentración de inóculo, no influyó significativamente sobre estos parámetros. Estos resultados, concuerdan con los informados por Neves et al. (2004), quienes encontraron que, un aumento de la cantidad de inóculo utilizado en el sistema, no era un factor determinante en la producción de metano, cuando las relaciones I/S se encontraban en el rango 0,4 a 2, al utilizar como inóculo lodos granulares y como sustrato residuos de comida. Las diferencias observadas en los tiempos de fase lag, entre ambos ensayos, podría estar indicando que, menor concentración de inóculo, demanda mayor tiempo de adaptación de los microorganismos al sustrato. Los tiempos experimentales obtenidos para los ensayos A (2,13 días) y B (3,4 días), resultaron superiores a los reportados por Ortega-Martinez et al. (2016), quienes observaron fases lag inferiores a 2 días, lo que evidencia una etapa hidrolítica limitante de la velocidad de producción de metano. La Figura 3, muestra en rótulos los valores experimentales de la producción de metano (promedios de triplicados), y en líneas el ajuste a la ecuación de Gompertz (ecuación 4).



La utilización de diferentes concentraciones de inóculo en estudios de DA, permiten obtener información relevante del proceso, cuando se desconoce el comportamiento del sustrato, o para identificar la concentración que optimiza la producción de metano. De acuerdo con lo reportado por Holliger et al. (2016), se puede asumir que no existe sobrecarga o inhibición del sistema, cuando los resultados de PBM, obtenidos a partir de dos ensayos con distinta relación I/S, presentan valores similares. Del análisis de los resultados experimentales, al no observar diferencias significativas ni entre el porcentaje de remoción de materia orgánica, ni en los valores PBM, entre los ensayos A y B, se considera que la utilización de una relación I/S de 1, resulta razonablemente adecuada, considerando una mejor utilización del volumen del digestor. Por lo tanto, para la estimación del potencial de producción de electricidad para autoconsumo de la planta depuradora, se utilizará el valor del PBM de los lodos obtenido para el ensayo B.

Figura 3. Producción de diaria de metano y Ajuste de la ecuación de Gompertz.

Fuente: elaboración propia.

Cálculo del potencial de producción de energía eléctrica y reducción de emisiones de metano

Considerando la planta de tratamiento de efluentes domésticos, correspondiente a una población de 100.000 habitantes, con una producción anual de lodos de aproximadamente 22.500 t, aplicando los factores indicados en la ecuación 5, y un promedio registrado durante los últimos cinco años de 326.000 kWh, asumiendo un potencial de producción de biometano de 212 CH₄ CNPT gSV⁻¹ (ensayo B), se obtuvo una producción anual de metano (V_{CH₄}) de 99.500 m³. A partir de este valor, y aplicando la ecuación 5, la generación de energía eléctrica alcanzaría 207.000 kWh al año, representando un reemplazo promedio de la energía consumida por la planta de 63,5% (últimos cinco años de operación). La Figura 4, muestra la variación del consumo de energía eléctrica anual, entre 2013 y 2017 de la planta depuradora, y el potencial energético que proveería el aprovechamiento de los lodos. Los porcentajes sobre cada barra, representan la capacidad de sustitución del consumo de electricidad provista por el aprovechamiento de los lodos para cada año.

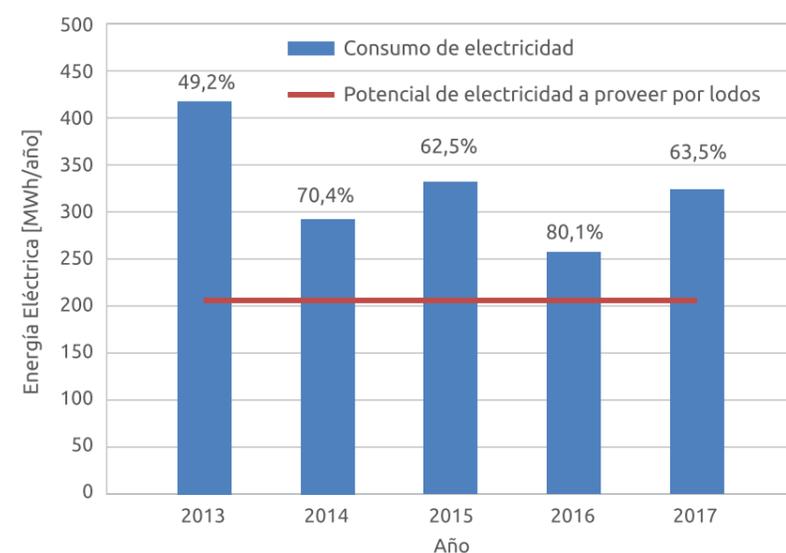


Figura 4. Consumo de electricidad de la planta depuradora y capacidad de sustitución por parte del aprovechamiento energético de los lodos.

Fuente: elaboración propia

La captura y utilización del biogás generado por la DA de los lodos de la planta depuradora de efluentes domésticos, contribuiría a disminuir significativamente el consumo energético de la planta, y si se considera el período 2013-2017, se hubiera contribuido a mitigar anualmente 1.265 tCO₂e, aporte que representa la mitigación de las emisiones de metano (1.165 tCO₂e), más las emisiones por sustitución de energía eléctrica proveniente de la red pública nacional (101 tCO₂e), calculadas a partir del factor de emisión para el año 2015, correspondiente a 0,487 tCO₂/MWh (Ministerio de Energía y Minería, 2018). Considerando que la provincia de Buenos Aires realizó un inventario de GEIs para el año 2014, el cual reportó para el sector "Tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas", un total de 1.020,2 Gg CO₂e (Santalla et al, 2017), la mitigación que podría alcanzarse con el aprovechamiento energético de los lodos representa, para el mismo año del inventario, 0,11% de las emisiones de GEIs de la provincia de Buenos Aires.

CONCLUSIONES

La aplicación de un protocolo estandarizado para obtener el valor del PBM, permitió validar el valor experimental de la producción de metano por DA de lodos, de una planta depuradora que abastece a una población de 100.000 hab. Este parámetro proveyó adecuada certidumbre para estimar el potencial de aprovechamiento energético de los lodos. Los valores obtenidos permitieron establecer una capacidad de producción de electricidad para autoconsumo, que podría contribuir a reemplazar 63,5% del consumo de electricidad de la planta, con la consiguiente disminución de energía fósil y de emisiones de GEIs.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Cooperativa Eléctrica de Olavarría (Coopelétric) por el suministro de los lodos, y al Consejo Interuniversitario Nacional, por el otorgamiento de la "Beca Estímulo a las Vocaciones Científicas" a la alumna Aristarán Luisina para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABELLEIRA-PEREIRA JM, SARA IP, CRUZ R DE, et al. Enhancement of methane production in mesophilic anaerobic digestion of secondary sewage sludge by advanced thermal hydrolysis pretreatment. *Water Research*, v. 71 p. 330–340, 2015. doi: 10.1016/j.watres.2014.12.027
- ANGELIDAKI I, ALVES M, BOLZONELLA D, et al. Defining the biogas potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, v. 59, p. 927–934, 2009. doi: 10.2166/wst.2009.040
- ANGELIDAKI I, ELLEGAARD L, AHRING BK. A Mathematical Model for Dynamic Simulation of Anaerobic Digestion of Complex Substrates: Focusing on Ammonia Inhibition. *Biotechnology Bioengineering*, v. 42, p. 159–166, 1993. doi: 10.1002/bit.260420203
- APHA: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. Washington, DC. American Public Health Association, 1999.
- APPELS L, BAEYENS J, DEGRÉVE J, DEWIL R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 34, p. 755–781, 2008. doi: 10.1016/j.peccs.2008.06.002
- CANO R, et al. Energy feasibility study of sludge pretreatments: A review. *Applied Energy* v. 149, p. 176–185, 2015. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.03.132
- CÓRDOBA V, COLAVOLPE MB, FERNÁNDEZ M, et al. Potential methane production of spent sawdust used in the cultivation of *Gymnopilus pampeanus*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 4, 2016. doi: 10.1016/j.jece.2016.10.009
- Factor de Emisión de CO₂ de la Red Argentina de Energía Eléctrica, <http://www.energia.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=2311>
- GIL A, SILES JA, MARTÍN MA, et al. Effect of microwave pretreatment on semi-continuous anaerobic digestion of sewage sludge. *Renewable Energy*, v. 115, p. 917–925, 2018. doi: 10.1016/j.renene.2017.07.112
- GIL G, GOICOA V, BARLATEY MA, PICCOLETTI A. Relevamiento de Plantas de Biogás en Argentina. In: Probiomasa – INTI, 2016.
- HOLLIGER C, ALVES M, ANDRADE D, et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science & Technology*, p. 1–9, 2016. doi: 10.2166/wst.2016.336
- MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINERÍA ARGENTINA. Cálculo del Factor de Emisión de CO₂ de la Red Argentina de Energía Eléctrica. En <https://datos.minem.gov.ar/dataset/calculo-del-factor-de-emision-de-co2-de-la-red-argentina-de-energia-electrica>. Acceso 01 de Julio de 2018.
- MINISTERIO DEL INTERIOR, OBRAS PUBLICAS Y VIVIENDA. Plan Nacional del Agua. En https://www.argentina.gov.ar/sites/default/files/plan_nacional_agua_.pdf. Acceso 01 de julio de 2018.
- NIELFA A., CANO R, FDZ-POLANCO M. Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnology Reports*, v. 5, p. 14–21, 2015. doi: 10.1016/j.btre.2014.10.005
- PELLERA F, GIDARAKOS E. Effect of substrate to inoculum ratio and inoculum type on the biochemical methane potential of solid agroindustrial waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 4, p. 3217–3229, 2016. doi: 10.1016/j.jece.2016.05.026
- SANTALLA E., CÓRDOBA V. Volumen 5: Residuos. En *Inventario de Gases de Efecto Invernadero de la Provincia de Buenos Aires – Año 2014*. Proyecto "Programa de Desarrollo Regional. "Mitigación del Cambio Climático: Fortalecimiento de Capacidades para el Desarrollo de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero de la Provincia de Buenos Aires", p. 235-275, 2017.
- ZHEN G, LU X, KATO H, et al. Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 69, p. 559–577, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.187

Presurización y uso de biometano como sustituto de combustibles fósiles en el sector agrícola en Arequipa, Perú

ARTÍCULO

José Godofredo Peña Davila¹, Jorge Castro Valdivia², Sergio Mestas Ramos², Fernando Mejía Nova¹, Luz Cárdena Herrera¹, Francisco Roque Rodríguez², Juan Reategui Ordoñez², Irina Salazar Churata¹

1. Instituto de Investigación y Desarrollo para el Sur, Perú. 2. Universidad Católica de Santa María, Perú.

jgpenad@gmail.com ✉

RESUMEN

Se presurizó biometano a 20 y 200 bares y se envasó en tanques metálicos de 25 y 55 L, respectivamente. Se evaluó el empleo de biometano presurizado en: un tractor agrícola con motor gasolinero de 4,85 kW, un automóvil con motor gasolinero de inyección de 77 kW, un grupo electrógeno con motor gasolinero de 7,5 kW, un secador agrícola de cochinilla con plenum de 200 L de capacidad, y un caldero industrial piro tubular de 30 BHP, utilizando 100% biometano. Asimismo, se evaluó un tractor agrícola con motor diésel de 60 kW, utilizando 70% biometano y 30% diésel. Todos los equipos evaluados funcionaron satisfactoriamente. El presurizado y uso de biometano es una alternativa técnica y económica al uso de combustibles fósiles. En la región de Arequipa, el costo del biometano presurizado es de \$ 12,93 USD/GJ, el de gas propano \$ 21,65 USD/GJ, el de petróleo diésel \$25,57 USD/GJ y del gas natural \$16,83 USD/GJ.

ABSTRACT

Biomethane was pressurized at 20 and 200 bar and stored in 25 and 55-liter metal tanks, respectively. Pressurized biomethane was evaluated in: an agricultural tractor with gasoline engine of 4,85 kW, a car with gasoline engine, of 77,0 kW, a generator set with gasoline engine, of 7,5 kW, a cochineal agricultural dryer, with plenum of 200 L capacity, and a pyro tubular industrial cauldron of 30,0 BHP; using 100% biomethane. Likewise, an agricultural tractor with diesel engine of 60,0 kW was evaluated, using 70% biomethane and 30% diesel. All the evaluated equipment worked satisfactorily. The pressurization and use of biomethane is a technical and economic alternative to the use of fossil fuels in the Arequipa region. The cost of pressurized biomethane is \$ 12,93 USD/GJ, \$21,65 USD/GJ propane gas, \$25,57 USD/GJ diesel oil and \$16,83 USD/GJ Natural Gas.

INTRODUCCIÓN

El biogás filtrado, cuyo contenido de CH₄ es superior al 90% en volumen, se denomina biometano. La dificultad para almacenar y transportar el biometano limita su empleo como combustible (Bajracharya, Dhungana, Thapaliya, & Hamal, 2009). Sin embargo, el biometano puede comprimirse a presiones de 20 MPa, y almacenarse en tanques de acero de alta presión (como los de GNC) (Vijay, Chandra, Subbarao, & Kap-

di, 2006). El biometano puede sustituir al combustible vehicular GNV (Gas Natural Vehicular) sin perjudicar la potencia del vehículo, y sin grandes modificaciones en los equipamientos. Asimismo, puede ser utilizado en sistemas de refrigeración industrial, equipos de tratamiento térmico, estufas y hornos industriales, equipos de calefacción, climatización, motores de combustión interna, turbinas, como combustible

PALABRAS CLAVE:

BIOMETANO;
PRESURIZACIÓN;
AGRICULTURA;
COMBUSTIBLES.

KEYWORDS:

BIOMETHANE;
PRESSURIZATION;
AGRICULTURE;
FUELS.

agrícola, etc. (Pires & Agronomía, 2013)(Larsson, Jansson, Grönkvist, & Alvfors, 2015). Al estudiar la energía desde el biogás, reportan un costo de producción de Euro 0,47 a 0,82 por litro de diésel equivalente, comparable con el precio sueco de Euro 0,68 por litro de diésel.

Las emisiones totales de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), aumentan al aumentar el contenido de CH₄ en el combustible, siendo el tolueno, la proporción más alta de emisiones de benceno, tolueno, ethyl benceno y xileno, BTEX (Lim et al. 2015).

El biometano es la aplicación de biogás más rentable, y las ganancias aumentan con la escala de su producción. El biogás con calor y potencia combinada (Combined Heat and Power, CHP) es financieramente inviable debido a su alto costo. El biometano es la bioenergía más rentable, seguido por biohidrógeno, biobutanol y biodiesel de algas, en ese orden (Lee, 2017).

En Perú, existe un crecimiento sostenido en la instalación de plantas de biogás para procesar residuos orgánicos, producir biogás y biofertilizantes. La producción estimada de biogás, en 2015, fue de 26.000 Nm³ biogás/día, equivalente a 13.000 litros petróleo/día. Hay instalados 8 biodigestores de tamaño superior a 1.500 m³, 26 biodigestores con tamaño superior a 100 m³, y más de 1.000 biodigestores tubulares de 5 a 10 m³ (CIDELSA, 2015).

En la región de Arequipa, al suroeste de Perú, el año 2015, la Universidad Católica de Santa María (UCSM), y el Instituto de Investigación y Desarrollo para el Sur, recibieron financiamiento del Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA) para investigar la presurización y el uso de biometano como alternativa a los combustibles fósiles en actividades agrícolas.

METODOLOGÍA

El biogás utilizado fue previamente tratado. Para eliminar el H₂S se inyectó aire en el espacio gaseoso del biodigestor, en cantidades de 3% en volumen de la producción de biogás, a diario. El CO₂, se eliminó utilizando un depurador con agua (scrubber), y el vapor de agua se eliminó utilizando un filtro de Adsorción por Oscilación de Presión (PSA), con zeolita. Al final, se obtuvo el biometano con las características mostradas en la Tabla 1. En el análisis del biogás se utilizó el analizador Geotech Biogas 5000.

Para presurizar el biometano se utilizó un compresor de pistón de 4 etapas, marca Didwania, modelo SF-5/200 de 5 Nm³/h de capacidad, con presión de descarga máxima de 250 bares, impulsado por un motor eléctrico trifásico de 4 kW. Para llenar el biometano en los tanques metálicos a 200 bares de presión, se utilizó una pistola TK10 con válvula de venteo y pico para llenado.

Tabla 1. Composición de biogás y biometano utilizado en la investigación.

Parámetros	Unidad	BIOGAS	BIOMETANO
CH ₄	% v/v	58	90
CO ₂	% v/v	35	8
Vapor de Agua	% v/v	7	2
H ₂ S	ppmv	> 5000	24

El biometano se almacenó en tanques metálicos de 55 litros de capacidad, a 200 bares de presión. Los tanques utilizados fueron los de Gas Natural Vehicular, disponibles en el mercado, fabricados en acero comercial con espesor de pared no menor a 12 mm. Asimismo, se almacenó en tanques metálicos de 25 litros de capacidad, a 20 bares de presión. En este caso, se utilizó tanques de Gas Licuado de Petróleo (GLP). El biometano se utilizó y evaluó en 6 tipos de máquinas.

Secador

Se utilizó un secador rotativo de 200 litros de capacidad, formado por un ventilador con motor eléctrico, un quemador para GLP, una transmisión-reducción con motor eléctrico, y un cilindro metálico de 200 litros. El biometano se tomaba de un tanque metálico de 25 litros, a 10 bares de presión, utilizando un reductor de presión, para llevarlo a 1,1 bares. Luego se alimentaba al quemador de gas.

Las modificaciones realizadas en el quemador fueron:

- El diámetro original del orificio de la boquilla de salida de gas del quemador se agrandó de 0,5 mm a 5,0 mm, para permitir que saliera una mayor cantidad de biometano.

El secador se probó utilizando biometano en secado de cochinilla (*Dactylopius coccus* Costa).

Caldero

Se utilizó el biometano presurizado para hacer funcionar el quemador GLP marca Wayne de un caldero de 30 BTU de potencia, pirotubular, de posición vertical. Originalmente el caldero trabajaba con GLP. El biometano se tomaba de un tanque metálico de 55 litros, a 200 bares de presión, y se alimentaba a un reductor de presión STAG Tomasetto AT04 GNV, para llevarlo a 1,2 bares. Luego se alimentaba al quemador de gas.

Las modificaciones realizadas en el quemador fueron:

- Modificación del tubo de mezcla de aire.
- Adecuación del difusor de aire y calibración de la tobera.

Grupo electrógeno

Se utilizó el biometano presurizado para hacer funcionar un grupo electrógeno marca GENERAC con motor de gasolina de 420 cm³ y 10 kW de potencia, que impulsaba a un generador eléctrico con las siguientes características:

- Potencia continua: 7,5 kW
- Máxima potencia: 9,38 kW
- Voltaje: 120/240 V
- Corriente en potencia continua: 62,5 / 31,3 A
- Frecuencia: 60 Hz.

La alimentación y despresurización del biometano fue similar a la señalada para el caldero.

Las modificaciones realizadas en el motor fueron:

- En la tubería de admisión del aire, luego del filtro, se le colocó una manguera para alimentar el biometano.
- Válvula de control, que permite el arranque del motor con gasolina, para luego pasar a 100% biometano.

Tractor agrícola con motor diésel

Se utilizó el biometano presurizado para hacer funcionar el motor Perkins A6PF-305 diésel de 59 kW de potencia, 4 tiempos, de un tractor agrícola Massey Ferguson 1175 S. Originalmente el motor trabajaba con petróleo diésel.

El biometano se tomaba de un tanque metálico de 55 litros, a 200 bares de presión, y se alimentaba a un reductor de presión STAG Tomasetto AT04 GNV, para llevarlo a 1,2 bares.

Las modificaciones realizadas en el motor fueron:

- Se colocó una válvula manual tipo ON/OFF, que permitía controlar la alimentación de biometano hacia el reductor de presión.
- Se colocó un sistema de calefacción, utilizando el agua caliente del sistema de refrigeración, para calentar el biometano alimentado al reductor de presión.
- Se colocó una unión tipo "T" a la salida de la tubería del filtro de aire, para inyectar el biometano despresurizado.
- Se reguló la bomba de inyección para que trabaje con la mezcla 70% biometano y 30% petróleo diésel.

Tractor agrícola con motor Otto (gasolina)

Se utilizó el biometano presurizado para hacer funcionar un motor Nouki HS-004 gasolinero, de 4,85 kW de potencia, de un tractor agrícola de 2 ruedas. Originalmente el motor trabajaba con gasolina. La alimentación y despresurización del biometano fue similar a la señalada para el caldero.

Las modificaciones realizadas en el motor fueron:

- Se colocó un Kit de Carburador 3G para regular la salida de biometano desde el regulador de presión.
- En la tubería de admisión del aire, luego del filtro, se le colocó una manguera para alimentar el biometano.
- Se colocó una válvula de control, que permite el arranque del motor con gasolina, para luego pasar a 100% biometano.

Automóvil con motor Otto (gasolina)

Se utilizó el biometano presurizado para hacer funcionar un motor gasolinero Toyota 4AFE, de 77 kW de potencia de un automóvil. Originalmente el motor trabajaba con gasolina, con inyección electrónica. El biometano se tomaba de un tanque metálico de 55 litros, a 200 bares de presión, y se alimentaba a un reductor de presión AT 12 CNG RMAT 3800, para llevarlo a 1,75 bares. El reductor toma agua caliente del sistema de refrigeración del motor para calentar el biometano.

Las modificaciones realizadas en el motor fueron:

- Se colocó inyectores de GNV AC W02, con orificio de diámetro de 2,2 mm. Para colocar los inyectores se tuvo que taladrar la culata del motor.
- Se colocó un controlador de GNV STAG 4 BOX PLUS que gobierna la inyección del biometano, enviando el pulso de inyección hacia los inyectores de gasolina o de biometano.
- Se instaló un filtro de biometano, para remover impurezas.

Evaluación económica

Para evaluar la factibilidad económica del uso de biometano como combustible de reemplazo de combustibles fósiles, se realizó una evaluación económica, utilizando los precios de mercado de Perú. Se consideró un poder calorífico de 36 MJ/Nm³ para el biometano, y se comparó el costo por unidad de energía de distintos combustibles.

Norma Técnica

Ya que en Perú no existe una norma técnica para la presurización y envasado de biometano, se desarrolló una propuesta de norma técnica, para presentarla a la entidad competente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema de presurización del biometano trabajó adecuadamente, permitiendo presurizar biometano a 20 bares, para almacenarlo en tanques metálicos de GLP de 25 litros. Asimismo, se presurizó biometano a presiones de 200 bares, envasándolo en tanques metálicos de GNV de 55 litros de capacidad. El sistema trabaja en forma similar a lo observado en el Indian Institute of Technology, que también utiliza un compresor para biogás marca Didwania.

El compresor tiene una capacidad de trabajo de 0,07 a 0,09 Nm³ biometano/minuto, para presiones de envasado de 200 bares.

En el secador de cochinilla, el biometano luego de quemarse, se mezcla con el aire de secado para calentarlo, y entra en contacto con la cochinilla. El secador permite secar 6 kg de cochinilla (peso húmedo) en periodos de 12 horas de operación, y llevarlo a 2,22 kg, con contenido de humedad final de 9%, y contenido final de ácido carmínico de 19,42%. La temperatura durante el secado fue de 60°C, y se consumió 318 L biometano/h.

Considerando el poder calorífico del biometano, de 36 MJ/Nm³, el consumo específico de energía fue de 22,89 MJ/kg de cochinilla.

En el caldero, el uso del biometano produjo los resultados mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del uso de biometano en caldero.

Parámetros	Unidad	Valor
Temperatura gases combustión	°C	150 - 200
CO ₂	ppmv	40 - 90
CO ₂	% v/v	10 - 14
O ₂	% v/v	2 - 8
Eficiencia	%	80 - 90
Exceso de aire*	% v/v	11 - 25

* El exceso de aire se refiere al volumen mayor al valor estequiométrico.

El biometano permitió disminuir las emisiones en monóxido y dióxido de carbono, comparado con el GLP de mayor peso molecular.

- En el grupo electrógeno, se tuvo que adaptar el sistema eléctrico de arranque, de modo que coordinara la apertura del solenoide del reductor, y permitiera el paso adecuado del biometano sin reducir la admisión del aire.

En el tractor agrícola con motor diésel de 59 kW, inicialmente se colocó la alimentación hacia el reductor de presión, sin utilizar calefacción. Debido a la alta tasa de consumo del motor, 1,1 L/s; el biometano en despresurización, enfriaba el equipo y no se lograba terminar el proceso. Es por ello, que se tuvo que utilizar el calor del agua de refrigeración para poder calentar el biometano, y lograr que el reductor de presión trabaje.

Durante la operación del tractor, se observó que cuando se le operaba 100% en petróleo, la emisión de material particulado era mayor que cuando se le operaba en 70% biometano, 30% petróleo. No se pudo medir el torque y potencia del motor, porque no se contaba con los equipos, pero durante el trabajo en campo, no se apreciaba pérdidas de potencia.

Respecto al tractor agrícola con motor Otto de 4,85 kW, no se notaba diferencia entre la operación con gasolina y la operación con biometano, el funcionamiento fue el adecuado.

Sin embargo, como el arranque del motor era con cordón de tiro, para facilitar el arranque, inicialmente se operaba el motor con gasolina, y luego de 1 minuto se cerraba el paso de gasolina y se continuaba operando 100% a biometano.

Se realizaron cinco pruebas de operación, de 30 minutos de duración cada una, y en todas las pruebas el motor funcionó correctamente.



Figura 1. Tractor de 2 ruedas con motor de gasolina, adaptado para funcionar con biometano.

En el automóvil con motor Otto de 77 kW, las pruebas mostraron que el tiempo de inyección de biometano, era 1,8 veces mayor al tiempo de inyección de gasolina.

El valor estequiométrico al utilizar gasolina, fue de 14,7:1, y al utilizar biometano, fue de 17,2:1, en volumen.

- En las pruebas utilizando gasolina, se pudo observar que el tiempo de inyección debe estar en el rango de 2 a 2,8 minutos, fuera de ese rango, el motor no arranca. En las pruebas utilizando biometano, el tiempo de inyección debe estar en el rango de 3,7 a 4,8 minutos, fuera de ese rango, el motor no arranca.

Al analizar los costos, Tabla 3, se observa que el costo específico energético del biometano presurizado es equivalente al 60% del GLP, 50% del petróleo diésel y 75% del GNV.

Adicionalmente, al ser el biometano el único combustible renovable de los 4 señalados, su impacto sobre la conservación del medio ambiente es un aspecto positivo a considerar.

Tabla 3. Parámetros del uso de biometano en caldero.

Parámetros	GLP	DIESEL	GNV	BIOMETANO
Costo	1,09 USD/kg	0,92 USD/L	0,61 USD/m ³	0,47 USD/m ³
Poder Calorífico	50,4 MJ/kg	36 MJ/L	36 MJ/m ³	36 MJ/m ³
Costo Específico Energía (USD/GJ)	21,65	25,57	16,83	12,93

La propuesta de Norma Técnica Peruana elaborada, se presentó al Instituto Nacional de la Calidad para su revisión, como Norma Técnica de Empresa.

CONCLUSIONES

- El presurizado (200 bares) y uso de biometano es una alternativa técnica y económica al uso de combustibles fósiles, en la región de Arequipa.
- Los 6 equipos evaluados, funcionaron adecuadamente al utilizar el biometano presurizado.
- El costo por unidad de energía del biometano presurizado es de \$12,93 USD/GJ. En comparación, el del gas propano es de \$21,65 USD/GJ, el del petróleo diésel es de \$25,57 USD/GJ y el del Gas Natural es de \$16,83 USD/GJ.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado gracias al financiamiento del Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bajracharya, T. R., Dhungana, A., Thapaliya, N., & Hamal, G. (2009). Purification and Compression of Biogas: A Research Experience. *Journal of the Institute of Engineering*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.3126/jie.v7i1.2066>

CIDELSA, 2015. Comunicación personal.

Larsson, M., Jansson, M., Grönkvist, S., & Alvfors, P. (2015). Techno-economic assessment of anaerobic digestion in a typical Kraft pulp mill to produce biomethane for the road transport sector. *Journal of Cleaner Production*, 104, 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.054>

Lee, D. H. (2017). Evaluation the financial feasibility of biogas upgrading to biomethane, heat, CHP and AwR. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(45), 27718–27731. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.030>

Lim, C., Kim, D., Song, C., Kim, J., Han, J., & Cha, J.-S. (2015). Performance and emission characteristics of a vehicle fueled with enriched biogas and natural gases. *Applied Energy*, 139, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.084>

Pires, R. O., & Agronomía, B. (2013). Sistema de Compresión de Biogás y Biometano Biogas and Biomethane Compression System. *Información Tecnológica*, 24(6), 3–8. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600002>

Vijay, V. K., Chandra, R., Subbarao, P. M. V., & Kapdi, S. S. (2006). Biogas Purification and Bottling into CNG Cylinders : Producing Bio-CNG from Biomass for Rural Automotive Applications. *The Second Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment*, 003(November), 1–6. <https://doi.org/10.1109/LPT.2009.2020494>

Efecto de la aplicación de Biol en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*), variedades Amadeus 77 y Dehoro, Zamorano Honduras

Estefanía Beatriz Santín Chávez

Escuela Agrícola Panamericana "Zamorano", Honduras.

bettibs56@outlook.com ✉

RESUMEN

El biol es un fertilizante orgánico líquido que estimula el crecimiento, las actividades fisiológicas y protege las plantas de enfermedades y plagas (FOCONDES, 2014). El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación del biol en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris L.*), de las variedades Amadeus 77 y Dehoro. Se realizó una caracterización química del biol y del suelo. En una parcela de 120 m², se realizaron cinco camas de 25 metros de largo y 40 cm de ancho, con un sistema de riego por goteo y micro-túnel. Se evaluó el efecto del biol en biomasa seca, vainas+semillas, vainas secas, 100 semillas secas, semillas secas y rendimiento. Se realizó un diseño completamente al azar, con arreglo factorial de parcelas divididas con cinco repeticiones, y un ANDEVA ($P \leq 0,05$), prueba de DUCAN y LSMEANS. Los resultados mostraron que el biol en la variedad Dehoro, a una dosis de 250 mL/planta, tuvo el mejor rendimiento con 3.391 kg/ha.

ABSTRACT

Bioslurry (biol) is a liquid organic fertilizer, it stimulates growth, physiological activities and protection against illnesses and plagues in plants. The objective's study was to evaluate the effect of the addition of biol in bean cultivation (Phaseolus vulgaris L.), varieties Amadeus 77 and Dehoro. A chemical characterization of the biol and the soil was made. Five beds of 120 m² plot were built (25 m long and 40 cm wide), drip irrigated under microtunnels. The effects of the biol in dry biomass, sheath+seed, dry sheath, 100 dry seeds, dry seeds and yield were evaluated. A completely random design with factorial plot arrangement split in five repetitions and an ANOVA ($P \leq 0.05$), DUNCAN and LSMEAN tests were run. The biol on the Dehoro variety at a 250 mL/plant doses had the better yield with 3,391 kg/ha.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un elemento básico para el desarrollo de la vida. Por su capacidad lenta y de larga recuperación es considerado un recurso natural no renovable. Son diversas las funciones que cumple el suelo en el diario vivir del ser humano. Entre las funciones más destacadas está la agricultura, siendo esta actividad la más contaminante para el suelo, debido al uso intensivo que se le da al recurso (Silva y Correa, 2009).

La constante fertilización con químicos y la falta de buenas

prácticas de conservación de suelos, son factores para la pérdida de la fertilidad del suelo. Por tal motivo, la agricultura se encuentra en el desafío de erradicar los factores que propician el deterioro del suelo, mediante estrategias que ayuden a la solución de estos problemas, y a disminuir los costos de fertilizar en regiones de escasos recursos (Quintero et al. 2005).

Como estrategias para la fertilización del suelo, se consideran el uso de fertilizantes orgánicos que no degraden el suelo y que, proporcionen los nutrientes adecuados para los cultivos. El biol es un fertilizante orgánico líquido, que se

PALABRAS CLAVE:

ACTIVIDAD FISIOLÓGICA;
FERMENTACIÓN;
RENDIMIENTO.

KEYWORDS:

FERMENTATION;
PHYSIOLOGICAL
ACTIVITY; YIELD.

obtiene a partir de la fermentación anaeróbica de residuos de animales, plantas y aguas residuales (INIA. 2008). Su función es estimular el crecimiento, actividades fisiológicas y proteger las plantas de enfermedades y plagas (FOCONDES. 2014). Además, el biol es un subproducto de la generación de biogás (Aparcana y Jansen. 2008), esta descomposición de materiales orgánicos, se realiza en un ambiente anaeróbico, que tiene varias fases para la obtención del biogás (Sistema Biobolsa. 2015).

Los componentes del biol dependen del tipo de material orgánico que se utilice para alimentar el biodigestor (Aparcana y Jansen. 2008). El biol que proviene de estiércol de animales tiene en su composición química, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio (Bejarano y Méndez. 2004). Estos nutrientes son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, y son parte de las funciones metabólicas o estructurales de las mismas (Gutiérrez. 2002). Es necesario, previo a la aplicación de fertilizantes orgánicos, que se realice análisis de suelos, análisis químicos de Biol y conocer los requerimientos nutricionales de las plantas para tener un mejor rendimiento de los cultivos (Cerquera et al. 2010).

La fertilización con productos químicos es uno de los factores que contribuyen a la generación de gases de efecto invernadero, los que son liberados a la atmósfera, y generan un impacto negativo para el ambiente, más que el sector industrial. Si no se toman las medidas necesarias para erradicar este problema, el suelo seguirá perdiendo su fertilidad, y la seguridad alimentaria se verá afectada (Sinergia. 2006). Por tal motivo, se considera la fertilización orgánica de las plantas como una técnica que no genera un impacto negativo en el ambiente. Algunos experimentos e investigaciones, demuestran que los abonos orgánicos pueden cumplir con los requerimientos nutricionales de una planta, mejoran la aireación del suelo, retienen mayor humedad, y tienen gran aportación de materia orgánica (Jarrín Cárdenas. 2011).

El biol ayuda en el crecimiento vegetativo y actividades fisiológicas de las plantas. Por ser un fertilizante orgánico, mantiene las condiciones adecuadas para el suelo, manteniendo la humedad, generando materia orgánica, y evitando de erosión de suelo (De la Rosa Méndez. 2012). También se debe recalcar que los fertilizantes orgánicos reducirían los costos por fertilizar, lo cual ayudaría a los productores. Por tal motivo, el estudio pretendió evaluar el efecto de la aplicación del biol en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), en las variedades Amadeus 77 y Dehoro.

METODOLOGÍA

Localización del estudio

El estudio se realizó durante los meses de junio y agosto de 2017, en el lote 15 del módulo de Manejo y Conservación de Suelos, en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. Ubicada en el Municipio de San Antonio de Oriente, Depar-

tamento Francisco Morazán, a 32 km al suroeste de Tegucigalpa, Honduras.

Análisis de suelos

En el lugar donde se desarrolló el experimento, se tomó una muestra de suelo. Dicha muestra, se envió al laboratorio de suelos de la Escuela Agrícola Panamericana para su respectivo análisis químico. El método utilizado para el análisis de potasio, calcio, magnesio y sodio en los suelos, fue la solución extractora Mehlich III, determinada por espectrofotometría de absorción atómica. El fósforo se analizó mediante la solución extractora Mehlich III, determinado por colorimetría; el carbono Orgánico fue determinado por método de Walkley y Black para suelos minerales no salinos, con incertidumbre de $\pm 0,04$, y la materia orgánica al multiplicar el carbono orgánico por el factor 1,724. El nitrógeno total fue calculado estimando el 5% de materia orgánica, y el pH: 1:1 en agua: (AOAC 994.16) rango de 4,00-7,00, con incertidumbre de $\pm 0,10$ (Arévalo y Gauggel. 2015). Los resultados fueron: para nitrógeno 1,74 %, para fósforo 12 mg/kg, para potasio 293 mg/kg, y para materia orgánica 1,74 %.

Análisis de biol

Se tomó un litro de muestra de biol, el que fue extraído del biodigestor de zona 2, del módulo de Energía Renovable de la Escuela Agrícola Panamericana. Esta muestra, fue enviada al laboratorio de suelos, donde se realizaron los análisis químicos. Los métodos utilizados para el análisis fueron: el nitrógeno fue determinado por el método AOAC 2001.11. El potasio, calcio, magnesio, cobre, hierro, manganeso y zinc por digestión, determinado por Espectrometría de absorción atómica de llama acetileno-aire (AOAC 965.09). El fósforo fue obtenido por digestión, determinado por colorimetría de azul de molibdeno.

El pH se obtuvo por relación acuosa 1:1; la materia orgánica, como cenizas por Gravimetría, y el carbono orgánico, que corresponde al 58% de la materia orgánica. Los resultados de análisis fueron 20, 10, y 90 mg/kg de nitrógeno, fósforo y calcio, con los cuales se procedió a realizar la respectiva dosificación del biol para la fertilización del frijol, y la densidad, fue 1,01 g/mL (AOAC International, 2002).

Siembra del cultivo

En una parcela de 120 m², se realizaron 5 camas de 25 m de largo cada una y 40 cm de ancho, con una hilera de siembra por cama, separadas de centro a centro por 1,10 m. Como cultivo de ensayo, se usaron dos variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), Amadeus 77 y Dehoro. Se realizó la siembra el 21 de junio, con un distanciamiento de 10 cm entre plantas y dos semillas por postura. En cada cama, se sembraron alternas en la misma línea, 20 plantas Amadeus 77 y 20 plantas Dehoro, con una separación de un metro por cada trata-

miento (Figura 1). Se utilizó un sistema de riego por goteo para la irrigación del cultivo. El riego se suministró de acuerdo a la condición climática.

Implementación de micro-túnel

El desarrollo del experimento debía realizarse bajo condiciones controladas por la época de lluvias. Por tal motivo, se construyeron micro-túneles. La estructura del micro-túnel fue diseñada con tubos PVC de media pulgada. Se cubrió con plástico transparente cada cama de siembra. Además, se utilizaron estacas para el soporte de los micro-túneles. Durante el día se retiró la cobertura, y por las tardes, ésta se colocaba para aislar el cultivo de la lluvia.

Prácticas culturales

Cada dos semanas desde la siembra, se desmalezó cada cama, se aporcó dos veces durante el ciclo del cultivo, para dar soporte a las plantas y así, mantener la humedad del suelo alrededor del cultivo. La cosecha del cultivo se realizó a los 70 días.

Dosificación biol y fertilizantes

El cálculo de la dosificación de biol, DAP y UREA, se realizó con base en los componentes nitrógeno, fósforo y calcio. La dosis de fertilización empleada, fue tomada de Granadino Espinal, León Gonzalez. (2016). La dosificación de biol fue, de 250 mL d biol por planta, tomando en cuenta que, el ciclo del frijol de las variedades Amadeus 77 y Dehoro, es de 70 días.

Fertilización

Se realizaron tres fertilizaciones para todo el ciclo del frijol. La primera fertilización se hizo con DAP (18-46-0), 23 días después de la siembra del cultivo. Esta aplicación, fue de manera manual, y se pesó cada dosificación de DAP con una balanza digital. La fertilización de biol, se realizó 30 días después de la siembra. Su aplicación fue de manera manual y directa al suelo, sin diluirlo en agua. La fertilización con

urea fue a los 36 días, y se realizó de la misma manera que se hizo con el DAP. Cada fertilización se hizo de acuerdo a los tratamientos establecidos, tal como lo indica la Tabla 1.

Variables

Las plantas se cosecharon al terminar el ciclo del cultivo (70 días). Se tomaron cinco plantas de las variedades Amadeus 77 y Dehoro, por cada tratamiento. Las muestras se trasladaron al Programa de Investigaciones en Frijol (PIF), donde se separaron las vainas de las plantas. Se obtuvo el total de vainas de las variedades Amadeus 77 y Dehoro, de cada tratamiento. Posteriormente, el follaje fue colocado en bolsas de papel, y llevado a un invernadero antes del secado en horno a 70° C, por 48 horas. Al finalizar el secado en horno, se determinó el peso seco de la biomasa.

Las vainas fueron de igual manera colocadas en bolsas de papel y llevadas al invernadero. Posteriormente, se desgranaron las vainas y se colocaron en bolsas de papel para su secado en el horno, a 70°C durante 48 horas. Terminado el secado, se tomó el peso seco de las vainas desgranadas. El frijol fue colocado en bolsas de papel y secado en el horno a 70°C, durante cinco horas. Posteriormente, se pesaron 100 semillas y el total de semillas por cada tratamiento, y se determinó el porcentaje de humedad con un medidor DMC 550 del laboratorio de Programas de Investigaciones en Frijol (PIF). Se calculó el rendimiento ajustado al 14% de humedad, tomando el peso total de las semillas y el porcentaje de humedad por cada tratamiento.

Tratamiento

Para la evaluación del efecto del biol y fertilización, se utilizaron dos variedades y se realizaron combinaciones entre el biol, DAP y urea.

Tabla 1. Descripción de tratamientos en la evaluación en el cultivo del frijol en las variedades Amadeus 77 y Dehoro, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

Genotipo	Fertilización	Biol	DAP	UREA
		ml-planta ⁻¹	kg-ha ⁻¹	
Amadeus 77	Biol	250	0	0
Amadeus 77	Biol+DAP60+UREA30	250	60	30
Amadeus 77	Biol+DAP75+UREA38	250	75	38
Amadeus 77	DAP75+UREA38	0	75	38
Amadeus 77	Sin fertilización	0	0	0
Dehoro	Biol	250	0	0
Dehoro	Biol+DAP60+UREA30	250	60	30
Dehoro	Biol+DAP75+UREA38	250	75	38
Dehoro	DAP75+UREA38	0	75	38
Dehoro	Sin fertilización	0	0	0

Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar, en parcelas divididas con arreglo factorial de 2 × 3, dos variedades y 5 niveles de fertilización. Las parcelas se dividieron

en cinco subparcelas, cada una con longitud de 4 m. En cada subparcela se sembraron 20 plantas Amadeus 77 y 20 plantas Dehoro. La unidad experimental fue constituida por cinco plantas de Amadeus 77 y cinco de Dehoro, por tratamiento.



Figura 1. Diseño experimental de parcelas divididas en la evaluación en el cultivo del frijol en las variedades Amadeus 77 y Dehoro, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para los factores individuales, se realizó un ANDEVA con un Modelo Lineal General (GLM), una prueba de DUNCAN con nivel de significancia de $P \leq 0,05$. Para analizar la interacción Genotipo \times fertilización, se realizó una separación de medias con LSMeans con el paquete estadístico SAS® 9.4 "Statistical Analysis System".

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio mostró que las variedades Amadeus 77 y Dehoro no tuvieron diferencia significativa en la variable semillas secas, la variable rendimiento fue muy significativa ($P \leq 0,001$), y las demás variables, mostraron alta significancia. Entre los diferentes fertilizantes, sólo la variable 100 semillas secas presentó diferencia significativa ($P \leq 0,05$), y las demás fueron altamente significativas ($P < 0,0001$). En cuanto a la interacción variedad y fertilización, las variables vainas secas y peso de 100 semillas secas fueron muy significativas, sólo la biomasa seca presentó alta significancia y las demás variables difirieron significativamente. Bejarano y Méndez (2004) indican que el número de vainas y rendimiento de la variedad Cargabello tienen alta significancia en cuanto a los tratamientos.

Factores	Biomasa seca	Vainas + semilla	Vainas secas	Semillas secas	100 Semillas secas	Rendimiento
	(g·pl ⁻¹)	(#·pl ⁻¹)		(g·pl ⁻¹)		(kg·ha ⁻¹)
Genotipo	***	***	***	NS	***	**
Fertilización	***	***	***	***	*	***
Ge \times fertilización	***	*	**	*	**	*

Biomasa seca

La biomasa seca de frijol demuestra que, la variedad Amadeus 77 con biol+DAP60+UREA30 tiene mayor ganancia de peso con respecto a los demás tratamientos, pero no tiene diferencia significativa con la variedad Dehoro al aplicar biol o DAP75+UREA38 (Tabla 3). Dehoro sin fertilización, obtuvo la mayor biomasa y fue igual a Amadeus 77, con fertilizante DAP75+UREA38. En el estudio realizado por Sánchez Rodríguez (2013), no se encontró diferencia significativa entre tratamientos en la biomasa seca de pasto Transvala (*Digitaria eriantha* Steud).

El fertilizante que tuvo mejor efecto en la biomasa seca fue el biol+DAP60+UREA30, pero no tuvo diferencia significativa con el biol (Tabla 4). El tratamiento testigo tuvo la menor ganancia de peso de la biomasa seca. Las variedades Amadeus 77 y Dehoro mostraron diferencia significativa en la biomasa seca. Por lo tanto, la variedad con mayor ganancia de peso fue Dehoro (Tabla 5). Los datos obtenidos concuerdan con el estudio de Granadino, León. (2016), donde comprueban que la biomasa seca, tiene diferencia significativa entre las variedades Amadeus 77 y Dehoro.

Número de vainas

En la interacción variedad \times fertilización, el mayor número de vainas de frijol, se obtuvo al usar la variedad Amadeus 77 con la aplicación de biol+DAP60+UREA30, pero no tuvo diferencia significativa al usar biol en la misma variedad. Se presenta la menor cantidad de vainas en el número de vainas para la variedad Dehoro sin fertilización (Tabla 3). Al aplicar una mayor dosis de biofertilizante, el número de vainas aumenta, lo que indica que la planta tiene resultados favorables al obtener más nutrientes del biofertilizante (Bermúdez et al. 2011).

Tabla 2. Significancia de las variables biomasa seca, vainas+semilla, vainas secas, semillas secas, 100 semillas secas, y rendimiento en la evaluación del efecto del biol en el cultivo del frijol, en el lote 15 de la parcela de Manejo y Conservación de Suelos, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

*=Diferencias significativas ($P \leq 0,05$)
 **=Diferencias muy significativas ($P \leq 0,001$)
 ***=Diferencias altamente significativas ($P < 0,0001$)

El fertilizante que tuvo el mejor efecto en el número de vainas, fue el biol+DAP60+UREA30, seguido por el biol, demostrando que no existe diferencia significativa entre los dos (Tabla 4). El tratamiento sin fertilización tuvo el menor número de vainas. La variedad Amadeus 77, mostró mayor número de vainas que Dehoro, lo que quiere decir que, las variedades muestran diferencia significativa en cuanto a la producción de vainas (Tabla 5).

Peso seco de vainas

La mayor ganancia de peso seco de vainas (vainas secas) de frijol, se obtuvo al usar biol+DAP60+UREA30 con Amadeus 77. Este tratamiento, tuvo efectos muy favorables frente a los demás, no obstante, no tuvo diferencia significativa al usar biol con la misma variedad. La menor ganancia de peso seco de vainas se observó con la variedad Dehoro, usando DAP75+UREA38, y sin fertilización (Tabla 3).

El fertilizante que tuvo el mejor efecto en el peso seco de vainas fue el biol+DAP60+UREA30, seguido por el biol, demostrando que no existe diferencia significativa entre los dos (Tabla 4). Estudios realizados por Apáez et al. (2015) demuestran que las vainas verdes muestran diferencia significativa por efecto del biofertilizante y distancia entre hileras. El tratamiento testigo tuvo la menor ganancia de peso seco de vainas. Las variedades Amadeus 77 y Dehoro, mostraron diferencia significativa en el peso seco de vainas. Por lo tanto, la variedad con mayor ganancia de peso fue Amadeus 77 (Tabla 5).

Peso de 100 semillas secas

La mayor ganancia de peso de las 100 semillas secas de frijol se obtuvo con la aplicación biol+DAP75+UREA38 con Ama-

deus 77, no obstante, no tuvo diferencias significativas al aplicar biol, biol+DAP60+UREA30, DAP75+UREA38 en la misma variedad, y DAP+UREA en la variedad Dehoro. La menor ganancia de las 100 semillas, se observó con la variedad Dehoro, al usar biol+DAP75+UREA38 (Tabla 3). Bejarano y Méndez (2004), demuestran en su estudio, que el peso de 1000 semillas no tuvo diferencia significativa entre tratamientos. El fertilizante que tuvo el mejor efecto en el peso seco de vainas, fue el DAP75+UREA38, seguido por el biol, demostrando que son iguales, ya que no existe diferencia significativa entre los dos (Tabla 4). El tratamiento testigo, tuvo la menor ganancia de peso seco de 100 semillas. Las variedades Amadeus 77 y Dehoro, mostraron diferencia significativa en el peso seco de 100 semillas. Por lo tanto, la variedad con mayor ganancia de peso fue Amadeus 77 (Tabla 5).

Peso seco total de semillas

La mayor ganancia de peso seco total de las semillas, se obtuvo al aplicar biol en Dehoro, no obstante, no tuvo diferencias significativas con la aplicación de biol y biol+DAP60+UREA30 en Amadeus 77. La menor ganancia de peso seco total de semillas se observó con la variedad Dehoro, al aplicar biol+DAP75+UREA38. El fertilizante que tuvo el mejor efecto en el peso seco total de semillas fue el biol, siendo el mejor ante los demás tratamientos (Tabla 3). Biol+DAP75+UREA38 y testigo no mostraron diferencias significativas, teniendo la menor ganancia de peso seco total de semillas (Tabla 4). Las variedades Amadeus 77 y Dehoro, mostraron diferencia significativa en el peso seco total de semillas. Por lo tanto, la variedad con mayor ganancia de peso fue Amadeus 77 (Tabla 5).

Tabla 3. Efecto de la aplicación de biol y fertilizantes en la biomasa seca, vainas+semilla, vainas secas, semillas secas, 100 semillas secas y rendimiento en el cultivo del frijol variedades Amadeus 77 y Dehoro, en el lote 15 de la parcela de Manejo y Conservación de suelos, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

‡ Medias seguidas de letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes ($P \leq 0,05$).

Tratamientos	Biomasa Seca	Vainas + semilla	Vainas secas	100 Semillas secas	Semillas secas	Rendimiento
	(g·pl ⁻¹)	(#·pl ⁻¹)		(g·pl ⁻¹)		(kg·ha ⁻¹)
Amadeus 77 Biol	65.5 b [‡]	105.2 ab [‡]	33.8 a [‡]	24.8 a [‡]	114.3 a [‡]	3,284 ab [‡]
Amadeus 77 Biol+DAP60+UREA30	71.2 a	111.8 a	33.8 a	23.9 ab	112.0 ab	3,234 abc
Amadeus 77 Biol+DAP75+UREA38	64.2 b	101.0 b	30.7 b	24.9 a	100.7 de	2,944 de
Amadeus 77 DAP75+UREA38	59.2 c	92.0 cd	26.3 cd	24.7 a	103.0 cde	3,023 cd
Amadeus 77 Sin fertilización	53.7 d	89.8 de	26.4 c	21.9 de	103.8 cde	3,006 cd
Dehoro Biol	69.4 a	98.0 bc	23.9 de	22.6 cd	117.3 a	3,391 a
Dehoro Biol+DAP60+UREA30	65.1 b	91.0 cd	24.5 cde	23.2 bc	106.0 bcd	3,061 bcd
Dehoro Biol+DAP75+UREA38	63.2 b	85.8 de	22.6 e	21.5 e	90.6 f	2,602 f
Dehoro DAP75+UREA38	69.6 a	89.0 de	22.4 e	23.9 ab	110.1 abc	3,123 bcd
Dehoro Sin fertilización	59.8 c	82.2 e	22.0 e	21.9 de	96.4 ef	2,745 ef

Rendimiento

El mejor rendimiento de frijol se obtuvo con la aplicación de biol en Dehoro, no obstante, no tuvo diferencia significativa al aplicar biol y biol+DAP60+UREA30 en la variedad Amadeus 77. La aplicación biol+DAP75+UREA38, en la variedad Dehoro, mostró el menor rendimiento (Tabla 3). El fertilizante que tuvo el mejor efecto en el rendimiento fue el biol, siendo el mejor ante los demás tratamientos. El biol+DAP75+UREA38 y testigo no mostraron diferencia significativa, teniendo el menor rendimiento de los demás tratamientos (Tabla 4). Bejarano y Méndez (2004), demostraron en su estudio que, los tratamientos difirieron significativamente, y que el tratamiento testigo fue el que obtu-

vo el menor rendimiento, al igual que el estudio presente. De igual manera, Toalomba (2013), comprobó que los tratamientos de biol en el cultivo de mora tuvieron diferencia significativa, y que, el tratamiento testigo fue el de menor rendimiento.

Las variedades Amadeus 77 y Dehoro mostraron diferencia significativa en el rendimiento. Por lo tanto, la variedad con el mejor rendimiento fue Amadeus 77 (Tabla 5). Estos datos concuerdan con el estudio de Granadino y León (2016), donde se comprueba que la variedad Amadeus 77 tiene el mayor rendimiento versus la variedad Dehoro.

Tabla 4. Efecto de la aplicación de biol y fertilizantes en las variables biomasa seca, vainas+ semillas, vainas secas, 100 semillas secas, semillas secas y rendimiento en el cultivo del frijol, en el lote 15 de la parcela de Manejo y Conservación de Suelos, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

Fertilizantes	Biomasa Seca (g·pl ⁻¹)	Vainas + semilla (#·pl ⁻¹)	Vainas secas	100 Semillas secas (g·pl ⁻¹)	Semillas secas	Rendimiento (kg·ha ⁻¹)
Biol	67.5 a ^y	101.6 a ^y	28.9 a ^y	23.7 a ^y	115.8 a ^y	3338 a ^y
Biol+DAP60+UREA30	68.2 a	101.4 a	29.1 a	23.6 ab	109.0 b	3147 b
Biol+DAP75+UREA38	63.7 b	93.4 b	26.7 b	23.2 b	95.68 c	2773 c
DAP75+UREA38	64.4 b	90.5 bc	24.4 c	24.3 a	106.5 b	3073 b
Sin fertilización	56.8 c	86.0 c	24.2 c	21.9 c	100.1 c	2875 c
R ²	0.5	0.3	0.5	0.4	0.2	0.3
CV	8.3	14.6	16.7	8.4	13.9	13.9

¥ Medias seguidas de letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (P≤0.05).

Tabla 5. Efecto del genotipo en las variables biomasa seca, vainas+semillas, vainas secas, 100 semillas secas, semillas secas y rendimiento por la aplicación de biol y fertilizantes en el cultivo del frijol, en el lote 15 de la parcela de Manejo y Conservación de Suelos, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

Genotipo	Biomasa Seca (g·pl ⁻¹)	Vainas + semilla (#·pl ⁻¹)	Vainas secas	100 Semillas secas (g·pl ⁻¹)	Semillas secas	Rendimiento (kg·ha ⁻¹)
Amadeus 77	62.8 b ^y	99.9 a ^y	30.2 a ^y	24.1 a ^y	106.8 a ^y	3098 a ^y
Dehoro	65.4 a	89.2 b	23.1 b	22.6 b	104.1 a	2984 b

¥ Medias seguidas de letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (P≤0.05).

CONCLUSIONES

La realización de fertilizaciones con biol en el cultivo del frijol, demostró efectos positivos en cuanto a biomasa seca, vainas+semilla, vainas secas, 100 semillas secas, semillas secas y rendimiento.

La aplicación de biol al cultivo de frijol en las variedades Amadeus 77 y Dehoro, mejoró los rendimientos, también la aplicación de fertilización con Urea y DAP a dosis de 60 y 30 kg/ha, respectivamente, en la variedad Amadeus 77.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOAC INTERNATIONAL. AOAC Official method 2001.11 Protein crude in animal feed forage (plant Tissue), Grain, and oilseeds. 3p., 2002.

APÁEZ, P. et al. Producción y calidad un nutrimental de vaina del frijol chino, (*Vigna Unguiculata* L.Walp), en función de arreglo topológico y tipo de fertilización. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias 48, p. 31-42, 2015.

APARCANA, S. et al. Estudio sobre el valor Fertilizante de los productos del proceso "Fermentación Anaeróbica" para producción de biogás. ObtenProfEC professional energy and environmental. 10p., 2008.

ARÉVALO, G. E. et al. Manual de prácticas de laboratorio de Ciencias de Suelos. 18p., 2015.

BEJARANO, C. et al. Fertilización orgánica con la fertilización química en el cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.), para minimizar el efecto de degradación del suelo. 128 p., 2004.

CERQUERÍA, P. et al. Optimización de la aplicación de enmiendas y fertilizantes. International plant nutrition institute, Informaciones Agronómicas, n. 78, p. 1-15, 2010.

DE LA ROSA M. J. Análisis físico y químico de fertilizante orgánico (biol) producidos por biodigestores a partir de estiércol de ganado. 42 p., 2012.

FONDO DE COOPERACION PARA EL DESARROLLO SOCIAL. Producción y uso de abonos orgánicos: biol, compost y humus. FONCONDES, n. 5, 44p., 2014.

GRANADINO E. M. et al. Evaluación de frijol común (*Phaseolus vulgaris*) por su tolerancia a suelos de baja fertilidad. 25p., 2016.

GUTIÉRREZ, M. Nutrición mineral de las plantas. En G. Meléndez, & E. Molina, Centro de investigaciones agronómicas. Laboratorio de Suelos y Foliare. p. 1-6, 2002.

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGRARIA. Tecnologías innovativas apropiadas a la conservación in situ de la agrobiodiversidad. 10p., 2008.

JARRÍN C. M. Cinco relaciones del abono BSA 1.0 y fertilizante sintético para la producción de lechuga crespa en Machachi, Ecuador. 14p., 2011.

MEJÍA, Y. et al. Efectividad de una biofertilizante foliar sobre el cultivo de frijol común (*Phaseolus vulgaris*), Bluefields, R.A.A.S. Ciencia e interculturalidad, v. 8, n.1, p. 128-140, 2011.

QUINTERO, I. et al. Productividad del Repollo (*Brassica oleracea*) en Respuesta a la Aplicación de Abonos Orgánicos. Vegetales/Hortalizas. v. 48, p. 68-71, 2005.

SÁNCHEZ, R. J. Dosificación de biol en pasto Transvala (*Digitaria eriantha* Steud.) como fuente de nitrógeno en suelo franco, Zamorano Honduras. 19p., 2013.

SILVA, S. et al. Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. Semestre Económico, v. 12, n. 23, 22p., 2009.

SINERGI. Producción respetuosa en Viticultura: Impactos Ambientales en Agricultura. 11p., 2006.

SISTEMA BIOBOLSA. Manual del biol. 15P., 2015.

TOALOMBO, M. Aplicación de abonos orgánicos líquidos tipo biol al cultivo de mora (*Rubusglaucus*Benth). 92p., 2013.

Uso del digestato en un terreno en post cosecha: una alternativa a la quema de rastrojos mediante inoculantes provenientes de biodigestores

María Teresa Varnero Moreno, Hugo Sierra Goldberg, Ian Homer Bannister.

Facultad Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile (UCh).
Av. Santa Rosa N° 11315, Santiago, Chile.

bettibs56@outlook.com / mvarnero@uchile.cl ✉

En el proceso de digestión anaeróbica (figura 1) para la producción de biogás, se genera un coproducto, el efluente o digestato, que tiene usos ampliamente conocidos. Adicionalmente a ello, su uso para degradar los rastrojos y restos de cosecha tiene gran importancia agronómica y medio ambiental, aunque es poco explotada todavía.

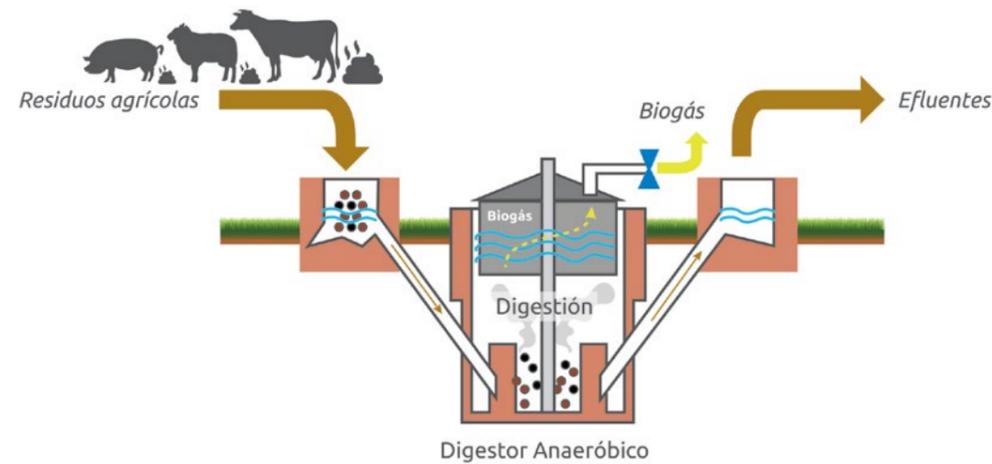


Figura 1: Proceso digestión anaeróbica.

Dentro de las prácticas agrícolas en la producción de cereales y granos, la quema de rastrojos es aparentemente la forma más económica de eliminar los residuos, sobre todo para los productores de bajos recursos, sin embargo, esta práctica tiene variados efectos negativos, como veremos más adelante. En Chile, por ejemplo, se tienen 704.515 hectáreas con cereales y otras 66.042 hectáreas con leguminosas, de las cuales, entre el 80 y 90% de los rastrojos se quema.

La quema de rastrojos contribuye fuertemente al deterioro de la atmósfera terrestre y al calentamiento global del planeta, sumado a la pérdida irrecuperable de suelos, sobre todo aquellos en

pendientes, donde se deja la superficie descubierta, maximizando el golpe directo de las lluvias, provocando erosión. La pérdida de materia orgánica con su humus (reservorio de nutrientes), está asociada a una disminución de los rendimientos de cosecha de granos, y a la pérdida de nutrientes en el largo plazo. La práctica, se convierte entonces, en un reto a largo plazo, considerando el alto costo de los fertilizantes sintéticos y el abundante contenido de nutrientes de los rastrojos que se pierde en ello.

Al respecto, por ejemplo, se estima que para el cultivo de maíz con rendimiento promedio de 1Tm/ha, la quema de rastrojos post cosecha de los granos,

significa pérdidas de 140 unidades/ha de nitrógeno (N), 20 unidades/ha de fósforo (P_2O_5), 200 unidades/ha de potasio (K_2O), 60 unidades/ha de MgO y CaO, y 10 unidades/ha de S, además, las pérdidas de humus o materia orgánica estable o de reserva del suelo, son de 1,12 Tm/ha.

Por otra parte, se tiene que la degradación natural de rastrojo de trigo, cebada, avena pueden tardar hasta tres temporadas, quedando un remanente de hasta el 35% con componentes a simple vista. En el caso de maíz y sorgo, esta degradación puede tardar mucho más, por su mayor contenido ligno-celulósico. En este sentido, es clave que los procesos productivos se

realicen de manera sostenible, lo que incluye la implementación de técnicas y tecnologías que permitan una mejor relación de la agricultura con el medio ambiente. Una alternativa al fuego es provocar una rápida degradación de los rastrojos, dejándolo en condiciones para ser incorporado al suelo. Un acelerante de la degradación biológica de residuos orgánicos es el digestato (biol o biosol), proveniente de la digestión anaeróbica de biomasa. Este coproducto de la tecnología del biogás, dispone de abundantes enzimas y consorcios microbianos, especializados en la degradación de moléculas orgánicas, con lo cual es posible activar y acelerar la descomposición biológica de rastrojos de cultivos de cereales. Esto permite la reutilización de rastrojos, disminuyendo con ello, la quema de residuos de cosecha y la emisión de gases efecto invernadero.

¿Cómo se realiza la aplicación?

- Maquinaria requerida: para predios pequeños unifamiliares basta la aplicación manual del digestato (figura 2a y 2b). En predios medianos y grandes, la aplicación podría realizarse mediante riego por aspersión (previo filtrado) o bien, con aljibe desparramador de purines (figura 2c).
- Dosis recomendadas: se sugiere realizar balance de extracción/aporte según cultivos, suelos y climas. Para asegurar la degradación biológica de los rastrojos post término de cultivos, se recomienda usar un volumen de 20 m³/ha. de digestato, pudiendo ser éste en concentración igual o mayor a 50%.
- Consideraciones a tomar en cuenta: la fecha ideal de aplicación de digestato en zonas con clima mediterráneo es el período de otoño-invierno, permitiendo la plena degradación de los rastrojos de cultivos, y posterior liberación de los nutrientes allí contenidos (NPK y microelementos), los que se podrán utilizar como insumo en los nuevos cultivos de primavera.



Figura 2: (a) y (b): aplicaciones para pequeñas extensiones. (c): aplicación de grandes volúmenes.

¿Qué se podría esperar?

Las siguientes conclusiones fueron obtenidas de la investigación realizada en Chile. El material completo puede revisarse en "Alternativa a la quema de rastrojos mediante inoculantes provenientes de digestores" (AGRIMED. 2016).

Con el objeto de evaluar el potencial de degradación biológica del digestato sobre rastrojos de cereales (trigo, maíz, mezclas), se establecieron diversos ensayos en parcelas piloto de 1 m² (figura 3). Esta actividad permitió determinar dosis o concentración de digestato, junto con el período y volúmenes de aplicación de este coproducto. Los resultados indican que:

- La diferencia de tamaño de partícula en los rastrojos de cereales, definida inicialmente, no afecta el nivel de degradación del material, obteniéndose valores similares, tanto en los tratamientos con un tamaño de partícula $\leq 8\text{cm}$, como $\geq 20\text{cm}$.
- Al aplicarse 20 m³/ha de diferentes concentraciones de digestato (digestato + agua), los tratamientos con dosis superiores al 50% de digestato presentaron una mayor degradación, respecto de los otros de menor concentración.
- Todos los rastrojos biodegradados con digestato, presentan índices de germinación superiores al 80%, lo que indica que se obtiene un material estabilizado y libre de metabolitos fitotóxicos; donde, el aporte natural de nutrientes de este rastrojo degradado puede llegar hasta 40-20-35 unidades de N-P-K, mejorando adicionalmente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (figura 4).
- Esta tecnología es accesible con costos muy bajos para los grandes productores y PYME, pudiendo así, evitar el uso del fuego en la quema de rastrojos, la cual degrada el suelo por pérdida de materia vegetal, humus, y microorganismos benéficos.



Figura 3: Actividad práctica con alumnos de escuela rural agrícola.



Figura 4. Resultados de degradación de rastrojos de trigo usando digestato (biol) después de 120 días. Arriba, izquierda: tratamiento con 0% digestato; y derecha: tratamiento con 30 digestato. Abajo, izquierda: tratamiento con 60 digestato; y derecha: tratamiento con 100% digestato.

Tratamiento de aguas residuales agro-industriales con una planta anaeróbica- aeróbica: la experiencia de la Arrocera Los Corrales, Guatemala

Zoé Bienvenu¹ y Gabriel Fong²

1. Asesora de Energía Sostenible y Cambio Climático, Banco Interamericano de Desarrollo (BID)
2. Gerente General, GuateVerde Ingeniería SA, Grupo BIGOR

zoe.bienvenu@gmail.com / guateverde.ingenieria@gmail.com ✉

RESUMEN

Tanto en Guatemala como a nivel internacional, la gestión de las aguas residuales se ha vuelto un problema ambiental y de salud pública prioritario. Las plantas anaeróbicas-aeróbicas de tratamiento, diseñadas para la generación de energía eléctrica, ofrecen una respuesta ambientalmente efectiva, un costo-eficiente y rentable a la problemática, tal como lo demuestra el proyecto implementado por la empresa GuateVerde-Ingeniería S.A. del grupo BIGOR para la empresa ALCSA Arrocera Los Corrales S.A en Guatemala. El sistema permite a la empresa cumplir con las regulaciones ambientales nacionales, reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, y reducir sus gastos energéticos. Mientras se espera que las emisiones de metano de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales sigan aumentando en los próximos diez años, los sistemas anaeróbicos-aeróbicos son una solución replicable siempre y cuando se promueva activamente la tecnología y sus beneficios.

ABSTRACT

Both in Guatemala and internationally, wastewater management has become a major environmental and public health concern. Anaerobic-aerobic treatment plants designed for the generation of electric power offer an environmentally effective, cost-efficient and profitable response to the problem, as shown by the project implemented by the company GuateVerde-Ingeniería S.A. of the BIGOR group for the company ALCSA Arrocera Los Corrales S.A in Guatemala. The system allows the company to comply with national environmental regulations, to reduce its greenhouse gas emissions and to reduce its energy costs. While it is expected that methane emissions from wastewater treatment systems will continue to increase over the next ten years, anaerobic-aerobic systems are a replicable solution as long as the technology and its benefits are actively promoted.

INTRODUCCIÓN

La gestión de las aguas residuales en Guatemala, se ha vuelto una prioridad nacional, ya que, la mayoría de las aguas servidas se vierten directamente en ríos, lagos y cuencas sin

ningún tipo de tratamiento. Se estima, que en el 2015, el 70% de las aguas residuales, se descargaron en ambientes acuáticos (Gobierno de la República de Guatemala. 2016),

PALABRAS CLAVE:

PLANTA ANAERÓBICA-AERÓBICA;
BIODIGESTOR INDUSTRIAL;
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES;
CO-DIGESTIÓN ANAERÓBICA; GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

KEYWORDS:

ANAEROBIC-AEROBIC PLANT; INDUSTRIAL BIODIGESTER; SEWAGE TREATMENT; ANAEROBIC CO-DIGESTION; GENERATION OF ELECTRIC POWER.

representando una amenaza para la biodiversidad que albergan los ríos y lagos, y un riesgo para la salud de la población, al consumir aguas contaminadas. Según el último Perfil Ambiental disponible (IARNA-URL. 2012), en el 2009, al menos catorce ríos principales y cuatro lagos, presentaron altos porcentajes de contaminación. De las principales causas de morbilidad en la población de Guatemala, un 27% son derivadas de la calidad del agua (Instituto Nacional de Estadística. 2015).

El sector de residuos del total del país, representa el 3% de las emisiones nacionales de Gases de Efecto Invernadero (GEI), reportadas por el Gobierno, ante la Conferencia de las Partes (COP) (MARN. 2005) y de estas, el 10% correspondiente, a aguas residuales del sector industrial (Gobierno de la República de Guatemala. 2016). El metano (CH₄) es el que más contribuye, con el 83% de las emisiones (MARN. 2005) y se espera, que sigan incrementando en los próximos 10 años (Gobierno de la República de Guatemala. 2016). Al mismo tiempo, el aprovechamiento del metano para la generación de energía eléctrica, constituye una fuente de energía renovable potencial para reducir emisiones de GEI en el sector energético, el cual, es responsable del 28% de las emisiones de GEI a nivel nacional.

El reglamento de las descargas, re-uso de aguas residuales, y de la disposición de lodos (Acuerdo gubernativo no. 236-2006) aprobado en 2006, en conformidad con la ley de protección y mejoramiento del medio ambiente (Gobierno de la República de Guatemala. 2016), abrió una gran ventana de oportunidades para la mitigación de emisiones de metano, en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), y la generación de energía eléctrica. Dicho reglamento, establece que las personas individuales o jurídicas, públicas o privadas, que descarguen aguas residuales de tipo ordinario y especial, al alcantarillado público o cuerpo receptor, tendrán que cumplir los límites máximos permisibles, estableciendo sistemas de tratamiento propios, o pagando a la municipalidad o a las empresas encargadas del tratamiento de dichas aguas residuales. Según el artículo 19 del Reglamento, la meta de cumplimiento, al finalizar las etapas del modelo de reducción progresiva de cargas, se establece a 200 mg/L DBO₅. Los otros parámetros se presentan en el artículo 20, y están resumidos en la última columna de la tabla 2 de este estudio de caso. Mientras el principal reto enfrentado por las municipalidades para el cumplimiento legal ha sido financiero (MARN. 2017), las empresas han ido buscando soluciones costo-eficientes, es decir, soluciones que permitan alcanzar las metas establecidas por el reglamento, empleando recursos de la forma más eficiente posible, para así, poder cumplir con el reglamento.

En este contexto, la empresa GuateVerde-Ingeniería S.A. del grupo BIGOR (GuateVerde en adelante), ha desarrollado soluciones funcionales y viables al manejo de desechos residuales, tanto sólidos como líquidos, para acompañar empresas de varios sectores (agrícola, agro-industrial, industrial, etc.), en el proceso de cumplir con estos nuevos requerimientos legales. Entre los proyectos de mayor impacto, GuateVerde ha instalado una planta de tratamiento anaeróbica – aeróbica para el tratamiento de las aguas residuales de la empresa ALCSA Arrocera Los Corrales S.A (la Arrocera en adelante). El proyecto se ha revelado muy efectivo ambientalmente y financieramente, costo-eficiente y rentable, lo cual sugiere un potencial alto de replicabilidad en Guatemala y en otros contextos.

DESCRIPCIÓN DEL CASO Y RESULTADOS

La Estrategia de Desarrollo de Bajas Emisiones (EDBE) de Guatemala, identifica como la oportunidad con mayor peso para la mitigación de GEI, en el subsector de aguas residuales, la instalación de sistemas de tratamiento que incluyan captura de biogás (Gobierno de la República de Guatemala. 2016). Más allá de la captura, se puede aprovechar el biogás para generar energía, lo cual conlleva beneficios económicos. Sin embargo, a la fecha, el potencial de captura y aprovechamiento del metano ha quedado sub-explotado en este sector. Se registran 424 PTAR, entre las cuales el 75% son de tratamiento físico, 15% de tratamiento físico y químico, y solamente el 10% de tratamiento químico y biológico (involucrando un proceso aerobio y anaerobio) (INE. 2015). Las PTAR reportadas con proceso anaerobio, se enfocan principalmente en aguas residuales de ingenios azucareros y de aceite de palma, mientras se podrían aprovechar otras aguas residuales. El volumen de agua contaminada descargada a las cuencas, proviene en un 40% de los municipios (uso ordinario), otro 40% de las actividades agropecuarias, un 13% de las industrias y el restante 7% de las agroindustrias (Bas terrechea, 2012).

Las aguas residuales de la Arrocera Los Corrales

ALCSA Arrocera Los Corrales S.A, es una empresa que transforma y comercializa arroz, frijol, harina de maíz, y avena, bajo la marca Gallo Dorado, comercializa arroz pre-cocido y arroz preparado; y bajo la marca Oro Maya, harina de maíz. Los procesos de pre-cocción del arroz y del maíz, requeridos para la fabricación de estos productos, generan un total de 300 m³/día de aguas residuales (GuateVerde, 2017a), con niveles de demanda química de oxígeno (DQO) y de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) muy elevadas (tabla 1).

Tabla 1: Distribución de caudales y características fisicoquímicas de las aguas residuales de las plantas de arroz y de maíz.

Origen	Parámetros					
	DBO ₅ ¹ (mg/L)	DQO ² (mg/L)	pH	Caudal (m ³ /d)	Factor seguridad	Caudal total (m ³ /d)
Planta de arroz	5.100	8.500	4 a 6,86	250	1,25	312,5
Planta de maíz	12.856	28.000	10	50	1,5	75
					Total	387,5

¹DBO5 Demanda Bioquímica de Oxígeno. (mg/L)

²DQO Demanda Química de Oxígeno. (mg/L)

Para cumplir con los límites máximos permisibles, establecidos por la reglamentación vigente, la empresa decidió establecer un sistema de tratamiento propio de las aguas residuales y desechos sólidos orgánicos, a través de biodigestores con captación y aprovechamiento de biogás para generación de energía térmica y eléctrica. Normalmente, los generadores eléctricos disponibles en el mercado (Europeo, Estadounidense o Asiático), exigen para su funcionamiento, un filtro que elimine el sulfuro de hidrógeno presente en el biogás producido, y estos filtros están fabricados con carbón activo, lo cual los vuelve costosos. En el presente caso, se

han instalado generadores Perkins diseñados para el uso del biogás producido, en los cuales, ya no se hace necesario un filtro para la eliminación del sulfuro de hidrógeno, evitando así los altos costos de los filtros de carbón activado. Por último, se tiene el aprovechamiento del digestato producido como fertilizante, útil en aplicaciones como mejora de suelos, y riego de cultivos. Cada proyecto lleva una garantía de 10 años de durabilidad y funcionalidad.

A pesar de su interés por la tecnología propuesta por GuateVerde, los dueños de la Arrocera tenían dudas sobre la fac-

tibilidad del proyecto, por ser el primero en el país para el tratamiento de aguas residuales de arroz y maíz. Después de esta primera etapa de negociación, que llevó un año y medio, se inició la fase de ejecución en 2017, la cual duró un año, movilizand o a 22 técnicos. Al finalizar la instalación, se capacitaron a cinco técnicos de la Arrocera para que puedan asegurar el mantenimiento básico de la planta, y se les dio un acompañamiento técnico a tiempo completo, durante dos meses, para la puesta en marcha de la planta y los ajustes iniciales.

La planta de tratamiento anaeróbica- aeróbica

La planta de tratamiento instalada para las aguas residuales provenientes de la planta de producción de arroz y maíz de la Arrocera, consiste en un biodigestor (proceso de digestión anaeróbica) y en un reactor de aireación extendida (proceso aeróbico), con la finalidad de poder verter sus aguas residuales al cuerpo receptor (río Platanitos), con los parámetros que solicitan las normas respectivas. El 85% de la materia orgánica se reduce en el sistema de tratamiento anaeróbico, y el 15% restantes, en el sistema aerobio, lo cual hace mucho más económico el proceso aerobio. El sistema se ha diseñado para el cumplimiento del reglamento hasta la última etapa año 2024, por un monto total de USD 550.000.

Entre los principales elementos, la planta (figura 2) incluye tubería y soportes, un biodigestor de 7.200 m³, un reactor de lodos activados de 400 m³, un clarificador de 150 m³, un clorinador, un tanque de contacto para activación del cloro de 8 m³, en donde se activa el cloro, el cual necesita 15 minutos para reaccionar con el agua; un sistema de aireación extendida natural, por el cual la oxigenación del agua se logra por un proceso natural y no por un sistema de aireación eléctrico, un aireador trifásico de 15 Hp, una bomba de 5 Hp trifásica 220V para recirculación de lodos del clarificador hacia el biodigestor, una bomba trifásica para recirculación en el biodigestor de 5 Hp, y un generador de energía eléctrica de 65 kW para aprovechamiento del biogás.

RESULTADOS

El sistema instalado aseguró el cumplimiento de la normativa: los resultados obtenidos de la evaluación realizada a los 6 y 9 meses demuestran que los parámetros cumplen con la legislación vigente (tabla 2), y por lo tanto, no se contamina el río al ser vertida el agua de proceso industrial. Una parte del agua tratada (34 m³), se usa para riego de áreas verdes y en la descarga de los servicios sanitarios, la otra parte (266 m³), se vierte en el río.

Figura 1: Vista Aérea de la planta de tratamiento (GuateVerde. 2017b)



Tabla 2: Parámetros de ingreso y proceso de reducción.

Parámetro	Ingreso	Proceso de reducción - 2018				Rango permitido de descarga a partir del año 2024
		26-may	1-jun	1-ago	30-ago	
DBO, mg/L	5.330	200	190	70	18	200
pH	4,1	7	6,5	6,99	6,99	6 a 9
Solidos sedimentables, mL/L	15	0,1	0,1	0,1	0,1	-
Solidos suspendidos, mg/L	380	50	40	16	29	100
Color verdadero, Pt/Co	845	507	440	78	110	500
Color aparente	-	-	-	-	362	500
Nitrógeno total, mg/L	231	117,1	80,6	69	47	20
Fosforo total, mg/L	17	7,8	7,8	3,4	13,8	10
Coliformes fecales, NMP/100 mL	54.000	-	-	1,8	1,8	10.000
Grasas y aceites, mg/L	50	-	-	2	-	10
Materia flotante, visual	Ausente	-	-	Ausente	Ausente	Ausente

Además, el sistema presenta co-beneficios financieros importantes, los cuales fueron elementos decisivos para la adopción de la tecnología por la Arrocera, y son descritos a continuación.

Primero, el sistema anaeróbico-aeróbico tiene un bajo consumo energía eléctrica (14 kW) y costos de operación mínimos, esto, debido principalmente a la sencillez de la operación y la ausencia de componentes electromecánicos para su fun-

cionamiento. El sistema tampoco requiere del uso de químicos especiales para su funcionamiento, como floculantes, coagulantes, polímeros, rayos UV, o soda caustica; ni de una torre de enfriamiento adicional. Los lodos generados por la parte de aireación son retornados al biodigestor y degradados en el mismo, por lo que no se paga a terceras personas para que los extraigan y dispongan de ellos. Gracias al biodigestor instalado, previo al sistema de aireación extendida, el consumo de energía eléctrica se reduce en un 93,15% en relación a una planta convencional aeróbica: al reducir la materia orgánica presente en el efluente por el uso del biodigestor, se requiere menos aireación en el reactor aeróbico, ya que las transferencias de oxígeno desde las burbujas al agua mejoran, si el agua tiene menos sólidos suspendidos.

Segundo, el sistema no solamente permite reducir costos, sino también generar ingresos, y así, asegurar la rentabilidad de la inversión. El sistema permite la producción de biogás como combustible aprovechable (Tabla 3), y con este, la generación de energía eléctrica, para el presente caso, 65 kWh por un período de 20 horas diarias.

Tabla 3: Producción de biogás de la planta¹

Datos generales del proyecto		
Volumen de descarga máximo	390	m ³ /d
Tiempo de retención de volumen por descarga	18	días
Parámetros por tratar y resultados		
Volumen del biodigestor	7.200	m ³ /d
DQO máxima a tratar	1.308	kg/d
Producción de biogás con DQO máxima	1.500	m ³ /d
Temperatura de entrada al biodigestor	40	°C

¹ Como es una planta de arroz pre cocido, el agua ya ingresa con una temperatura de 40 °C al biodigestor.

La energía eléctrica generada sirve para la operación de la planta (14 kWh), y el excedente (50 kWh) está enviado a la planta de proceso para el uso de equipos de bombeo y distribución de agua. El proyecto, que generó para el mes de febrero 2018, 5.723 kWh por un valor de USD 1.327, se encuentra en la fase de maduración, por lo que pronto se estará generando en promedio USD 3.759 mensual. En total, la generación eléctrica del sistema podría generar un ahorro de hasta USD 45.174 por año en abastecimiento de energía eléctrica para el funcionamiento de la planta, es decir, el 0,05% del consumo total de la planta de la arrocería. Con estos ingresos, el periodo de amortización de la inversión, es de doce años para la empresa.

La rentabilidad de la planta ha ido aumentando en los últimos meses, cuando otras empresas solicitaron a la Arrocería servicios de tratamiento de sus desechos para cumplir con la reglamentación. Desde principios del 2018, la planta de tratamiento fue adaptada para tratar trampas de grasa de restaurantes de comida rápida, agua de fosas sépticas, y lodos de plantas aeróbicas de mataderos de aves. Se estima que el servicio de tratamiento de desechos externos, generará un promedio de ingresos de USD 80.536 anuales. Con estos ingresos adicionales, el periodo de amortización de la inversión, se reduce a cuatro años y siete meses (tabla 4).

El escenario descrito en la tabla 4, es de una planta de tratamiento de aguas residuales representando un gasto, y de un sistema de tratamiento que genera un ingreso extra. La tabla presenta i) el total de la inversión para el establecimiento de la planta de tratamiento, y ii) del sistema de generación de energía eléctrica; iii) los costos del mantenimiento del sistema, y iv) los ingresos generados por el proyecto implementado. Por lo tanto, cada año se recupera lo invertido.

LECCIONES APRENDIDAS Y RECOMENDACIONES

Innovación tecnológica y mitigación de emisiones

Mientras se conocen varias experiencias de tratamiento anaeróbico de desechos sólidos, derivados de la transformación de vegetales tales como el arroz y del maíz (residuos, cáscaras y paja) para el aprovechamiento de biogás, existen pocos casos documentados para aguas residuales derivadas de la transformación que realiza la industria del arroz (Saini et al., 2016; Prajapatiet al., 2004). De hecho, entre los factores de producción de aguas residuales industriales analizados para reportar las emisiones de GEI ante la COP, no se consideran las aguas residuales derivadas del procesamiento de vegetales (IPCC, 2006). Este proyecto demuestra la factibilidad y el gran potencial de aprovechamiento de biogás a partir de aguas residuales derivadas de la transformación de tales productos, utilizando una planta de tratamiento anaeróbica-aeróbica.

Costo-eficiencia y rentabilidad financiera

El costo-eficiencia y la rentabilidad de la planta, fueron elementos decisivos en la adjudicación del contrato a GuateVerde para la instalación de la planta, versus otras tecnologías más convencionales de tratamiento de aguas residuales. Estas se lograron gracias a

Tabla 4: Perfil de ingresos y egresos de la planta

Tratamiento de Aguas Residuales	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6
a.1 Biodigestor tipo laguna con Geomembrana	\$381,000.00					
a.2 Tubería de Ingreso de agua residual y soportes						
a.3 Caseta de recirculación y agitación						
a.4 Graderío para aireación extendida						
a.5 Tanque de aireación y equipo de 15 HP						
a.6 Tanque de clarificación						
a.7 Sistema de Clorinador						
a.8 Bombas y equipos auxiliares						
Sistema de Generación de Energía Eléctrica						
b.1 Caseta de Generación Eléctrica	\$74,500.00					
b.2 Generador para biogás de 65 Kw 220/440 v trifásico						
b.3 Tubería de conducción de biogás y sistema de trampeo						
b.4 Equipos auxiliares: Filtro deshumidificador, Soplador						
b.5 Tablero de transferencia						
Mantenimiento de sistema						
c.1 Servicios preventivos al generador	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00
c.2 Servicios preventivos equipos auxiliares y biodigestor	\$4,000.00	\$4,000.00	\$4,000.00	\$4,000.00	\$4,000.00	\$4,000.00
Total inversión anual	\$479,500.00	\$377,789.09	\$276,078.18	\$174,367.27	\$72,656.36	\$24,000.00
	\$353,789.09	\$225,078.18	\$150,367.27	\$48,656.36	-\$53,054.55	-\$101,710.91
INGRESO						
Producción ENERGÍA Eléctrica/año	\$45,174.00	\$45,174.00	\$45,174.00	\$45,174.00	\$45,174.00	\$45,174.00
Tratamiento de desechos externos	\$80,536.91	\$80,536.91	\$80,536.91	\$80,536.91	\$80,536.91	\$80,536.91
	\$125,710.91	\$125,710.91	\$125,710.91	\$125,710.91	\$125,710.91	\$125,710.91

un sistema de bajo consumo energético, costos de operación mínimos, y la generación de energía eléctrica para asegurar la operación de la planta y el autoabastecimiento parcial para alimentar la planta de procesamiento de los granos. La co-digestión anaeróbica ha permitido realizar economías de escalas importantes, incrementando así la rentabilidad de la planta de tratamiento de aguas residuales. Gracias al tratamiento de desechos externos, se han generado ingresos adicionales, reduciendo el periodo de amortización del proyecto, proyectando una utilidad de U\$D 53.054 para el quinto año, y de U\$D 101.710 para los siguientes años.

Fortalecimiento de las políticas públicas

La EDBE de Guatemala identifica como principal oportunidad para la mitigación de GEI en el sub-sector eléctrico, la diversificación de la composición de la matriz de generación eléctrica (Gobierno de la República de Guatemala, 2016). La Política Energética 2013-2027, establece como meta de largo plazo, alcanzar un 80% de la generación de energía eléctrica por medio de recursos renovables (MEM, 2013). La generación de energía derivada del tratamiento de aguas residuales a través de biodigestores, podría contribuir a esta diversificación, sin embargo, el potencial energético del biogás aún no se ha calculado (MEM, 2017). Antes que todo, es indispensable que el Gobierno emprenda una evaluación del potencial energético del biogás, para visibilizar el sector, y desarrolle una base sólida de información sobre el tratamiento de aguas residuales industriales y los tipos de plantas de tratamiento de aguas residuales que están verdaderamente activos en Guatemala.

Segundo, es indispensable que los esfuerzos comerciales emprendidos individualmente por las empresas del sector de los biodigestores sean respaldados por medidas de políticas públicas fuertes, orientadas a incentivar la adopción de estas tecnologías, empezando por las municipalidades mismas, cuyas aguas residuales representaron en el año 2015 el 55% del total de las emisiones del sector desechos (Gobierno de la República de Guatemala, 2016). Entre las principales medidas de políticas públicas que podrían contribuir a fortalecer el sector, se recomienda que el Gobierno establezca un programa de incentivos económicos, similar al de México, el cual prevé la deducción de impuestos en energía renovable al 100% para la inversión en maquinaria y equipo generador proveniente de fuentes renovables (Art. 40, Ley de Impuesto Sobre la Renta- ISR), y estímulos fiscales en proyectos de generación de energía renovable (Art. 219 ISR), mediante un crédito fiscal equivalente al 30% de los gastos e inversiones realizados (Cámara de Diputados de la República Mexicana, 2012). Conjuntamente, se requiere emprender campañas fuertes de sensibilización y promoción para poder dar a conocer la tecnología y los proyectos exitosos. Finalmente, sería beneficioso para el sector que el Gobierno pueda apoyar a las Cámaras de Industria, Agroalimentarias, Asociaciones como las porcícolas, ganaderas y avícolas, para que promuevan con sus asociados esta tecnología.

Relevancia y replicabilidad del modelo

Este proyecto responde a una problemática nacional y mundial, con un potencial alto de replicabilidad a ambos niveles. Según Naciones Unidas, más del 80% de las aguas residuales se vierte en ambientes acuáticos sin tratamiento previo, causando indirectamente la muerte de más de 2 millones de personas cada año por enfermedades diarreicas en todo el mundo (Naciones Unidas, 2017). Las emisiones mundiales de metano antropogénico para el 2020, se estiman en 9.390 millones de toneladas equivalentes de CO₂. El 7% de estas emisiones provendrán de las aguas residuales (Global Methane Initiative, 2015), y entre el 2020 y el 2030, se espera que aumenten en 8% (U.S. Environmental Protection Agency, 2012). Para mitigar estas emisiones, los sistemas anaeróbicos- aeróbicos son una solución costo-eficiente, rentable y replicable en cualquier condición, siempre y cuando se promuevan activamente la tecnología y sus beneficios.

En Guatemala, el aspecto principal que se tuvo que solucionar para poder implementar, y que será un tema clave a sortear para permitir la replicabilidad esperada, y la adopción de la tecnología a mayor escala, es la falta de un entorno propicio para su desarrollo, ya que actualmente no se cuenta con el recurso económico, espacio e información al respecto: la gente no conoce y no confía en la tecnología; no existen muchas oportunidades de financiamiento para los proyectos verdes; y aún se requiere mejorar los procesos de desarrollo e investigación para mejorar la puesta en funcionamiento de la tecnología.

CONCLUSIONES

La planta anaeróbica- aeróbica instalada por GuateVerde para el tratamiento de las aguas residuales de la Arrocera Los Corrales, permitió que esta cumpliera con la reglamentación vigente de manera costo-eficiente. Más allá del cumplimiento legal, esta planta industrial de gran escala, captura emisiones de metano, contribuyendo así a la mitigación de GEI, y a su vez, genera energía eléctrica en cantidad suficiente para asegurar la operación de la planta y abastecer la Arrocera. A través del tratamiento de desechos externos en co-digestión anaeróbica, se han generado ingresos adicionales, los cuales reducen el periodo de amortización del proyecto al corto plazo, y contribuyen a su rentabilidad al mediano y largo plazo, mientras permiten a otras empresas cumplir con la reglamentación. Este proyecto reveló tener un impacto económico positivo para la Arrocera y para las empresas de la vecindad, así como para el medio ambiente. El sistema constituye una solución costo-eficiente a retos ambientales y de salud nacional y global. Para una difusión más amplia, son necesarios los esfuerzos conjugados de las empresas y de las instituciones de gobierno relevantes para

dar a conocer su potencial, sus aplicaciones y sus beneficios, en particular económicos, a los actores públicos y privados, en búsqueda de soluciones de punta para cumplir con normativas ambientales cada vez más exigentes.

AGRADECIMIENTOS

Nuestros agradecimientos van a la RedBioLAC por la organización de la 2° versión de la revista, la oportunidad de dar a conocer proyectos de impacto, y compartir experiencias en el continente.

REFERENCIAS

Basterrechea, M. (2012). "Estado del agua en Guatemala". En B. Jiménez, y T. Galizia. Diagnóstico del agua en las Américas (pp. 281-307). México, D.F.: Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC.

Cámara de Diputados de la República Mexicana (2012) Ley de Impuesto sobre la Renta <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/82.pdf>

Global Methane Initiative. (2015). Global Methane Emissions and Mitigation Opportunities (4 pp.) <https://www.globalmethane.org/documents/gmi-mitigation-factsheet.pdf>

Global Methane Initiative. (2009). Resource Assessment for Livestock and Agro-Industrial Wastes – Colombia https://www.globalmethane.org/documents/ag_colombia_res_assessment.pdf

Global Methane Initiative. (2009). Anaerobic Digestion of Agro-Industrial Wastes: Categories, Characteristics, Technologies, Emissions and Methane Production Potential https://www.globalmethane.org/documents/events_ag_20090127_techtrans_roos.pdf

Gobierno de Guatemala. (2006). Acuerdo Gubernativo Número 236-2006: "Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos". Folleto. Guatemala. <http://vestex.com.gt/wp-content/uploads/2015/04/Reglamento-descargas-de-aguas-residuales-AG236-2006.pdf>

GuateVerde Ingeniería S.A. (2017a). Perfil de proyecto Arrocera Los Corrales: Planta de Tratamiento Anaeróbica-Aeróbica, Grupo BIGOR a través de su empresa GuateVerde-Ingeniería SA.

GuateVerde Ingeniería S.A. (2017b). Guateverde - Arrocera Los Corrales 2017 <https://youtu.be/-Z3BtHWE2tc>

Hublin A, Schneider DR, Džodan J. (2014). "Utilization of biogas produced by anaerobic digestion of agro-industrial waste: Energy, economic and environmental effects", Waste Management Resources. 2014 Jul; 32(7):626-33. doi: 10.1177/0734242X14539789. Epub 2014 Jun 24.

IARNA-URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar). (2012). Perfil Ambiental de Guatemala 2010-2012. Vulnerabilidad local y creciente construcción

de riesgo. Guatemala: Autor. <https://www.url.edu.gt/publicacione-surl/FileCS.ashx?id=40177>

IDRC – OPS/HEP/CEPIS. (2001). Proyecto regional sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: realidad y potencial, Estudio general del caso Sololá, Guatemala, 2000 – 2002. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/proyecto/generales/casos/solola.pdf>

INE. (2015). Compendio estadístico ambiental 2014, Guatemala: Instituto Nacional de Estadística.

IPCC. (2006). "Wastewater treatment and discharge", Chapter 6, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories p.6.22 https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_6_Ch6_Wastewater.pdf

MARN. (2017). Informe Ambiental del Estado de Guatemala 2016-Guatemala. Guatemala. 274pp.

MARN. (2005). Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático Guatemala, 224 pp.

MEM. (2017). Plan Nacional de Energía 2017-2032, 101 pp. <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2017/11/Plan-nacional-de-energia.pdf>

MEM. (2013). Política Energética 2013-2027, 52 pp. <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2013/02/PE2013-2027.pdf>

Naciones Unidas. (2017). "Datos y cifras del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 para garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todas y todos, a nivel mundial" <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Prajapati AK, Chaudhari PK, Mazumdar B, Choudhary R. (2004). "Catalytic thermal treatment (catalytic thermolysis) of a rice grain-based biodigester effluent of an alcohol distillery plant", Environ Technol. 2015; 36(20):2548-55.

Red Mexicana de Bioenergía. (2012). Producción de Biogás en México: Estado actual y perspectivas <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT5.pdf>

Saini, Jitender & Saini, Anju & Lohchab, Rajesh & Kumar, Jitender. (2016). "Rice mill wastewater treatment by upflow anaerobic sludge blanket reactor", International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences, Volume-6, Issue-3, July-Sept 2016.

USAID. (2013). Evaluación institucional y análisis sectorial para la estrategia de desarrollo con bajas emisiones de Guatemala, Forest Carbon, Markets and Communities (FCMC) program.

U.S. Environmental Protection Agency's (U.S. EPA's). (2012). Global Anthropogenic Emissions of Non-CO₂ Greenhouse Gases: 1990–2030 report. www.epa.gov/climatechange/Downloads/EPAactivities/EPA_Global_NonCO2_Projections_Dec2012.pdf

Consumo de biogás en hogares rurales y sus implicaciones económicas y ambientales. Caso El Porvenir, Limón

ESTUDIO DE CASO

Fabiola M. Jiménez & Diana A. Zambrano

Instituto Tecnológico de Costa Rica

fabiola2694@gmail.com ✉

RESUMEN

La producción de biogás en biodigestores, permite a las familias de zonas rurales agrícolas, contribuir a mejorar su economía, al contar con fuente energética propia, además del biol, que ayuda a incrementar la productividad de los cultivos. En el Porvenir de Cariari, hay en funcionamiento 28 biodigestores operados por la familia, como sistema integrado de producción de cerdos, y generación de biogás. Esta investigación presenta la valoración del consumo de biogás domiciliario, y las repercusiones del cambio de fuentes energéticas. Se midió el consumo de biogás con flujómetro por 110 días. Se valoró el costo de oportunidad, basado en el consumo y sustitución de energías, y se estimaron los beneficios ambientales, principalmente GEI (CO₂eq). La mitigación estimada es de 65,2 tCO₂eq/año, y el ahorro económico anual por familia fue de \$306,27 USD, mostrando los impactos positivos al ambiente y a las familias por la implementación de biodigestores en sectores rurales.

PALABRAS CLAVE:

BIODIGESTORES; BIOGÁS; CONSUMO; GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI); COSTOS.

KEYWORDS:

BIODIGESTERS; BIOGAS; CONSUMPTION; GREENHOUSE GAS EMISSIONS; COSTS.

ABSTRACT

The production of biogas in biodigesters allows families in agricultural rural areas to contribute to their economic conditions by having their own energy source, in addition to the biol that helps to increase the productivity of crops. By 2017, 28 biodigesters were active in families of the Porvenir de Cariari as an integrated system for the production of pigs and the generation of biogas. This research focuses on the assessment of biogas consumption and the repercussions of the change of energy sources. The biogas consumption was measured with a flowmeter for 110 days. The opportunity cost was valued, based on energy consumption and substitution, and the environmental benefits were estimated, mainly GHG (CO₂eq). The estimated mitigation is 65.2 tCO₂eq/year, and the annual economic savings per family is \$ 306.27 USD, showing the positive impacts to the environment and families by the implementation of biodigesters in rural sectors.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, el sector agropecuario representa uno de los mayores contribuyentes del cambio climático, debido a sus grandes emisiones de GEI. Desde el año 2015, el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) ha venido trabajando con 4 comunidades rurales de Limón, las cuales encuentran su principal fuente económica en el sector mencionado. Se instalaron 38 biodigestores, de los cuales 28 permanecen ac-

tivos, donde los 10 sistemas restantes no se encuentran en funcionamiento debido a desinterés de los usuarios o averías en el sistema. El biogás es el producto principal para las familias, siendo vital su obtención para mantener el interés de los propietarios en el funcionamiento de los sistemas. La cuantificación del biogás requerida por las familias para abastecer sus necesidades energéticas, en este caso, únicamente como fuente de combustible para la preparación de alimentos, es importante para determinar si el biodigestor

y su producción de gas son suficientes para satisfacer los requerimientos diarios del hogar. Se realizó un análisis del requerimiento diario de biogás, y los efectos en términos económicos y ambientales, que su utilización trae consigo. Estas experiencias, contribuyen en la Estrategia Nacional de Cambio Climático, donde se busca la inversión, impulso de energías no convencionales, tecnologías para la reducción de huella de carbono y utilización de residuos para alcanzar el desarrollo humano.

METODOLOGÍA

El consumo de biogás fue medido durante un periodo de 110 días mediante un flujómetro, como muestra la figura 1. Con la información obtenida, se calculó la cantidad de biogás diario aprovechado por la familia, siendo base para el análisis económico y cuantificación de gases de efecto invernadero (GEI).



Figura 1. Flujómetro instalado para la medición de biogás.

En este trabajo se consideraron 3 ejes de análisis: i) consumo de biogás, ii) costos de oportunidad basados en el consumo, y sustitución de energías, y iii) beneficios ambientales, principalmente GEI (CO₂eq).

Análisis económico

Se determinaron los costos requeridos para la cocción con leña, otorgándole un valor económico únicamente al tiempo requerido por el parcelero para la recolección de este material, mientras que, para el uso de gas líquido de petróleo (LPG), se consideró

el precio del cilindro de gas, tomando en cuenta el tamaño de cilindro y la duración de este para la familia, y también el costo de transporte hasta la vivienda.

Emisiones atmosféricas

Se cuantificaron las emisiones atmosféricas propias del manejo de estiércol, combustión de LPG y leña, en términos de gases de efecto invernadero (GEI), y específicamente en toneladas de CO₂eq anual. Las estimaciones se realizaron tanto para el caso específico de la parcela estudiada, al contar con datos precisos del consumo de biogás, y de las fuentes de energía previas, como una aproximación de las emisiones de GEI que podrían estar siendo mitigadas con la implementación de los biodigestores en el resto de las comunidades del proyecto.

Las emisiones del LPG son estimadas en términos de CH₄ y N₂O, y su equivalencia como CO₂ se determinó según los factores de emisión del IMN (2017). En el caso de la leña, la cuantificación de CO₂eq se basó en de la ecuación establecida en Pei-dong et al. (2007). Mientras que, los GEI de las excretas de los animales, se determinaron según lo indicado por (FAO. 2015).

Figura 2a. Ejemplo de biodigestor instalado.

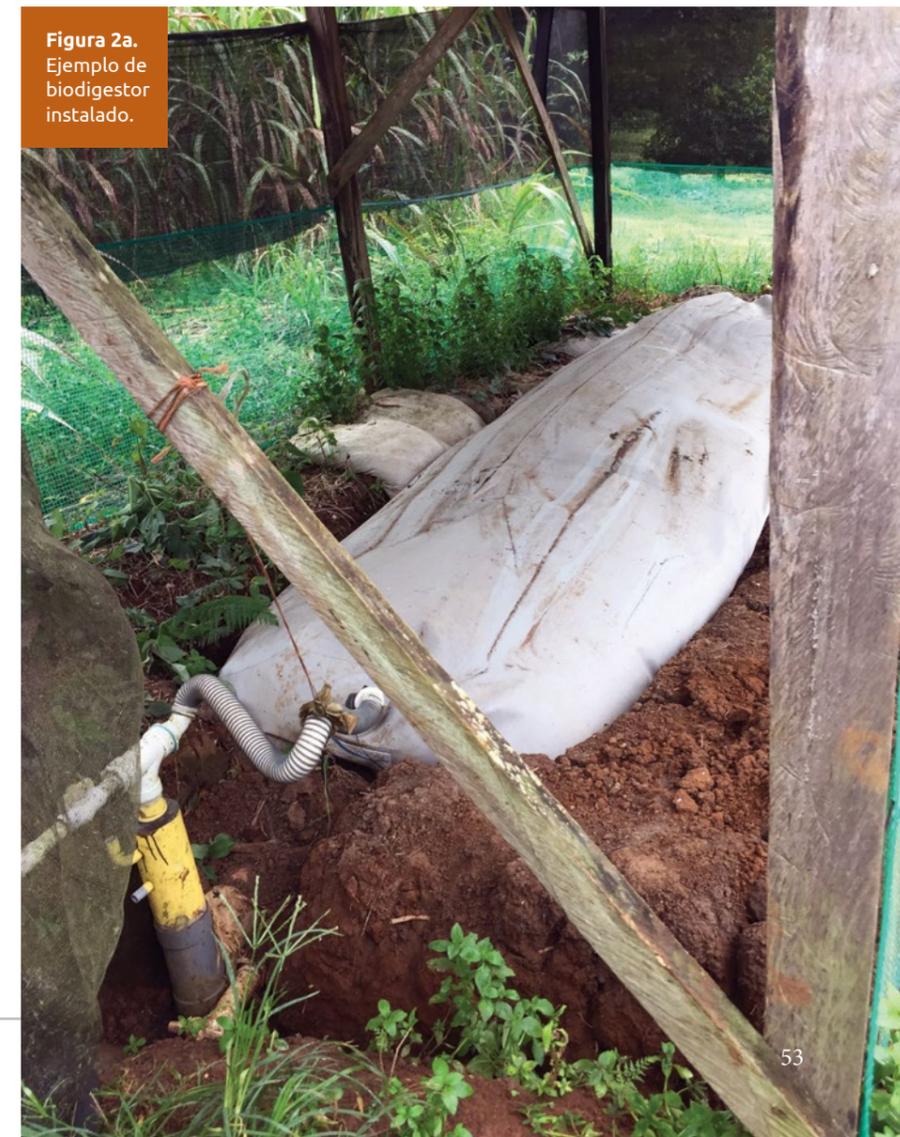
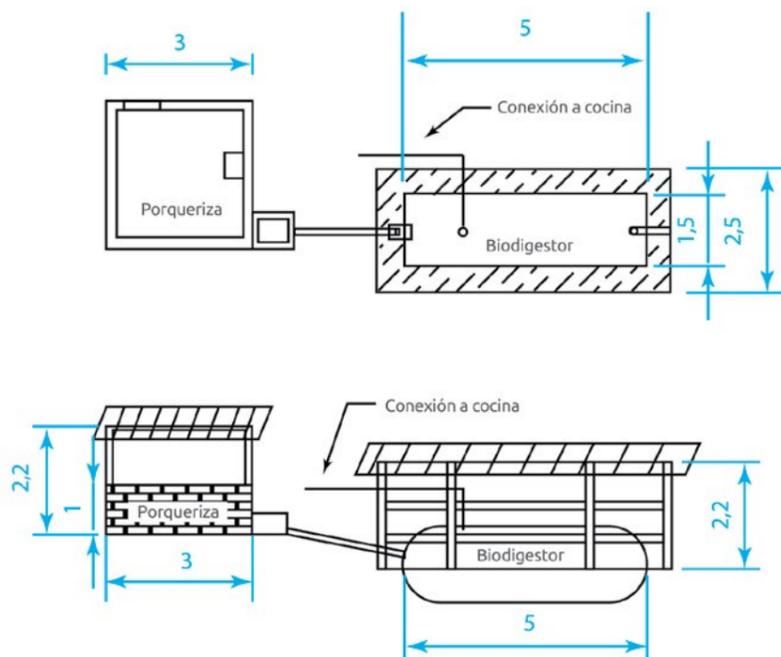




Figura 2b. Ejemplos de los biodigestores instalados.



DESCRIPCIÓN DEL CASO Y RESULTADOS

La instalación de biodigestores tubulares domésticos (figura 2 a y b) en cuatro comunidades de El Porvenir de Limón, se realizó con el objetivo de mejorar las condiciones de salud y económicas, al darle tratamientos a los residuos orgánicos provenientes de pequeñas granjas, principalmente porcinas, y, en algunos casos, se encuentran bovinos o gallinas.

Figura 3. Esquema de la distribución de los sistemas instalados (unidades en metros).



Figura 4. Estufas para la combustión de biogás.

Por su parte, las familias beneficiadas con la instalación de biodigestores, mantienen en promedio, una composición de 4 miembros que residen en el hogar, sin embargo, se encuentra casos que van desde 2 hasta 8 personas en una misma vivienda. Además, como se observa en la figura 5, las fuentes de energía previas a la intervención de los sistemas

anaerobios, estaban basadas en la mayoría de los hogares en la cocción con leña, para lo cual en cada hogar se contaba con un fogón, en donde la madera era colocada para ser quemada. Mientras que, en algunos hogares se cocinaba con plantillas eléctricas, o que permitían la combustión de gas líquido de petróleo.

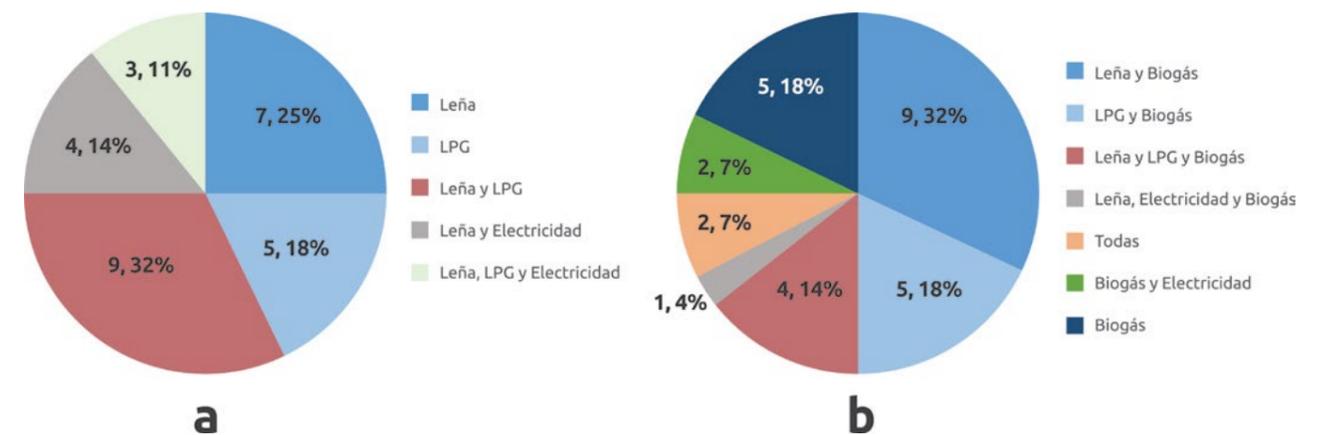


Figura 5. Fuentes de energía utilizadas previo a la instalación de los biodigestores (a) y las actuales (b).

La cantidad de biogás requerida por día es sumamente cambiante, al verse afectada por distintos factores, como lo son el tipo de alimento, o las actividades que los miembros de la familia vayan a desarrollar ese día, o durante un lapso de tiempo, como se evidencia en la figura 6. Durante los primeros días de medición, y hasta el mes de diciembre, para un total de 45 días, donde en promedio se consumían 0,54 m3

al día de biogás, mientras que, en los días restantes hubo un menor requerimiento diario, con promedio de 0,25 m3. Sin embargo, al tratarse de un sistema que tiene como propósito el proveer combustible para las necesidades familiares, se establece que la reserva de biogás que permanece en el biodigestor permite suministrar lo demandado diariamente por esta familia.

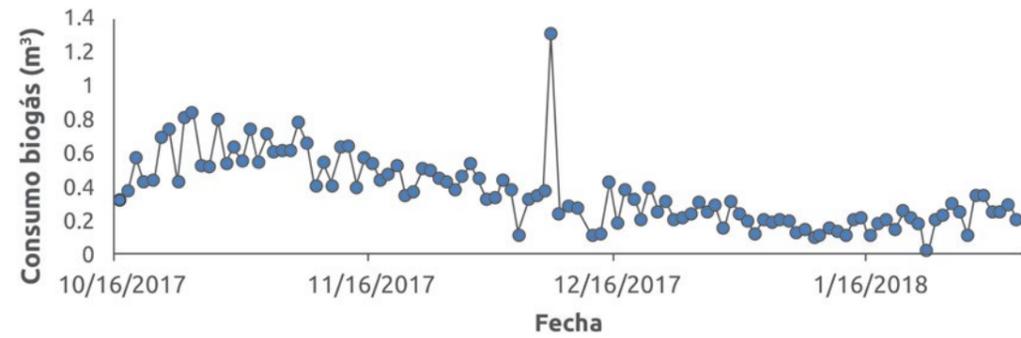


Figura 6. Consumo diario de biogás.

Al analizar el consumo de biogás por mes, se observa que los promedios de octubre y noviembre son los más altos, con valores por encima de los 0,5 m³, para los meses de diciembre y enero, se tiene una caída que llega casi a la mitad del consumo de los meses anteriores. Esta baja, ligada a las actividades y celebraciones de fin de año, en las que la alimentación varía, y por lo general tiende a necesitar de un mayor tiempo de cocción, como en el caso de la preparación de los tamales o chicharrones, conlleva a que las familias utilicen leña, y no el biogás, para así, no agotar sus reservas.

En la figura 7, se muestran los valores estadísticos del biogás consumido por la familia durante los 110 días de medición, teniendo un promedio durante el periodo evaluado de 0,37 + 0,21 m³ de biogás diarios. Así mismo, esta figura permite apreciar como el 50% de los datos de consumo se encuentran entre 0,2 y 0,5 m³ de biogás, con un valor atípico, correspondiente al valor máximo de 1,31 m³ de biogás al día.

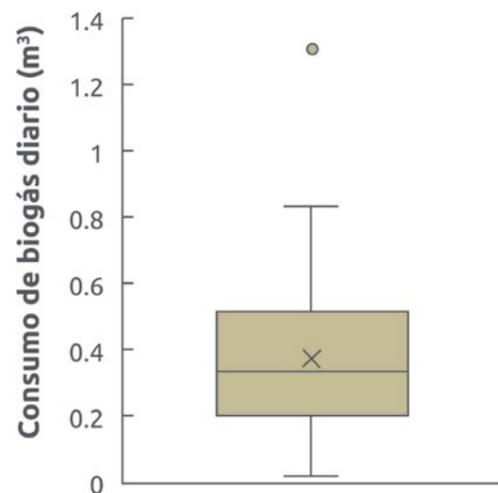


Figura 7. Estadísticos del consumo de biogás.

Por lo tanto, se puede determinar que el contenido de biogás remanente en el biodigestor, permitiría que la familia pudiera mantener un consumo mayor al actual, en caso de

ser requerido. No obstante, hay que tomar en cuenta que, la producción de biogás está influenciada por la materia orgánica que le es suministrada al biodigestor.

Costos de oportunidad de la utilización de biogás

El impacto económico que las familias perciben, al contar con una fuente propia de combustible para la cocción de alimentos, va a depender del valor de los gastos en que incurrieron según el tipo de energía que utilizaban previamente, además que debe considerarse, que los costos de oportunidad van a aumentar, acorde al cambio de situación socioeconómica. La cocción con leña estaba presente en un 82% de los hogares, no obstante, la obtención de este material tiende a ser a partir de árboles que se encuentran dentro de las propias parcelas, por lo que los beneficios económicos que representa la sustitución de la quema de leña por el biogás, no se ve reflejada directamente en la economía familiar. Sin embargo, el cocinar con leña si conlleva aspectos a los cuales se le puede otorgar un valor monetario. Por lo que se estimó un monto, al tiempo requerido para la recolección de la leña, considerando un salario base para un trabajador calificado en jornada ordinaria diaria, correspondiente a \$19,5 USD, obteniéndose de esa manera, un valor total anual por el uso de leña, de \$438,3 USD.

En el caso de la sustitución de los cilindros de LPG, se basó en la duración y tamaño del cilindro que se solía mantener en la vivienda, se consideraron los gastos por compra y transporte de suministros, siendo esta, una inversión de \$306,27 USD anuales.

Por su parte, el biodigestor requiere que diariamente sea alimentado, y la realización de las diversas actividades de operación y mantenimiento para su correcto funcionamiento y producción de biogás. Por consiguiente, los costos del tiempo requerido en labores de mantenimiento, más costos que podrían implicar averías del sistema, deben ser consideradas para poder tener un mejor panorama de cuales serían aproximadamente los beneficios económicos que percibirían las familias. De esta forma, se le otorgó un valor de \$409 USD/año a la operación y mantenimiento del biodigestor, atribuyéndoles, 7 días completos de trabajo a estas labores.

Ahora bien, al contemplar únicamente los montos económicos que representan una afectación directa y visible a los bolsillos de las familias, se tiene que sólo los costos demandados por la compra del LPG cumplen con estas características, ya que, al ser los mismos parceleros los que realizan la recolección de la leña en sus mismos terrenos, la utilización de esta fuente de combustible no requiere que incurran en gastos económicos directos. De igual forma, la obtención y uso del biogás como fuente energética, no representa un costo monetario para las familias, sino una ayuda que les permite sustituir tanto de los combustibles previamente empleados, como de fertilizantes químicos, al aplicar el biol como biofertilizante para el mejoramiento del rendimiento de sus cultivos.

Gases de efecto invernadero (GEI)

La presencia de los biodigestores domésticos y el uso del biogás tienen como efecto indirecto la reducción de los gases de efecto invernadero, contribuyendo a contrarrestar el cambio climático. Las reducciones en las emisiones de metano y óxido nitroso, por el manejo que se le da a las excretas de los animales, las cuales son retenidas en el reactor y quemadas en las cocinas previniendo su emisión. Por otro lado, el biogás permite reemplazar combustibles fósiles y de biomasa, eliminando los GEI de su combustión.

En la tabla 1, se muestran las emisiones de CO_{2eq} reducidas, al sustituir las fuentes de energía que la familia utilizaba, previo a la instalación de los biodigestores y brindarles un tratamiento a los purines.

Tabla 1. Emisiones de CO_{2eq} por fuente de emisión/hogar

Emisiones	Leña	LPG	Disposición de excretas	Total
CO _{2eq} (t/año)	0,7	0,6	3,6	4,9

El reemplazo de las fuentes de energía en la vivienda analizada, permite reducir un total de 1,3 t CO_{2eq}, siendo la leña, el mayor emisor. Es importante recalcar que la leña era la principal, y prácticamente única fuente de energía de esta familia, previo a la intervención que se realizó con la instalación de los biodigestores; el uso de cilindros de gas no era tan recurrente debido al monto económico que representaba, sin embargo, las emisiones que se obtienen al tomar el LPG como fuente de GEI es considerable.

El manejo del estiércol por medio del proceso de biodigestión, permite mitigar 3,6 t CO_{2eq} anualmente, no obstante, este valor se ve afectado por la cantidad de animales a los cuales se les brinda tratamiento de excretas. El hato de cerdos en las parcelas es variable, por lo que las emisiones que se podrían llegar a aminorar, van a ser de igual forma fluctuantes con el tamaño del hato.

Por otra parte, la combustión de biogás produce dióxido de carbono, un GEI 21 veces menos impactante que el metano que se libera cuando el estiércol animal se deja en el campo sin ningún tratamiento, además, esta combustión genera menos emisiones que la biomasa tradicional, como es el caso de la leña que es empleada principalmente en hogares rurales (Pérez et al. 2014). Sin embargo, como indican Hosseini & Wahid (2014), la captura y manejo del biogás, se debe realizar de forma apropiada, para de esta manera, evitar la liberación de grandes cantidades de CO₂ y CH₄ en el ambiente.

Al realizar una proyección de las emisiones mitigadas en los 28 hogares en los cuales se encuentra el biodigestor en funcionamiento, los resultados de la cuantificación de emisiones, se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Estimación promedio de emisiones anuales por hogar de CO_{2eq} mitigadas por los biodigestores.

GEI	Energía	Manejo del estiércol	Total
CO _{2eq} (t/año)	1,3	1	2,3

En cuanto a la cantidad de CO_{2eq} producido por las excretas animales, se tiene que son 1 t/año por hogar, correspondiendo a un 44% de las emisiones totales, y convirtiéndose en la fuente principal al considerar las energías individualmente, teniendo en segundo lugar las emisiones de la leña por hogar, con un 31% equivalente a 0,7 t CO₂/año, y con un 25% a los cilindros de gas LPG, con un total de 0,6 t CO₂/año.

Las emisiones mitigadas por el biodigestor por el tratamiento de las excretas y el reemplazo de fuentes de energía, se pueden representar con una comparación que permita tener una idea más tangible de lo que implican, por esta razón, al realizar una equivalencia de la cantidad de CO_{2eq} emitido por la combustión de un litro de gasolina para transporte terrestre con catalizador, se obtiene un valor de 2,32 kg CO_{2eq}/L, según los factores de emisión del (IMN. 2017), por lo tanto, se obtiene que las emisiones totales mitigadas por hogar de 2,3 t/año equivalen a 991,37 L/año, lo cual tendría un valor económico de \$1.094 USD anuales por gasolina regular, de acuerdo con el valor por litro vigente dado por la Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE), y el tipo de cambio del dólar.

LECCIONES APRENDIDAS Y RECOMENDACIONES

Para acercarse aún más a la realidad de las implicaciones que los biodigestores tienen, se deberían considerar las emisiones generadas por los subproductos del biodigestor, en términos de CO_{2eq}, como lo son el almacenamiento y reuso del

digestato tanto líquido como sólido. También se deberían tomar en cuenta, las cuantificaciones económicas, tanto en la sustitución como en las mejoras en el rendimiento de los cultivos por la aplicación del biol, que igualmente representan beneficios para las familias en este ámbito.

Además, es importante la realización de una medición del porcentaje de metano que constituye el biogás, determinando así la calidad de este.

Así mismo, toda la información recolectada permite la ejecución de un análisis de mitigación de CO₂, que consecuentemente, puede ser empleado en la creación de certificaciones de carbono, a las cuales se le puede otorgar inclusive un valor comercial.

Por su parte, la instalación de los biodigestores nos ha permitido establecer aspectos sociales que han sido impactados, entre ellos se encuentra la salud, especialmente de las mujeres, que es uno de los factores que se ha visto mejorado, ya que en varias de las familias, la leña era con lo que se preparaban mayoritariamente los alimentos, y que debido al humo y a sus partículas emitidas, contribuía a problemas respiratorios. Actualmente, con el biogás las familias cuentan con una fuente de energía que no les ocasiona repercusiones a la salud.

La mejora en la calidad de vida de las personas, debido principalmente, a que la obtención del biogás se ha convertido en una facilitación de su modo de vida. Esto se ve reflejado en acciones cotidianas, como el no tener que prender fuego para cocinar, que en ocasiones, requería que las personas tuvieran que despertarse mucho antes para preparar sus alimentos. Con el uso del biogás, esto se puede realizar de una manera mucho más rápida. Además, el fuego en muchas viviendas se encontraba en sitios al exterior de éstas, por lo que esta labor se complicaba cuando llovía; el transporte de los cilindros de gas y leña, debido su disminución, es otra de las acciones que se ha facilitado.

CONCLUSIONES

Los biodigestores representan una fuente de beneficios económicos, ambientales y sociales. Dentro de estos se encuentra, que el biogás producido, permite satisfacer las necesidades energéticas de la familia, manteniendo así, una reserva dentro del sistema. La cantidad de CO₂ equivalente, que los biodigestores permiten reducir es significativa por el reemplazo de leña y LPG por biogás en la cocción de alimentos.

La instalación de los biodigestores en los cuatro asentamientos, como parte de un proyecto de desarrollo rural, ha permitido que las circunstancias económicas no establecieron una limitante para mejorar sus condiciones de vida, y así mismo, emprender un desarrollo sostenible en cada uno de los hogares.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Centro de Investigación y Extensión, Ingeniería de los Materiales (CIEMTEC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, y a su coordinador José Luis León, quienes son los encargados del proyecto en Limón, y quienes realizaron la instalación de los flujómetros que permitieron la realización de este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HOSSEINI, S; WAHID, M. Development of biogas combustion in combined heat and power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 868-875, 2014.

INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL (IMN). Factores de emisión gases de efecto invernadero. Séptima edición. Costa Rica, 2017.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO). Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura. Roma, 2015. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i4260s.pdf>

PEI-DONG, ZHANG; GUOMEI, JIA; GANG, WANG. Contribution to emission reduction of CO₂ and SO₂ by household biogas construction in rural China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 11, n. 8, p. 1903-1912, 2007.

PÉREZ, I. et al. Technical, economic and environmental assessment of household biogas digesters for rural communities. *Renewable energy*, v. 62, p. 313-318, 2014.

¿Como diseñar un filtro para biogás? La remoción de H₂S con óxido de hierro

Joaquín Viquez Arias

jviquez@viogaz.com

El biogás es probablemente el beneficio más directo y tangible que ofrece un biodigestor. Sus usos pueden ir desde térmico, donde se utiliza la combustión del biogás para aprovechamiento directo del calor (o frío), como por ejemplo, en una estufa. También puede tener un uso mecánico, donde el biogás es usado como combustible para un motor y este acciona otro implemento (bombeo de agua, ordeñadora, picadora de pasto, generación eléctrica). Y en casos industriales, también se puede convertir el biogás en biometano, que es la purificación y compresión del biogás para su uso en transporte vehicular o interconexión a redes de gas.

Como bien deben saber, el biogás se produce por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, y está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, pero también tiene trazas de otros compuestos como amoníaco, nitrógeno, hidrógeno, vapor de agua y sulfuro de hidrógeno. El metano es el único compuesto de interés, pues está en concentraciones altas, y es inflamable.

Indistintamente del uso final de biogás, siempre se habla de la importancia de limpiar, depurar o filtrar el biogás, esto es, remover todos los compuestos que no sean metano. La realidad es que esto aplica sólo para la producción de biometano, y no es el caso para todos los usos del biogás. Por ejemplo, para su uso térmico, no es necesario remover el dióxido de carbono, ni tampoco para su uso en motores. No obstante, el sulfuro de hidrógeno (H₂S) es uno de los únicos compuestos que es altamente reco-

mendable eliminar, indiferentemente de su uso, debido a sus características altamente corrosivas, y principalmente tóxicas.

Existen una variedad de tecnologías para lograr esto, desde agregar cloruro de hierro dentro del biodigestor (para precipitar el sulfuro de hierro como una sal metálica), la inyección de aire en la cúpula de gas (micro aireación –remoción biológica), o el uso de filtros líquidos (con soluciones alcalinas) o sólidos (como carbón activado, composta y óxidos de hierro). Esta cápsula informativa, busca hacer una breve descripción de los factores que se involucran al momento de diseñar y utilizar un filtro de biogás, usando como base el óxido de hierro. ¿Por qué? Pues para criterio del autor, es una de las formas más económicas y sencillas de depurar/limpiar el biogás del H₂S.

¿POR QUÉ ÓXIDO DE HIERRO?

Desde hace muchas décadas, se utiliza el óxido de hierro (también de otros metales) para remover H₂S del gas natural (y ahora del biogás), por su alta afinidad química. Para avanzar en el diseño de un filtro para biogás, a base de óxido de hierro, separé esta capsula en varias secciones:

Entender el sulfuro de hidrogeno

El sulfuro de hidrogeno, a veces también llamado ácido sulfhídrico (si estuviera en condiciones acuosas), se encuentra en forma gaseosa en el biogás. Su concentración, tradicional-

mente se reporta en partes por millón volumen (ppmv). Esto significa que, por ejemplo, 1.500 ppmv serían que cada 1 m³ de biogás (o sea 1.000.000 de mL de biogás), hay 1.500 mL de H₂S. En otras palabras ppmv significa mL/m³. Estos 1.500 mL de H₂S pueden ser convertidos en masa, usando la densidad (que depende de la presión y la temperatura) del H₂S, pero se puede usar de referencia 1,52 g H₂S / 1.000 mL. Por lo tanto:

$$1.500 \text{ mL H}_2\text{S} \cdot \frac{1,52 \text{ g H}_2\text{S}}{1.000 \text{ mL}} = \frac{2,28 \text{ g H}_2\text{S}}{\text{m}^3 \text{ de biogás}}$$

Ecuación 1. Conversión de H₂S mL a H₂S en gramos.

ENTENDIENDO LA REACCIÓN ENTRE EL SULFURO DE HIDROGENO Y EL ÓXIDO DE HIERRO

La reacción entre el óxido de hierro hidratado (III) y el H₂S es:



Ecuación 2. Reacción entre óxido de hierro y H₂S.

Con algunas bases en química, podemos deducir que por cada 3 moles (3 moles x 34,1 g/mol = 102 g) de H₂S se requiere 1 mol (1 mol x 159 g/mol = 159 g) de Fe₂O₃. Esto sería 1,55 g de óxido de hierro por cada gramo de H₂S. Esto, asumiendo que la reacción es 100% eficiente, y que el sustrato que usemos será también compuesto por 100% óxido de hierro. Ambas afirmaciones anteriores son incorrectas... sigamos.

¿DÓNDE CONSIGO ÓXIDO DE HIERRO?

Esta es una pregunta bien interesante, y no tengo todas las respuestas. Algunos documentos de los años 80's (e inclusive de los 90's), sugieren el uso de alambriña (también conocida como virutilla o esponja de hierro (figura 1 (a)). Sin embargo, según el punto anterior, esta no funciona, pues, no es óxido de hierro. Algunas pruebas realizadas por el autor, han confirmado que la alambriña tiene un 0% de capacidad para remover H₂S en el biogás, aunque algunas otras investigaciones, han mostrado algo de habilidad de remoción.

Algunas empresas han comercializado durante décadas sustratos para filtrar biogás. Algunos ejemplos son Iron Sponge, Sulfatreat, carbón activado (figura 1). Lo comercializado por estas empresas, lo llamaremos de "sustratos". Se trata de materiales que en su superficie han sido impregnados con óxido de hierro (con excepción del carbón activado). Personalmente, he experimentado con iron sponge de Connelly GPM y Sulfatreat de Schlumberger, ambos remueven en un 100% el H₂S en el biogás.

Ahora bien, según el punto 2, la química es bastante directa, sin embargo, resulta ser algo más compleja, puesto que, la formación de óxido de hierro puede llevar a diferentes estados de oxidación, y haber cristalizado de diferentes formas. Por ello, lo mejor es que el proveedor del sustrato, pueda indicar, según pruebas que hayan realizado, cual es la capacidad del sustrato para remover H₂S. A modo de ejemplo, Iron Sponge reporta una eficiencia de 126 g H₂S/kg de sustrato, Sulfatreat 180 g H₂S/kg de sustrato y el carbón activado 100 g H₂S/kg de sustrato.

Figura 1. Ejemplo de sustratos que se utilizan para filtrar biogás.

- A)** alambriña (no funciona!).
- B)** iron sponge de Connelly GPM.
- C)** sulfatreat de Schlumberger.
- D)** carbón activado.
- E)** óxido de hierro peletizado de Puxin.

Fuente: Elaboración propia.



Dunkley W. M.A. en 1921, presentó una formulación para producir óxido de hierro impregnado en virutas de madera, usando sulfato de hierro disuelto en agua y luego oxidarlo. La figura 2 muestra los resultados de este autor para generar un sustrato "casero". Los resultados son inconclusos, pues, aunque se evidenció una reducción de H₂S en el biogás, no se logró determinar por qué su eficiencia no fue del 100%. Seguiremos haciendo pruebas y luego les contaremos.



Figura 2. Producción de óxido de hierro impregnado en virutas de madera.

Fuente: Pruebas realizadas por Víquez, J en la Universidad EARTH (2018).

¿CÓMO DIMENSIONAR EL FILTRO?

Muy bien, ahora que tienen los conceptos básicos claros, podemos seguir con cómo dimensionar el filtro, o empezar con estimar la cantidad de sustrato necesario. Vamos a usar un ejemplo a lo largo de esta cápsula, para ir resolviendo. Los pasos son:

Estimar la cantidad de H₂S que debo filtrar

Para esto se debe decidir la vida útil del filtro. Personalmente los diseñaba con 3 meses, hasta 1 año de vida útil. En este caso, usaremos 4 meses (120 días). Luego, se debe tener clara la cantidad de biogás diario que se requiere filtrar, lo que no siempre es igual a la cantidad de biogás que se produce. Supongamos, hipotéticamente, que el siguiente filtro sería utilizado para depurar el biogás que se usa en una estufa a biogás, la cual consume 0,8 m³/hr con 3 horas de uso al día, o sea, tenemos (0,8 m³/hr x 3 hr/d) 2,4 m³ de biogás al día, o bien, (2,4 m³/d x 120 días) 288 m³ de biogás total que se pretende filtrar.

Ahora, multiplicamos la cantidad de biogás (en m³) por la concentración de H₂S (en ppmv), y luego, por la densidad

del H₂S (en g/mL), con esto, obtenemos los gramos (g) de H₂S que queremos filtrar o remover. Suponiendo que nuestro ejemplo tiene 800 ppmv de H₂S, entonces:

$$800 \text{ ppmv} \left(\frac{\text{mL}}{\text{m}^3} \right) \cdot \frac{1,52 \text{ g}}{1.000 \text{ mL}} \text{ H}_2\text{S} \cdot 288 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{periodo}} = 350 \text{ g H}_2\text{S}$$

Ecuación 3. Ejemplo para estimar gramos de H₂S por filtrar.

Estimamos la cantidad de sustrato requerido

Ya sabemos que se deben remover 350 g de H₂S. El siguiente paso, es decidir el sustrato que se usará; supongamos que se logró conseguir iron sponge, con una eficiencia de 126 g H₂S / kg de sustrato. De manera que, se requiere:

$$\frac{350 \text{ g H}_2\text{S}}{126 \text{ g H}_2\text{S}} = 2,78 \text{ kg sustrato}$$

Ecuación 4. Ejemplo para estimar la cantidad de sustrato requerido.

Chequeamos el tiempo de residencia del biogás viajando a través del sustrato

La reacción química entre el H₂S y el Fe₂O₃, requiere de algunos segundos, y será definida por el proveedor. En el

caso del iron sponge, se requiere de mínimo 60 segundos (esto es lo típico para casi todos los sustratos). Esto significa, que el biogás, al pasar por el filtro lleno del sustrato, debe permanecer no menos que 1 min para que reaccione correctamente. Para verificar esto, lo primero que se debe hacer, es convertir el sustrato estimado en kg a volumen. Para esto, se requiere la densidad del sustrato. En el caso de iron sponge, por ejemplo, encontramos una densidad de 85 kg/m³, lo que significa que 2,78 kg equivalen a:

$$\frac{2,78 \text{ kg sustrato}}{85 \text{ kg}} = 0,032 \text{ m}^3 \text{ o } \approx 33 \text{ L}$$

Ecuación 5. Ejemplo de convertir sustrato en kg a m³ o L.

La ecuación 5, arroja el volumen que ocuparía el sustrato, pero en el biogás se conduciría únicamente

por el espacio poroso de este. En el caso de Iron Sponge, usualmente su espacio poroso es del 50%, por lo que el volumen real gaseoso es $0,032 \text{ m}^3 \times 50\%$ $0,016 \text{ m}^3$ o $\approx 16,5 \text{ L}$.

Entonces, si el biogás va a estar fluyendo por este filtro, a un ritmo de $0,8 \text{ m}^3/\text{hr}$, entonces el tiempo de residencia (o retención) es de:

$$\frac{0,016 \text{ m}^3}{\frac{0,8 \text{ m}^3}{\text{hr}}} = 0,02 \text{ hr} \cdot \frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} = 1,2 \text{ min}$$

Ecuación 6. Estimación del tiempo de residencia en el filtro.

Con esto, confirmamos que el tiempo de residencia es mayor a 1 minuto (¡apenas!). Usualmente, el tiempo de residencia es un problema, cuando se diseñan filtros muy pequeños, como para 1 o 2 meses de operación, y por tanto, siempre se debe revisar. Si el tiempo de residencia da menor a 1 min, entonces se debe ajustar el volumen del filtro para que sea mayor a 1 min.

Último paso, es dimensionar el filtro

Sabemos que requerimos un filtro, físicamente hablando, que tenga un volumen de mínimo 33 L, y pueda soportar el peso de 350 g. Se podría pensar de primera mano, en usar un tubo de 4" de diámetro, sin embargo, para lograr 33 L se ocuparían $\approx 4 \text{ m}$ lineales de filtro... ¡no es práctico! Podríamos alternativamente, pensar en tubería de mayor diámetro, 8" de diámetro, daría un filtro de $\approx 102 \text{ cm}$. Considerando, que no siempre se consigue tubería de 8", y los accesorios adecuados a bajo costo, otra opción es buscar un envase con esa capacidad, por ejemplo, baldes, estañones o cualquier otro que permita hacerlo hermético, con una entrada y una salida para el biogás.



Figura 3. Esquema básico del filtro.

Algunas consideraciones importantes son:

- Idealmente, el envase debe ser más largo que ancho, ojala con un proporción 3:1 (largo:ancho). Esto para mejorar el flujo del biogás por el filtro.
- El filtro debería operar con flujo ascendente, o sea, que el biogás entre en la parte superior y fluya hacia abajo. Esto, porque la reacción química requiere de humedad. Usualmente las condiciones húmedas del biogás son suficientes, pero sólo si fluye hacia abajo, manteniendo todo el sustrato húmedo (caso contrario si fluye hacia arriba).
- Construya el filtro de tal forma que pueda abrirlo en el futuro para cambiarle el sustrato.
- En la parte inferior, debe tener un espacio para acumular agua condensada. ¡La reacción ocupa humedad, y la reacción también produce humedad; tenga como sacar esa agua!
- El filtro debe ser hermético, esto significa que no le entre aire, y tampoco que se salga el biogás.

Como consideraciones finales, podemos señalar que, todos los sustratos son diferentes, tome las precauciones del caso. En el iron sponge, por ejemplo, el óxido de hierro pasa a ser sulfuro de hierro. Este último, en contacto con oxígeno atmosférico, hará una reacción exotérmica (no explosiva), pero sí calienta bastante, esto para que tome cuidado cuando cambie el sustrato. Lo interesante es que, el sustrato, también puede ser oxidado nuevamente y reutilizado.

Gestión Ambiental Universidad de Santo Tomás en Villavicencio (GAUV)

Christian José Rojas Reina - Colombia

✉ christian.rojas@usantotomas.edu.co - <http://ustavillavicencio.edu.co/home/index.php/facultades/ingenieria-ambiental>

La Universidad Santo Tomás (USTA) comprende 5 sedes en Colombia. El Grupo Gestión Ambiental USTA Villavicencio (GAUV) se encuentra localizado en la Sede Villavicencio, y abarca 5 líneas de investigación, entre ellas, la de Desarrollo Sostenible. Dentro de esta línea, se llevan a cabo, entre otras, investigaciones en el área de digestión anaerobia en biodigestores rurales y en el aumento de la producción de biogás mediante el uso de co-sustratos. Entre los proyectos actuales en esta área se encuentran:

Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de un biodigestor tubular anaerobio, a escala piloto, para el tratamiento de aguas residuales porcinas, en la Institución Educativa Agrícola Guacavía, Cumaral (Meta):

En este caso, por medio de la experimentación, se busca comprobar que pueden obtenerse altos porcentajes de remoción de materia orgánica, en tiempos de retención cortos, sin perjudicar el proceso anaerobio, es decir, analizar la eficiencia del proceso en ciclos más cortos de carga del sustrato. También se analiza el uso de diferentes proporciones de agua/estiércol en la carga del digestor.

Determinación del Potencial de Biogás de residuos agrícolas en la Región de la Orinoquía colombiana:

Se iniciará la determinación experimental en el laboratorio, a escala piloto, de diferentes co-sustratos con excretas porcinas. El primer co-sustrato a analizar, será la cascarilla de arroz, un residuo agrícola que se produce en abundancia en la región. Se realizarán experimentos a escala de laboratorio, en reactores tipo Batch, para determinar la tasa específica de producción de biogás. Posteriormente, se experimentará con diferentes cargas en un reactor a escala piloto, esto, para analizar la operación y problemas generados por la alimentación continua, tales como la creación de espuma, la sedimentación de residuos, entre otros. Posteriormente, se estudiarán otros residuos, tales como cáscara de café, residuos de caña de azúcar, etc.

Factibilidad técnica de la utilización de las excretas de animales exóticos para la producción de biogás y producción de abono orgánico, por medio de un biodigestor,



en el Bioparque Los Ocarros, Villavicencio (Meta):

Con la finalidad de mejorar el Programa de Residuos Sólidos del Bioparque Los Ocarros en Villavicencio, Colombia, se determinará el potencial de producción de biogás de las excretas animales, producidas por medio de su caracterización y realización de la digestión anaerobia a escala de laboratorio.





Red Colombiana de la Energía de la Biomasa (RedBioCol)

Lylian Rodríguez, Gloria Ximena Pedraza, Fabián Henao - Colombia

✉ lylianr@utafoundation.org; gloria@fun.cipav.org.co; fabian.henao@terrazonet.com - www.redbiocol.org

La RedBioCol (www.redbiocol.org) se define como una estrategia metodológica, con la cual las organizaciones que comparten un ideario, se articulan para buscar la sostenibilidad de sus territorios, a través de los avances en la soberanía alimentaria, energética y económica.

En octubre de 2012, en la Finca Ecológica TOSOLY en Guapotá, Santander, Colombia, se convocaron 24 personas con iniciativas individuales, organizaciones, e instituciones de diversos orígenes, países, y de diferentes regiones de Colombia, con el fin de intercambiar experiencias. En dicha ocasión, también se formalizó la RedBioCol, Red Colombiana de la Energía de la Biomasa. Además de constituirse en una Red de Biodigestores, se priorizó el papel de la producción de biomasa en el trópico, desde el aprovechamiento del proceso

fotosintético para captar energía del sol, con el fin de promover sistemas de producción de vida eficientes y soberanos, en energía y alimentos.

En la actualidad, los miembros corresponden a ONG's, universidades, empresas y organizaciones de base, con un total de 57 organizaciones, centradas en experiencias alrededor de la biomasa: desde sistemas productivos agroecológicos, que tengan como principio el trabajo con sistemas agroforestales, bosques productivos y/o bosques comestibles, que promuevan el uso de los recursos locales, la biodiversidad, la protección del suelo, la visión multipropósito, y el reciclaje de los residuos de las actividades agropecuarias y actividades humanas, a través de biodigestores, hasta el uso de los residuos fibrosos, por medio de tecnologías como la gasificación.



La RedBioCol se ha fortalecido gracias al esfuerzo colectivo de los miembros de la red y su equipo articulador, quienes, a lo largo de diversos espacios, como encuentros, comités, reuniones de trabajo, y jornadas de planeación, han realizado aportes desde sus saberes, prácticas, recursos e intereses, con la idea de construir un camino hacia la sostenibilidad energética, alimentaria y económica.



Revalorización Energética de Residuos Orgánicos (RERO)

Universidad Nacional de Villa María, CIT CONICET

GRUPO DE INVESTIGACIÓN

Telma Scarpesi, Roberto Manno - Argentina

✉ proyectorero@gmail.com

El grupo de investigación de la Universidad Nacional de Villa María (UNVM), tiene por finalidad, revalorizar los residuos orgánicos de industrias y productores agrícola-ganaderos, de zonas aledañas a Villa María, mediante bioprocesos de digestión anaeróbica, para generar biogás de calidad y bioabono, que podrán ser utilizados por aquellos establecimientos, cuya prioridad sea la necesidad energética, además de facilitar la disposición final de sus residuos. La UNVM consta de un laboratorio de simulación, control de procesos de biodigestión y calidad de biogás, el que está integrado por biodigestores, equipos para la caracterización de sustratos, y equipos de cromatografía gaseosa. Dentro de las actividades para revalorizar estos coproductos, se evalúa disponibilidad y el potencial energético para producir biogás.



Las actuales líneas de investigación desarrolladas por el grupo son las siguientes:

- Evaluación de sustratos no convencionales para la producción de biogás de calidad, mediante procesos de digestión anaerobia. El objetivo de esta línea de investigación, es llevar a cabo una evaluación de sustratos no convencionales (principalmente residuos de la industria frigorífica) para la producción de biogás de calidad, mediante procesos de digestión anaerobia, además de optimizar el diseño de mezclas para cada sustrato ofrecido por agroindustrias y establecimientos agrícola-ganaderos.

- Desarrollo de sistemas integrados para el tratamiento de efluentes y la producción de biogás. Modelado y optimización. El objetivo de este trabajo es, por un lado, caracterizar y tratar distintas corrientes de residuos (principalmente agro-industriales), por medios biológicos (digestión anaerobia, aerobia y combinada), logrando el máximo aprovechamiento energético con la producción de biogás, y, por otro lado, desarrollar modelos (rigurosos y simplificados) de sistemas híbridos para el tratamiento de aguas residuales, y recuperación de energía que ayuden a la toma de decisiones, siguiendo criterios ambientales, económicos y operativos.

- Determinación de las mezclas óptimas para producción de biogás mediante digestión anaeróbica, a partir de silaje de sorgo azucarado y efluentes de la agroindustria. El objetivo de este trabajo es determinar la proporción óptima de silaje de sorgo azucarado, purines de cerdo y lactosuero, que maximicen la producción de biogás en un rango mesófilo, utilizando un diseño de mezcla.



- Acondicionamiento y estabilización del digestato proveniente de plantas de biogás para su utilización como fertilizante orgánico en agricultura. El objetivo de este trabajo es caracterizar y acondicionar el digestato obtenido de la producción de biogás, a partir de desechos de frigoríficos y purín de cerdo, para que cumpla con las exigencias sanitarias y parámetros físico-químicos, que garanticen su utilización como fertilizante orgánico en la producción de alimentos, contribuyendo también, a un medio ambiente más limpio.



Además, se analizan características físico-químicas, biodegradabilidad anaeróbica, y el potencial de metano de las diferentes mezclas de estos coproductos, usando como metodología de referencia, la normativa VDI 4630:2006. El grupo de trabajo está formado por investigadores, becarios y alumnos avanzados en sus TFG, representantes de empresas y productores.

Generación de biogás a partir de residuos agropecuarios en el sur de Chile

Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro Regional de Investigación Remehue

GRUPO DE INVESTIGACIÓN

Dr. Francisco Salazar Sperberg y Dr. Josué Martínez-Lagos - Chile

✉ josue.lagos@inia.cl - <http://www.inia.cl/inia-remehue>

A partir del año 2013, el Instituto de Investigaciones agropecuarias (INIA), incorporó a la línea de investigación relacionada con el manejo de efluentes agropecuarios, la generación de biogás a través de la digestión anaeróbica de fecas de vacuno y efluen-

tes de la lechería. A la fecha, en INIA Remehue (Osorno, Chile) contamos con dos plantas experimentales de digestión anaeróbica, que permiten evaluar de manera sistemática y científica, los principales aspectos relacionados con el funcionamiento, opera-

ción y pertinencia de esta tecnología en las condiciones propias del sur de Chile, que se caracteriza por sistemas pastoriles de producción de leche, además de alta pluviometría y bajas temperaturas a lo largo de casi todo el año.





Una de las plantas, es un biodigestor de construcción pasiva a escala piloto, con un sistema de carga a través de bomba, agitación manual y sin sistema de calentamiento del reactor, el cual genera biogás que es utilizado para calentamiento de agua. La otra planta, realiza digestión anaeróbica húmeda, con un sistema multietapas, sistema automático

de agitado y de control de temperatura en los reactores, y medición del volumen de biogás generado.

Estas iniciativas, se han llevado a cabo, gracias a proyectos y convenios de investigación y desarrollo junto a UNIDO (Organización de las Naciones Unidas para el desarrollo Industrial), Ministerio de Energía de Chile y Fundación para la Innovación Agraria (FIA), lo que ha permitido implementar los biodigestores, y evaluar la digestión anaeróbica como alternativa de tratamiento, permitiendo aprovechar el recurso energético generado, así como la utilización del efluente estabilizado, resultante como enmienda en praderas y avena forrajera. Además, se ha podido realizar extensión y transferencia tecnológica a más de 700 personas, entre ellas, productores, asesores técnicos y estudiantes, a través de eventos de capacitación y difusión.

A futuro, se espera robustecer esta línea de investigación, evaluando distintos tipos de sustratos, realizando co-digestión, y utilización del biol en otros cultivos, así como continuar trabajando en la instalación de capacidades a nivel regional. Actualmente, el equipo está principalmente conformado por los investigadores Dr. Francisco Salazar Sperberg, Dr. Josué Martínez-Lagos y Dra. Marta Alfaro Valenzuela, con el apoyo técnico de la bioingeniera Marion Rodríguez Corrales y la ingeniera Alejandra Jiménez Guzmán.



Our primary concern is to promote and support developments in the biogas sector through national and international events and independent consulting for more than 15 years.

Upcoming IBBK Biogas events:



16-18 October 2018
Progress in Manure and Digestate treatment
 International conference with exhibition and excursion
 Schwäbisch Hall, Germany - language: ENGLISH/GERMAN



16-24 April 2019
proBIOGAS International
 7-day hands on biogas training with plant visits
 Stuttgart, Germany - language: ENGLISH

More info and registration under:
www.ibbk-biogas.com



HoMethan®

- la manera más fácil de generar biogás -

ÖKOBIT
 los expertos en biogás

HOMETHAN TU PLANTA DE BIOGÁS COMPACTA Y FLEXIBLE PARA AGRONEGOCIOS, TU TODOTERRENO



Valorización energética de estiércoles y de una amplia variedad de otros residuos orgánicos



Amplia experiencia con residuos y desechos de origen animal, pesquero y alimenticio



Sistema de agitación manual que garantiza una digestión homogénea



Apertura de inspección con fines de mantenimiento, solución al efecto "caja negra"



Completamente autárquico - sin necesidad de electricidad ni agua para su funcionamiento



HoMethan viene en una caja - fácil y simple ensamblaje



Tecnología patentada y fabricada en Alemania



Referencias en Latinoamérica y el Caribe



+200
 proyectos de biogás de alta envergadura por todo el mundo

40
 HoMethan listos y en pleno funcionamiento

100%
 energía verde

CONTÁCTENOS Y ÚNASE A NUESTRO PROGRAMA DE PARTNERS

ÖKOBIT GmbH
 Jean-Monnet-Straße 12
 54343 Föhren/GERMANY

www.oekobit-biogas.com
info@homethan-biogas.com





La solución ideal para el **Biogás**

20 años resolviendo problemas, ofreciendo soluciones concretas y locales. Porque asesoramos, diseñamos, construimos, y acompañamos también a nuestros clientes más allá de la puesta en marcha. ¡Así marcamos la diferencia!

Factibilidad / Ingeniería / Presentación ante la SEC (instalador **clase 4**)



Fabricadas en:



Antorchas (Abiertas / Cerradas)

Abiertas (con llama visible) o cerradas (tipo incineradores), desde 1 a 6.000 m³/h, con encendido y control de llama automático, alarmas locales/remotas. Cumplen con la nueva Reglamentación chilena de Instalaciones de Biogás.

Sopladores (alimentación a calderas)



Los sopladores de biogás funcionan con una presión en salida de hasta 0,52 bar, y rango de caudales desde 10 hasta 1.200 m³/h. Acoplado a un variador de frecuencia, son ideales para alimentar una caldera, o una red de abastecimiento de biogás.



Accesorios de Seguridad (arresta llama, alivios presión/vacío)



Desde 1/2" hasta 32". Arresta llama concéntrica o excéntrica. Alivios de muy baja presión para proteger los digestores.



Los accesorios de seguridad protegen las instalaciones de biogás contra los colapsos por sobre presión o por vacío, pero también contra retorno de llama evitando el ingreso de una fuente de ignición hasta el digestor. Son requeridos por la nueva Reglamentación chilena de Instalaciones de Biogás.

Medidor multi-parámetros



Caudales disponibles 3 a 3.200 m³/h (Ø32 a 300mm)
Presión: 0 a 200 kPa / Temperatura: -10 a +40°C
Metano: 30 a 100%CH₄ (+/-5%)
IP65 / ExIIAT4 / RS485

Manómetros de muy baja presión

Manómetro inoxidable SS316 DIAL100mm, especiales para biogás con H₂S.
2 rangos disponibles:
✓ 0-40 mbar para digestores,
✓ 0-400 mbar en salida de sopladores (circuito a calderas).



www.asdconsultores.cl - info@asdconsultores.cl - +569 94192227



"Worldwide - with the precision of the original!"

AWITE & RITTER – empresas reconocidas no setor de biogás tornam-se ainda mais fortes como parceiras no Brasil

A qualidade sempre foi o foco da AWITE. Desde que foi fundada em 2001, a empresa produz sistemas de análise de gás e sistemas de automação da mais alta qualidade de acordo com as exigências individuais. Atualmente, mais de 2.500 sistemas de análise de gás e mais de 130 sistemas de automação foram instalados em inúmeros países do mundo. Com o novo sistema AwILAB, Awite oferece um equipamento de laboratório altamente sofisticado.

A empresa RITTER atua há mais de 65 anos com sucesso no setor de processamento de plásticos. Além de outros produtos, a RITTER produz micro medidores de gás volumétricos para medições de biogás assim como sistemas de biorreatores para testes batelada e ensaios de digestão anaeróbica em escala laboratorial para avaliação da fermentação de diferentes substratos.

Estas competências uniram AWITE e RITTER no Brasil para fornecer aos seus clientes sistemas ideais através de um ótimo atendimento.



AwILAB em escala piloto
sistema completo de digestão contínua - autônoma ou modular

BMP em escala laboratorial da RITTER
o sistema de biorreatores para testes batelada de potencial bioquímico de biogás com aquisição automática de dados em tempo real

Descubra o projeto BILAGAB: Tecnologia e conhecimento impulsionando o biogás no Brasil!
www.cursodebiogas.com.br

DIGESTÃO CONTÍNUA TOTALMENTE AUTOMATIZADA

TAXA DE ABSORÇÃO SUPERIOR A 99%

Awite Sistemas de Análise de Gases Ltda
Rua Dr. Luiz Piza 66 · CEP 19814-350, Centro Assis - SP - Brasil
TEL: +55 18 4101 0016 · Cel: +55 18 99777 0926
info@awite.com.br · www.awite.com.br

www.ritter.de

www.awite.com.br



encuentros RedBioLAC



México 2011 Instalación de sistema tubular pre-fabricado



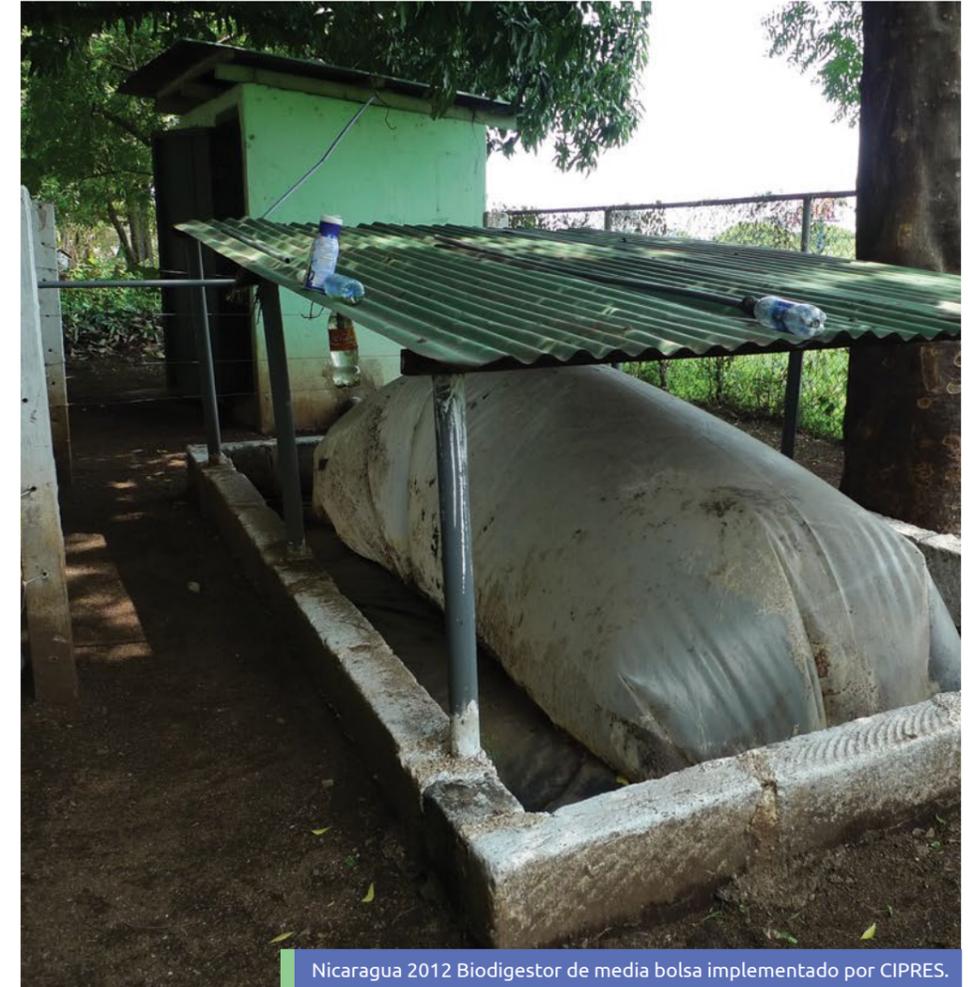
Perú 2009 Diálogo grupal en primeras actividades convocadas en Perú, y que dieron inicio a la red.



Costa Rica 2016 Gira técnica finca lechera en San José, biodigestores de PVC



Colombia 2014. Actividad práctica de armado e instalación de biodigestor tubular de polietileno.



Nicaragua 2012 Biodigestor de media bolsa implementado por CIPRES.



Honduras 2013. Visita de campo proyecto PREMACA Finca Avícola de Palma.

"Un mundo justo exento de pobreza"



Costa Rica 2010. Exposición y discusión del Dr. Raúl Botero.



Chile 2015. Visita a SERVINOR planta tratamiento aguas servidas y residuos industriales.



Argentina 2017. Visita PTAR de la ciudad de Buenos Aires.



Xº Encuentro RedBioLAC

Foz de Iguazú, Brasil 2018

*Promoviendo desarrollo territorial sostenible
e integración a través del biogás*

17 al 21 de Septiembre
Parque Tecnológico Itaipú



www.wisions.net



green empowerment

Village Solutions for Global Change