

Optimización de la producción de biogas a escala de laboratorio a partir de estiércol de bovino, lactosuero y totora (*Scirpus californicus*)

Optimization of biogas production at laboratory scale from bovine manure, lactosuero and totora (*Scirpus californicus*)

Miguel Barrera^{1*}, ^aOscar Gamarra¹, ^bManuel Milla¹, ^cThies Fellenberg¹ y ^dCarla Ordinola¹

RESUMEN

En Pomacochas se optimizó la producción de biogas a escala de laboratorio con estiércol de bovino, lactosuero y totora (*Scirpus californicus*). Se empleó el diseño estadístico de Box-Behnken con tres variables: relación estiércol: agua (1:5, 1:4, 1:3), lactosuero (% v/v: 2, 4, 6) y chips de totora (% p/v: 3, 6, 9). Se realizaron simultáneamente tres corridas de 15 experimentos durante 27 días. Los biodigestores de 12 L tenían 10 L de volumen de trabajo y el biogas se colectó por desplazamiento de agua en botellas de 1,5 L calibradas cada 100 mL. El mayor volumen de biogas producido fue de 1400 mL, empleando 1,7 y 2,5 L de estiércol (estiércol: agua de 1:3 y 1:5), con 400 y 200 mL de lactosuero (2 y 4% v/v), respectivamente. Si se reduce la cantidad de estiércol y se incrementa el volumen de lactosuero, se mantiene la producción de biogas, mientras que la totora no influye. Con Statgraphics se obtuvo un modelo con un R^2 de 0,9470 el cual permitió predecir un máximo de biogas de 1745,74 mL, valor ligeramente superior al obtenido experimentalmente con 1,7 L de estiércol, 282,942 mL de lactosuero y 186,829 g de chips de totora.

Palabras claves: Energías renovables, reducción de contaminación, biodigestor de laboratorio.

ABSTRACT

In Pomacochas the production at laboratory scale of biogas with manure bovine, whey and totora (*Scirpus californicus*) was optimized; using the statistical design of Box-Behnken with three variables: manure bovine:water (1: 5, 1: 4, 1: 3), whey (% v/v: 2, 4, 6) and totora chips (% p/v: 3, 6, 9). Three runs of 15 experiments were performed simultaneously for 27 days. The biodigesters of 12 L had 10 L of working volume and the biogas was collected by displacement of water in bottles of 1,5 L calibrated every 100 mL. The largest volume of biogas produced was 1400 mL, using 1.7 and 2.5 L of manure (manure: water 1:3 and 1:5), with 400 and 200 mL of whey (2 and 4% v/v), respectively. If the amount of manure is reduced and the volume of whey is increased, the production of biogas is maintained, while the totora did not influence. Statgraphics obtained a model with an R^2 of 0.9470 which allowed to predict a biogas maximum of 1745.74 mL, a value slightly higher than the one obtained experimentally, with: 1.7 L of manure, 282.942 mL of whey and 186.829 g of totora chips.

Keywords: Renewable energy, pollution reduction, laboratory biodigester.

¹Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM-A), Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Calle Higos Urco N° 342-350-356, Calle Universitaria N° 304, Chachapoyas, Perú

^aE-mail:ogamarra@indes-ces.edu.pe ^bE-mail:manuel.milla@untrm.edu.pe ^cE-mail:t.fellenbe@fnr.de ^dE-mail:cordinola@untrm.edu.pe

*Autor de correspondencia: E-mail:mbarrena@indes-ces.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

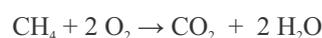
En la Región Amazonas, el distrito La Florida tiene 1131 ganaderos (Oliva *et al.*, 2015), siendo la ganadería la actividad económica principal en la cuenca ganadera. La Región Amazonas cuenta con ganado vacuno de leche, cuya producción total anual es de 57043 TM de leche fresca con un rendimiento promedio que varía entre 850 kg/vaca/año a 1080 kg/vaca/año (Dirección Regional Agraria Amazonas, 2009).

Los sistemas agropecuarios emiten significativamente a la atmósfera tres gases de efecto invernadero (GEI): metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O), que provocan el calentamiento de la superficie terrestre y destruyen la capa de ozono en la estratósfera. El metano tiene un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el CO₂, tiempo de vida en la atmósfera de 9 a 15 años y tasa anual de crecimiento del 7%. El metano procedente del suelo de los sistemas pecuarios se puede generar por la fermentación anaeróbica de la materia orgánica, deposición de excrementos en las pasturas, tratamientos anaeróbicos de los residuos animales y quema de biomasa (Silva *et al.*, 2013). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), el sector ganadero sería responsable del 9% de las emisiones globales de CO₂, del 35-40% de las de CH₄ y del 65% de las de N₂O (Steinfeld *et al.*, 2006).

La digestión anaeróbica de la materia orgánica por las arqueas produce CH₄, CO₂ y otros gases, que en conjunto se denomina biogas, fuente de energía renovable, constituido por 60 a 80% de CH₄, que puede emplearse como combustible para cocina y lámpara de camiseta en vez de combustibles fósiles. Es promisoría para mitigar las emisiones de GEI del estiércol recolectado, reduce los patógenos y el olor del estiércol. El efluente del biodigestor (bioabonos: biol y biosol) contiene nutrientes para las plantas y se puede aplicar directamente a los cultivos. Los biodigestores pequeños (6 a 10 m³) se promovieron en las décadas de 1970 y 1980 en Asia y América Latina para mejorar las condiciones sanitarias y proveer energía a viviendas unifamiliares, funcionando con el estiércol de muy

pocos animales (dos a cinco cerdos, cinco a diez vacas, 100 pollos, o una combinación de estos) junto con la basura orgánica de la vivienda. Asimismo contribuyen a reducir las emisiones de GEI entre un 23 y un 53% cuando se comparan con las viviendas sin biogas (Hristov, 2013).

El empleo del biogas como combustible para cocinas, lámparas o motores, permite reducir en 25 veces el poder del metano como gas de efecto invernadero, debido a que la combustión de una molécula de metano produce una molécula de dióxido de carbono:



El lactosuero o suero de leche es uno de los residuos más representativos de la industria lechera y uno de los contaminantes más severos que existen a nivel ambiental. Es el líquido remanente tras la precipitación y separación de la caseína de la leche durante la elaboración del queso, y constituye aproximadamente el 85% - 90% del volumen de la leche, cuyos componentes principales como la lactosa, calcio, sales minerales y proteínas lacto-séricas de bajo peso molecular solubles en su punto isoeléctrico, son retenidas en un 55% en el lactosuero, ya que no reaccionan con el cuajo (Sánchez *et al.*, 2009). Los productores de queso de Pomacochas emplean tecnología artesanal con procesos de transformación que se mantienen desde hace varios años, los cuales no incluyen el tratamiento de los efluentes antes de su disposición en el medio ambiente. Según Hernández (2015), el lactosuero es muy contaminante si se vierte sin tratamiento a cursos de agua o sobre el suelo debido a que posee una alta carga orgánica (véase Tabla 1), con un rango de demanda química de oxígeno de entre 40 y 80 kg/m³. El lactosuero sin tratar produce en los cuerpos de agua un desbalance del oxígeno disuelto que es consumido en la degradación de sus componentes orgánicos, y en el suelo puede descompensar el equilibrio de nutrientes.

Se puede producir entre 9 y 23 m³ de metano/m³ de lactosuero, lo que equivale a de 7 a 18 kg de gas licuado de petróleo. El lactosuero de queso puede ser degradado eficientemente en un proceso de una sola etapa cuando es combinado con residuos de bovinos y sin necesidad

de agregar correctores químicos de pH. Con una combinación del 50% de lactosuero y 50% de efluente proveniente de excretas de bovinos se han alcanzado buenos resultados de biodigestión (Hernández, 2015).

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica y bromatológica del suero sin tratamiento

| Análisis fisicoquímico | |
|-------------------------------|---------------|
| pH | 6,12 ± 0,01 |
| Densidad (g/mL) | 1,021 ± 0,020 |
| Análisis bromatológico | |
| Proteína (%) | 0,86 ± 0,04 |
| Grasa (% v/v) | 0,32 ± 0,03 |
| Cenizas (% p/p) | 0,61 ± 0,03 |

Fuente: Sánchez *et al.*, 2009.

En Colombia, una empresa quesera ubicada en San Pedro de los Milagros (Antioquia), produce aproximadamente 14400 toneladas de lactosuero/año, que es procesado en la planta de tratamiento de aguas. El residuo sólido resultante es utilizado en compostaje y la fase líquida se emplea como fertilizante en los pastos. La disposición de la fase líquida no es una solución económica ni ambiental, debido a la producción de malos olores por putrefacción y la muerte por asfixia de la fauna de los ecosistemas alrededor de los pastos tratados (Sánchez *et al.*, 2009).

En las orillas de la laguna de Pomacochas existe gran cantidad de totora (*Scirpus californicus*), que no se emplea en actividades productivas. Según Castañeda y Flores (2014), las plantas macrófitas como la totora son un tipo de vegetación acuática adheridas a los fondos de estanques y cuerpos de aguas, que sirven para depurar el agua mediante bacterias ubicadas en sus raíces, sedimentan los contaminantes y materia orgánica depurándola de forma totalmente ecológica y natural. Además, tienen otras posibilidades de aprovechamiento como alimento para ganado, peces y otros seres acuáticos o bien como fertilizante para suelos y cultivos. También tienen uso medicinal, en cosmetología, la producción de celulosa o, incluso, como fuente de producción de biogas.

II. MATERIAL Y METODOS

En la Estación Experimental de Pomacochas del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES) de la UNTRM-A, se realizó la investigación a escala de laboratorio para evaluar la producción de biogas a partir de estiércol de bovino y coleccionar el metano producto de su descomposición, lactosuero de las queserías artesanales que descargan en los cursos de agua y los contaminan, y chips de totora que abunda en las orillas de la laguna de Pomacochas para determinar su aporte a la producción de biogas. Las variables estudiadas con el diseño estadístico de Box-Behnken (Tabla 2) fueron: “relación estiércol-agua” (1:5, 1:4, 1:3), lactosuero (% v/v de lactosuero con respecto al volumen del biodigestor: 2, 4, 6) y chips de totora (% p/v de chips de totora con respecto al volumen de estiércol: 3, 6, 9); siendo la variable respuesta la producción de biogas (mL) (Figuras 1 a 4).

Tabla 2. Rango de las variables del diseño estadístico de Box-Behnken para producir biogas

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

Como biodigestores se emplearon bidones de polietileno de 12 litros con un volumen de trabajo de 10 litros. Para coleccionar el biogas se emplearon botellas de PET de 1,5 litros calibradas cada 100 mL. El valor de cada variable independiente se muestra en la Tabla 3. Se completó el volumen de la mezcla experimental a 10 litros con agua reposada.

Tabla 3. Valor de las variables de los experimentos en Pomacochas

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



Figura 1. Recolección y preparación de la totora en la picadora de pasto.



Figura 2. Preparación y carga de la mezcla estiércol:agua.



Figura 4. Soporte de las botellas colectoras de biogas y vista de los equipos experimentales.



Figura 3. Dosificación de los chips de totora y del suero de leche. Se completó el volumen de la mezcla experimental a 10 L con agua reposada.

III. RESULTADOS

Las tres corridas experimentales de 15 experimentos cada una (Figura 5), se realizaron en simultáneo para evitar distorsiones por condiciones climáticas. El

tiempo de evaluación fue de 27 días y los resultados se muestran en la Tabla 4, donde se aprecia que los experimentos 3 y 5 produjeron igual volumen de biogas (1400 mL) en el mismo tiempo (27 días).



Figura 5. Botellas colectoras de biogas de los biodigestores 8, 12 y 13.

Tabla 4. Resultados experimentales de producción de biogas a partir de estiércol de vacuno, lactosuero y chips de totora en Pomacochas

| N° experimento | Variables | | | Producción de biogas (mL) |
|----------------|---------------|-----------------|---------------------|---------------------------|
| | Estiércol (L) | Lactosuero (mL) | Chips de Totora (g) | |
| 1 | 1,7 | 200 | 120 | 0 |
| 2 | 1,7 | 600 | 120 | 600 |
| 3 | 2,5 | 200 | 120 | 1400 |
| 4 | 2,5 | 600 | 120 | 0 |
| 5 | 1,7 | 400 | 51 | 1400 |
| 6 | 1,7 | 400 | 225 | 1200 |
| 7 | 2,5 | 400 | 51 | 900 |
| 8 | 2,5 | 400 | 225 | 1250 |
| 9 | 2,0 | 200 | 51 | 600 |
| 10 | 2,0 | 200 | 225 | 1150 |
| 11 | 2,0 | 600 | 51 | 400 |
| 12 | 2,0 | 600 | 225 | 450 |
| 13 | 2,0 | 400 | 120 | 1300 |
| 14 | 2,0 | 400 | 120 | 1250 |
| 15 | 2,0 | 400 | 120 | 1300 |

Los valores de las variables y de la producción de biogas correspondiente a cada experimento mostrados en la Tabla 4 se procesaron con el software Statgraphics, con el que se obtuvo la ecuación de regresión ajustada a los datos, cuyos valores de las variables son especificados en sus unidades originales, con un R^2 de

0,9470.

Producción de biogas = $-4629,33 - 2908,47 \times \text{Estiércol} + 43,0531 \times \text{Suero} + 49,9619 \times \text{Totora} + 338,508 \times \text{Estiércol}^2 + 4,79227 \times \text{Estiércol} \times \text{Suero} + 6,47187 \times \text{Estiércol} \times \text{Totora} - 0,0444807 \times \text{Suero}^2 - 0,0700483 \times \text{Suero} \times \text{Totora} - 0,0633403 \times \text{Totora}^2$

La superficie de respuesta obtenida con el software Statgraphics, estimada en función de la ecuación de regresión, se muestra en la Figura 6.

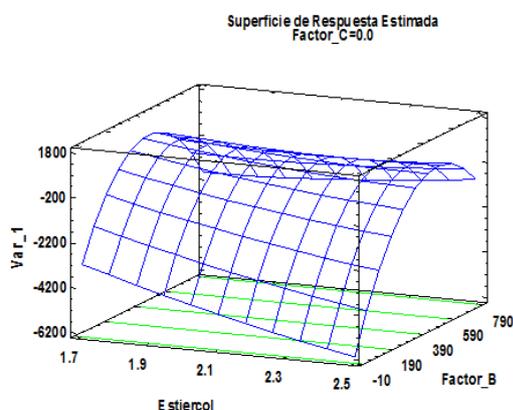


Figura 6. Superficie de respuesta estimada con el software Statgraphics en función de la ecuación de regresión.

Con el software Statgraphics se optimizó el valor de las variables para maximizar la producción de biogas en base a los resultados experimentales, obteniéndose los valores que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Respuesta optimizada para maximizar la producción de biogas. Valor óptimo = 1745,74 mL de biogás

| Factor | Inferior | Mayor | Óptimo |
|---------------------|----------|-------|---------|
| Estiércol (L) | 1,7 | 2,5 | 1,7 |
| Lactosuero (mL) | 200,0 | 600,0 | 282,942 |
| Chips de totora (g) | 51,0 | 225,0 | 186,829 |

IV. DISCUSIÓN

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

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

Con 400 mL de suero, si se mantiene constante el valor de estiércol en 1,7 L (valor bajo) y se incrementa en 4,4 veces la cantidad de totora (de 51 g a 225 g), se reduce la producción de biogas en 1,54 veces (Exp. 5 y 6).

Pero sucede lo contrario cuando se mantiene el estiércol en 2,5 L (valor alto) y se incrementa en la misma proporción la totora (Exp 7 y 8), la producción de biogas aumenta en 1,62 veces.

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

Si se mantiene constante el suero en su valor bajo o medio y la totora en cualquiera de sus valores, y se incrementa el estiércol, se produce más biogas (Exp. 1 y 3; 6 y 8). Sin embargo, rápidamente se detiene la producción de biogas cuando se emplea el valor alto de totora (225 g) asociado con el suero en valor medio (400 mL) (Exp. 6 y 8) o alto (600 mL) (Exp. 12).

La ecuación de regresión que describe la producción de biogas a partir de las variables estiércol de bovino, lactosuero y chips de totora tiene un coeficiente de determinación R^2 de 0,947, que indica que el 94,7% de los cambios observados en la producción de biogas son explicados por el modelo obtenido quedando el 5,30% restante sin explicación, lo que se traduce en un conjunto de factores que no fueron evaluados en esta investigación.

Al realizar la evaluación del comportamiento de cada una de las variables encontramos que los niveles de estiércol no presentan diferencias estadísticamente significativas con respecto a la producción de biogas, un resultado similar se obtuvo al analizar el factor chips de totora, que tampoco presentó diferencias estadísticamente significativas. Mientras que el factor lactosuero sí presentó diferencias estadísticamente significativas, lo que conduce a pensar que la producción de biogas está estrechamente ligada a los niveles de lactosuero.

V. CONCLUSIONES

La relación estiércol:agua de 1:5, asociada con 4% (v/v) de suero (4 mL de suero por cada 100 mL de mez-

cla en el biodigestor) y 3%(p/v) de totora (3 g de totora por cada 100 mL de estiércol) produce el mayor volumen de biogas (Exp 5), mientras que los experimentos con 600 mL de suero (valor alto) no producen biogas.

Los experimentos con 200 mL de suero (valor bajo) producen biogas si se asocian con el valor alto de estiércol y con el valor medio de totora (Exp. 3), o con el valor medio de estiércol y el valor alto de totora (Exp. 10).

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

El modelo matemático obtenido en la presente investigación es altamente significativo, por lo cual puede ser utilizado con fines de predicción de la producción de biogas. Así, los niveles de las variables estiércol de bovino, lactosuero y chips de totora que permiten optimizar la producción de biogas son: 1,7 L, 282,942 mL y 186,829 g, respectivamente, con los que se obtiene 1745,74 mL de biogas.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Castañeda, A.A. y H.E. Flores. “Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México”. *Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad*, 3(2014): 13-22.

Dirección Regional Agraria de Amazonas. “Plan Estratégico Regional Agrario de Amazonas 2009-2015”. Chachapoyas (Perú), 2009.

Hernández, F. “Producción de biogas con suero de queso: tratamiento y generación de energía renovable a partir de lactosuero”. Buenos Aires (Argentina), 2015.

Hristov, A.N., J. Oh, C. Lee, R. Meinen, F. Montes, T. Ott, J. Firkins, A. Rotz, C. Dell, A. Adesogan, W. Yang, J. Tricarico, E. Kebreab, G. Waghorn, J. Dijkstra y S. Oosting, S. “Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera – Una revisión de las opciones técnicas para la reducción de

las emisiones de gases diferentes al CO₂”. Roma (Italia), 2013.

Oliva, M., C. Oliva, D. Rojas, M. Oliva, y A. Morales. “Identificación botánica de especies nativas de pastos más importantes de las cuencas lecheras de Molinopampa, Pomacochas y Leymebamba, Amazonas, Perú”. *Scientia Agropecuaria*, 6(2015): 125-129.

Sánchez, G.L., M.J. Gil Garzón, M.A. Gil Garzón; F.J. Giraldo Rojas; L. Millán Cardona, y M.E. Villada Ramírez. “Aprovechamiento del suero lácteo de una empresa del norte antioqueño mediante microorganismos eficientes”. Antioquia (Colombia), 2009. Recuperado de <http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/Vol4n2/65-74.pdf>

Silva, A., A. Gomez, B. Landazury, y B. Preciado. “Evaluación de gases de efecto invernadero (GEI) en sistemas ganaderos asociados con pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoechst Ex Chiov)”. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 6(2013): 36-43.

Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales y D.E. Haan Cees. “La larga sombra del ganado. Problemas ambientales y opciones”. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma (Italia), 2006.