

Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas

Biogas, renewable energy for the development of pig farms in the state of Chiapas

(Recibido: 11/junio/2018-Aceptado: 10/octubre/2018)

*José Apolonio Venegas Venegas**
*Deb Raj Aryal**
*René Pinto Ruíz***

Resumen

La generación de energía a base de combustibles fósiles, así como el metano (CH₄) generado en la actividad pecuaria ocasionan severos daños al ambiente. El aprovechamiento de estiércol de cerdo para generar energía renovable y revertir problemas de contaminación es una alternativa viable para que granjas porcícolas de Chiapas sean más competitivas. Se identificaron 39 granjas tecnificadas distribuidas en 14 municipios en el estado y con las metodologías de Chen, United States Environmental Protection Agency (USEPA) y United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) se estimó el potencial de biogás, energía eléctrica y reducción de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq). Por otra

*CONACYT-UNACH. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad Autónoma de Chiapas. México. javenegasve@conacyt.mx; drajar@conacyt.mx.

**Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad Autónoma de Chiapas. México. pinto_ruiz@yahoo.com.mx.

parte se realizó una evaluación financiera para sistema biodigestor-motogenerador con la metodología de Baca sobre proyectos de inversión para dos tamaños propuestos, de 500 y 1,000 cerdos; los indicadores financieros como Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Beneficio-Costo (B/C) para los dos tamaños evaluados resultaron económicamente rentables.

Palabras clave: Granja porcícola, biogás, energía renovable, energía eléctrica.

Clave JEL: O13.

Abstract

The generation of energy based on fossil fuels, as well as the methane (CH₄) generated in livestock activity cause severe damage to the environment. The use of pig manure to generate renewable energy and revert contamination problems is a viable alternative for the Chiapas pig farms to be more competitive. A total of 39 technified pig farms distributed in 14 municipalities in the state of Chiapas were identified and with the methodologies of Chen, the United States Environmental Protection Agency (USEPA) and the United Nations Convention on Climate Change (UNFCCC) was estimated the potential of biogas, electric power and reduction of carbon dioxide equivalent (CO₂eq). On the other hand, a financial evaluation was carried out for the biodigestor-motogenerator system with the Baca methodology on investment projects for two proposed sizes, of 500 and 1000 pigs; Financial indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and Benefit-Cost (B/C) for the two sizes evaluated were economically profitable.

Keywords: Pig farm, biogas, renewable energy, electric power.

JEL Classification: O13.

Introducción

El artículo “Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas” está estructurado de la siguiente forma: objetivo de la investigación; hipótesis; descripción de las consecuencias de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de origen antropogénico, donde se describe el problema que ocasiona la contaminación ambiental; un apartado sobre la alternativa para la generación de energía limpia en la actividad pecuaria, en el cual se presenta un panorama de la energía de la biomasa, la importancia del biogás y biodigestores, así como el aprovechamiento del metano en la actualidad; los materiales y métodos; los resultados sobre los municipios más importantes en la actividad porcícola con

granjas tecnificadas que tienen potencial de generación de energía renovable; además de la evaluación financiera del sistema biodigestor-motogenerador de los tamaños de granja más representativos de Chiapas; y conclusiones.

Debido a los actuales problemas de contaminación ambiental por el uso de energía derivada de combustibles de origen fósil para generar electricidad; así como de la contaminación provocada y baja rentabilidad de la actividad pecuaria en Chiapas. El objetivo de este estudio fue el de identificar los municipios más importantes con granjas porcícolas tecnificadas, para calcular el potencial de biogás, energía eléctrica y reducción de dióxido de carbono equivalente con el uso de biodigestores; así como realizar una evaluación financiera para los tamaños de granja más representativos para la entidad con sistema biodigestor-motogenerador. Bajo este contexto se plantea la siguiente hipótesis: Existen granjas porcícolas tecnificadas en Chiapas con potencial para generar biogás, energía eléctrica y reducción de dióxido de carbono equivalente por manejo de estiércol y la implementación del sistema biodigestor-motogenerador es viable en términos económicos.

1. Consecuencias de la emisión de gases de efecto invernadero de origen antropogénico

1.1 El problema que ocasiona la contaminación ambiental

En México, las emisiones totales de GEI en 2013 fueron de 665,309.92 Gigagramos (Gg) de dióxido de carbono equivalente, la generación de electricidad contribuye con el 19%, mientras que el sector agropecuario con el 12.0%, de los cuales el 68.1% corresponden a emisiones de metano y 31.4% a óxido nitroso (N₂O) (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2015:68). Desde 1990, las emisiones de gases de efecto invernadero del sector de energía eléctrica en todo el mundo han aumentado a una tasa anual del 2.7%, por el uso intensivo de combustibles fósiles (International Energy Agency [IEA], 2013:190; Secretaría de Energía [SENER], 2015a:38; Grande and Islas, 2017:99). En México es la misma tendencia, el parque eléctrico nacional está compuesto principalmente de tecnologías que generan con combustibles fósiles (Ramos y Montenegro, 2012:207; INECC y SEMARNAT, 2015:22). Chiapas en el año 2005 emitió 28,161,080 toneladas de dióxido de carbono equivalente, el principal sector emisor es el de Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura (US-CUSS) con un 57%, agricultura (incluyendo ganadería) con 19% y sector energético con el 15%. En el periodo 1990 a 2009, las emisiones de GEI en el sector Agrícola fueron de 5,392 Gg de dióxido de carbono equivalente, principalmente de ganadería

bovina y fertilización de los suelos agrícolas (Programa de Acción Ante el Cambio Climático del estado de Chiapas [PACCCH], 2011:59). Por otra parte las emisiones de metano por el manejo de estiércol se incrementaron a partir del año 2000 y presentan una tendencia al aumento, los bovinos de carne son los que emiten la mayor cantidad de metano, seguidos de bovinos de leche y porcinos (PACCCH, 2010:61). Las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, han aumentado desde 1750 debido a la actividad humana, ocasionando el calentamiento global y el cambio climático. De la Mora, *et al.* (2016:2523) calcularon los índices de cambio climático en el estado de Chiapas en el periodo 1960-2009 y concluyeron que en las últimas tres décadas los periodos cálidos han sido superiores a los valores promedio. A nivel global, en las décadas recientes, las modificaciones en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos (Zamora, 2015:4). El cambio climático se manifiesta con prolongadas precipitaciones, aumento de la temperatura, períodos largos de sequía, cambio de dirección de los vientos, deshielo en los polos, cambios en las migraciones de los animales, tormentas, ciclones, maremotos y aumento del nivel del mar (Díaz, 2012:237).

2. Alternativa para la generación de energía limpia en la actividad pecuaria

2.1 Panorama general de la energía de la biomasa

Actualmente casi la totalidad de la energía es proporcionada por fuentes fósiles que incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo al calentamiento global y cambio climático, estas emisiones se pueden reducir con el uso de energía renovable (Rivas *et al.*, 2012:872). A nivel mundial existe una capacidad instalada de 100,879 Megawatts (MW) para generar energía eléctrica por medio de biomasa, donde Estados Unidos, Brasil, China y Alemania concentran el 48% del total mundial (Secretaría de Economía [SE], 2016:6). Creutzig *et al.* (2015:916) estimaron que el potencial energético de la biomasa con fines energéticos se sitúa entre los 100 y 300 Exajoules año⁻¹ y de acuerdo con Dermibas (2008:2106) la energía de la biomasa contribuirá con la mitad de la energía demandada en países en desarrollo en 2050. A principios de 2015, México contó con 16,665 Megawatts de capacidad instalada de generación eléctrica basada en energías renovables, donde la bioenergía tenía una capacidad instalada en operación de 647 Megawatts, de los cuales 586 MW provenientes de bagazo de caña y 61 MW de biogás (SE, 2016:13-24). La energía de biomasa tiene un potencial de 2635 a 3771 Petajoules (PJ) año⁻¹, donde el potencial para biogás es de (35 a 305 PJ año⁻¹) en residuos municipales y

de (148-190 PJ año⁻¹) en residuos ganaderos, sin embargo, el potencial de este tipo de energía no se ha explotado en su totalidad (Alemán *et al.*, 2014:140; García y Masera, 2016:18).

2.2 Importancia del biogás y de los biodigestores

La alternativa de energía limpia para la actividad pecuaria es el biogás por medio de biodigestores, su generación por medio de desechos orgánicos proporciona energía de bajo costo, ingresos adicionales a los agricultores, oportunidades de empleo, energía descentralizada y protección al ambiente, reduciendo la huella de emisiones de gases de efecto invernadero (Rivas *et al.*, 2010:39; Ngumah *et al.*, 2013:111). Existen diversos tipos de biodigestores; los diseños de pequeña capacidad más comunes son el tipo hindú, tipo chino y de polietileno tipo salchicha (Rivas *et al.*, 2012:875). En unidades de producción de mediana y gran escala los biodigestores comerciales utilizados son Complete Mix Digester, Fixed Film Digester, Plug Flow Digester y Covered Lagoon (USEPA, 2004). En México para granjas de actividad empresarial los biodigestores que se han implementado son los de tipo laguna. Su principal ventaja es su bajo costo y un diseño de construcción bastante simple, el biogás producido por estos biodigestores ha sido utilizado para alimentar calderas y generar electricidad (United States Department of Agriculture [USDA], 2007:9).

Actualmente, China es acreditado por tener el mayor programa de biogás en el mundo, con más de 20 millones de plantas (Tatlidil *et al.*, 2009). Le sigue India con 4.3 millones (SENER, 2012:43). En tercer lugar Alemania con más de 7,000 plantas (Foreest, 2012:21); y los Estados Unidos con más de 2,000 (USDA, 2014:26). En Sudamérica se han desarrollado biodigestores familiares de bajo costo en países como Cuba, Colombia y Brasil (Martí, 2008:15). Para el caso de México el primer digester fue construido en 1987, mientras que en 1993 había 19 (Monroy *et al.*, 1998:14). Ya para el año 2010 existían 721 biodigestores (Fideicomiso de Riesgo Compartido [FIRCO], 2011:19); en la actualidad hay alrededor de 966 sistemas de biodigestión (Weber *et al.*, 2012:36).

2.3 Aprovechamiento del metano en la actualidad

Para el aprovechamiento del metano, el proceso inicia con el depósito del estiércol en el biodigestor, que es mezclado con agua y en donde se genera el proceso de fermentación anaeróbica (metanogénesis) produciendo el biogás (FIRCO, 2007:5). Sin un sistema de compresión la utilización del biogás es restringida al local donde se produce, generación de calor mediante combustión y generación de electricidad; ya

el biogás filtrado y comprimido tiene diversas aplicaciones como el almacenamiento en cilindros, en la industria, integración en la red de gas natural y combustible para vehículos. En la actualidad las aplicaciones más comunes del biogás son la combustión directa para la producción de calor y la generación de energía eléctrica (Unión Europea [UE], 2010:127; Salvi *et al.*, 2012:58; Rutz & Janssen, 2008 117:119; Souza *et al.*, 2012:13). Sin embargo, actualmente existen desafíos y barreras a superar, se deben desarrollar soluciones para la producción, almacenamiento y utilización de biogás a escala local y regional (García y Macera, 2016:60).

En 2006 el FIRCO comenzó a promover la generación de energía eléctrica con biogás por medio de motogeneradores en Sonora, Jalisco y Nuevo León (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2007:5). El programa de FIRCO ha tenido resultados importantes. De 2008 a 2012, la SAGARPA apoyó la adquisición de 137 motogeneradores a partir de biogás, para generar energía eléctrica y térmica la cual es utilizada para diversos fines productivos dentro de las explotaciones agropecuarias (SENER, 2012:86). De acuerdo con Souza *et al.* (2012:14) con un sistema de generación de energía eléctrica con biogás, el generador sustituye el abastecimiento de energía de las concesionarias. La electricidad generada con biogás puede ser inyectada a la red de Comisión Federal de Electricidad (CFE) y participar en el intercambio energético local (Martínez, 2015:113). En 2012, la Comisión Reguladora de Energía (CRE) expidió las reglas generales de interconexión al sistema eléctrico nacional para generadores o permisionarios con fuentes de energía renovables (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2012). Solo se podrán conectar al Sistema, las instalaciones de Generadores o Permisionarios con Fuentes de Energías Renovables que cuenten con su respectivo contrato de interconexión (DOF, 2012).

3. Metodología

Para identificar el número de granjas porcícolas tecnificadas y municipios con potencial para implementar sistema biodigestor-motogenerador, se empleó información secundaria del Comité Sistema Producto porcino del estado de Chiapas (2013).

Para calcular la producción de metano se consideró la fórmula de Chen (1983), quien la desarrolló en base al modelo de Contois (1959).

$$V_{CH_4} = B_0SV \left[1 - \frac{K}{\mu_m \theta - 1 + K} \right]$$

Donde V_{CH_4} es el Volumen de metano producido en el biodigestor (m^3 día⁻¹); B_0 es el potencial de producción de metano (m^3 CH₄ kg⁻¹ de SV) acorde con lo establecido por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006) del capítulo 10, volumen 4; SV sólidos volátiles (kg materia seca animal⁻¹ día⁻¹); θ es el tiempo de retención hidráulico de acuerdo a especificaciones de Lagrange (1979); la tasa de producción del metano se calculó con el parámetro cinético K, con base en la fórmula de Hashimoto (1984). μ_m representa la tasa máxima de crecimiento específico por día, se determinó por la fórmula de Hashimoto *et al.* (1981).

Una vez estimado el metano, se calculó el potencial de generación de electricidad, tomándose en cuenta la fórmula propuesta por USEPA (2006:12). La metodología de USDA (1996) propone la producción estimada de energía en Unidades Térmicas Británicas (BTU), por lo que dicha fórmula hace la conversión a Kilowatts.

$$KWh/yr=CH_4*1.010 \text{ Btu}/ft^3 \text{ CH}_4 *KWh/3413 \text{ Btu} * 0.25 * 0.9$$

Donde kWh año⁻¹ representa Kilowatt-hora al año; metano (CH₄); contenido de Unidades Térmicas Británicas (BTU) en el metano cuyo valor es 1010 (ft³)⁻¹; eficiencia de la conversión de metano a electricidad igual a 0.25; y eficiencia en línea con un valor de 0.9.

Para evaluar el impacto ambiental, se determinó la línea base la cual, es el escenario del grado contaminante de las unidades de producción antes de la implementación de biodigestores, expresada en t CO₂eq y el escenario potencial de reducción de emisiones que se puede alcanzar al emplear dicha tecnología renovable. Se utilizó la metodología establecida por la UNFCCC (2013), considerando los valores establecidos por el IPCC (2006) del capítulo 10, volumen 4, dependiendo del tipo de población animal.

Se realizó una propuesta para un tamaño de granja de 500 cerdos con biodigestor tipo laguna de 670 m³ y motogenerador de 10 kWh; y un biodigestor de 1,450 m³ con motogenerador de 30 kWh para un tamaño de granja de 1,000 cerdos. El análisis de factibilidad financiera se realizó con base en la metodología de evaluación de proyectos de Baca (2013), donde se analizaron indicadores como Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno y Relación Beneficio Costo, considerando una tasa de descuento de 13.3%.

El Valor Actual Neto se determina por la diferencia entre la sumatoria de valores de la corriente de beneficios menos la del valor actual de la corriente de costos. Para estimar el valor actual de ambos flujos se utiliza una tasa de actualización previamente determinada (Gittinger, 1983).

$$VAN = \sum_{t=1}^T Bt(1+r)^{-t} - \sum_{t=1}^T Ct(1+r)^{-t}$$

Donde: B_t = Beneficio anual del proyecto; C_t = Costo anual del proyecto; $(1+r)^{-t}$ = Factor de actualización; t = Período de capitalización (tiempo); T = Número de años de vida útil del proyecto.

El VAN expresa los beneficios netos totales que se recibirán durante la vida útil del proyecto, su valor cuantitativo nos indica lo siguiente: $VAN > 0$, la inversión producirá ganancias; $VAN = 0$, la inversión no producirá ni ganancias ni pérdidas; $VAN < 0$, la inversión producirá pérdidas.

La Tasa Interna de Retorno, mide la rentabilidad promedio que tiene un determinado proyecto. Gup (1982), define que es aquella tasa de actualización que hace que el valor actualizado de la sumatoria de la corriente de beneficios se iguale a la sumatoria del valor actualizado de la corriente de costos.

$$TIR = \sum_{t=1}^T Bt(1+r)^{-t} - \sum_{t=1}^T Ct(1+r)^{-t} = 0$$

El criterio de decisión al aplicar la TIR es el siguiente: Si la TIR es mayor que la tasa de descuento, es conveniente ejecutar el proyecto; Si la TIR es igual que la tasa de descuento, es indiferente ejecutar el proyecto; si la TIR es menor que la tasa de descuento, no es conveniente ejecutar el proyecto.

Relación Beneficio-Costo. Es el cociente que resulta de la sumatoria del valor actual de la corriente de beneficios y la sumatoria del valor actual de la corriente de costos. Para estimar el valor actual de ambos flujos, se considera una tasa de actualización previamente determinada (Gittinger, 1983).

$$B/C = \sum_{t=1}^T Bt(1+r)^{-t} / \sum_{t=1}^T Ct(1+r)^{-t}$$

El valor cuantitativo de la relación beneficio-costo indica que: Si $B/C > 1$, los ingresos son mayores que los egresos, entonces el proyecto es aceptable; si $B/C = 1$, los ingresos son iguales que los egresos, entonces es indiferente llevar a cabo el proyecto; si $B/C < 1$, los ingresos son menores que los egresos, entonces el proyecto no se acepta.

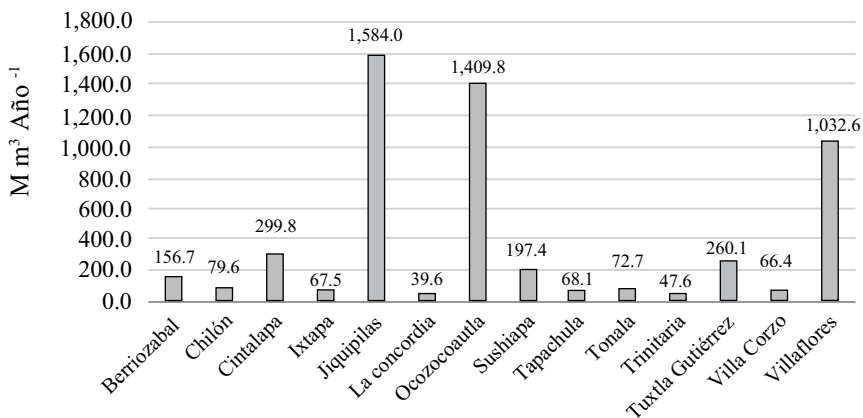
4. Resultados y discusión

4.1 Potencial de generación de biogás en granjas tecnificadas de Chiapas

Chiapas carece de información detallada sobre el número de granjas de traspatio y tecnificadas. Con información secundaria del Comité Sistema Producto de Chiapas se identificaron 53 granjas tecnificadas en la entidad con un total de 71,726 cerdos. Se seleccionaron 39 granjas que tuvieran más de 400 cerdos, dichas granjas se distribuyen en 14 municipios que tienen granjas porcinas tecnificadas con potencial de implementación de biodigestores y motogeneradores.

Los resultados que se presentan para potencial de biogás, potencial de generación de energía eléctrica y potencial de reducción de dióxido de carbono equivalente fue considerando el número de granjas y total de cerdos por municipio. En solo tres municipios Jiquipilas, Ocozocoautla y Villaflores se concentra el 75% del total de potencial de generación de biogás, debido a que cuentan con 19 de 39 granjas con potencial en la entidad. El total de granjas con potencial en el estado cuentan con 68,156 cerdos, con la materia orgánica generada, se tendría un potencial de generación de 5,381,925 m³ de biogás año⁻¹ (Gráfica 1). La estimación realizada para el potencial de biogás en granjas porcinas de Chiapas es de 0.21 m³ día⁻¹ por cerdo.

Gráfica 1
Potencial de biogás en granjas porcícolas tecnificadas de Chiapas

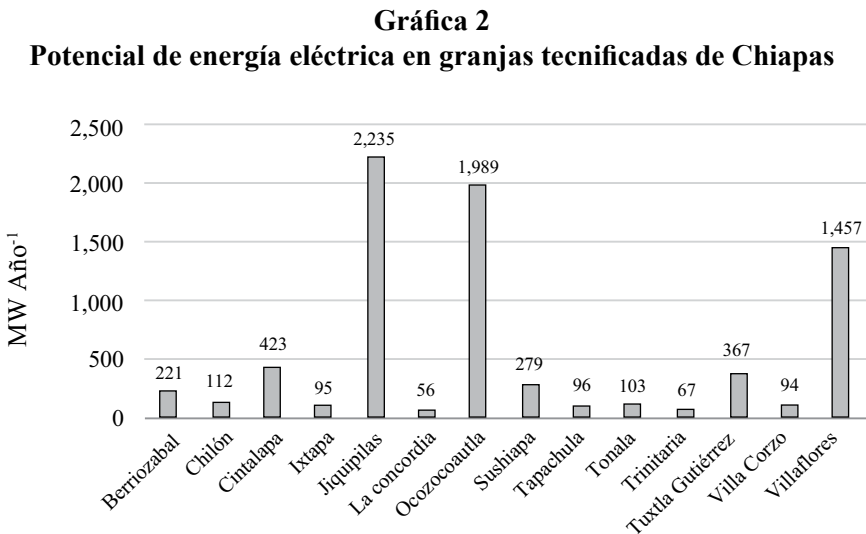


Fuente: Elaboración propia con base en fórmulas de Chen (1983), Hashimoto (1984) y Hashimoto *et al.* (1981). Considerando una concentración de CH₄ del 60% en la composición del biogás.

El biogás está siendo utilizado alrededor del mundo ya sea directamente como energía calórica o con el empleo de un motogenerador, se produce energía eléctrica. Venegas *et al.* (2013:110) estimaron que la producción de biogás de un cerdo era de $0.22 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ en el estado de Veracruz. Santos (2000) señala que un cerdo en fase de terminación produce $0.79 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ en Portugal. Martínez (2007) calculó la generación de biogás por cerdo de $0.14 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ en Cuba.

4.2 Potencial de generación de energía eléctrica en granjas tecnificadas de Chiapas

Con el metano estimado para las 39 granjas, se calculó un potencial de generación de 7,593 Megawatts de energía eléctrica por año para los 14 municipios con granjas de cerdos tecnificadas (Gráfica 2).



Fuente: Elaboración propia con base en la fórmula de USEPA (2006).

Con base en la metodología utilizada, la estimación fue de 2.4 kW por metro cúbico de metano. Casas *et al.* (2009: 753) calcularon el potencial de generación de energía eléctrica en establos lecheros en Delicias, sus estimaciones fueron de 2.3 kW por m^3 . Venegas *et al.* (2017:737) calcularon un potencial de 2.4 kW por m^3 para granjas porcinas en Puebla. Vera *et al.* (2014:433) calcularon 2.85 kW

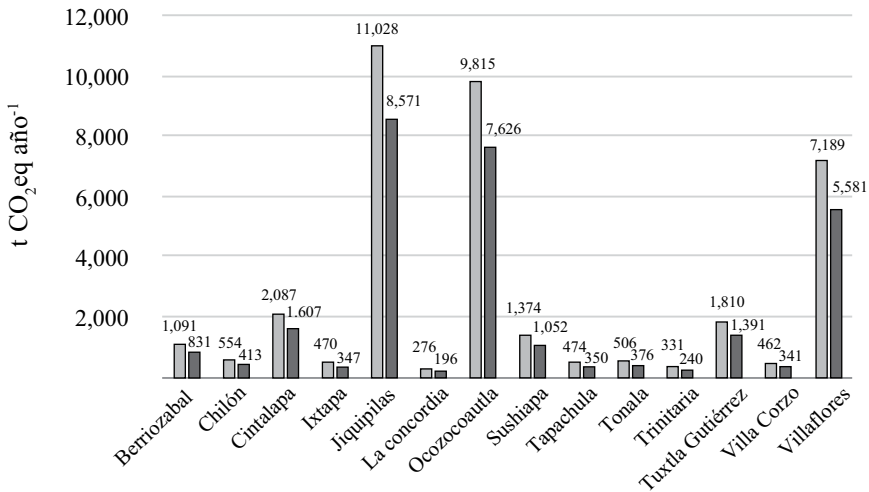
por m³ en ganado vacuno y porcino en la región Ciénega en el estado de Michoacán. El consumo de electricidad per cápita en México aumentó 1.5% respecto al 2013, al ubicarse en 2,015.28 kilowatts-hora (KWh) en 2014 (SENER, 2015b:22). Tomando de referencia dicho valor, las 39 granjas tendrían un potencial para cubrir el consumo de 3,768 personas. Sin embargo el objetivo de la implementación de sistemas de biodigestor-motogenerador, es que las unidades de producción sean autosuficientes en energía calórica o eléctrica.

4.3 Línea base y potencial de reducción de emisiones dióxido de carbono equivalente en granjas tecnificadas en Chiapas

La producción del biogás se ha posicionado como energía que no solamente genera un recurso de energía renovable sino también que recicla desperdicio (Salvi *et al.*, 2012:57).

En los 14 municipios que concentran las 39 granjas, se tendría una línea base de 37,469 toneladas de dióxido de carbono equivalente al año por emisión de estiércol (Gráfica 3).

Gráfica 3
Línea base y potencial de reducción de emisiones de granjas tecnificadas de Chiapas



Fuente: Elaboración propia con base en la metodología ACM0010 (UNFCCC, 2013).

Por otra parte con la incorporación de energía renovable, en concreto con el uso de biodigestores para generar biogás, las granjas tecnificadas de Chiapas tendrían un potencial de reducción de 29,167 toneladas de dióxido de carbono equivalente por año.

El cuidado del ambiente toma mayor importancia cada día y la producción de biogás por medio de biodigestores (Coss *et al.*, 2015:1). El desarrollo de estrategias limpias y eficientes para la generación de energía, es uno de los retos actuales más importantes para la sociedad (Díaz, 2016: 559).

4.4 Análisis financiero

Un estudio financiero demuestra la viabilidad de convertir metano a electricidad como parte del manejo de granjas porcinas autosuficientes, además ayuda a los productores a tomar la decisión de incorporar en sus granjas un motogenerador para producir electricidad (Cervi *et al.*, 2011:3; Escalera *et al.*, 2014:326).

En el cuadro 1 se presentan las frecuencias por rango de tamaño de granjas, donde las más representativas están entre un rango menor a 1,000 con un 38% y en segundo lugar granjas que se encuentran en un rango de entre 1,000 y 2,000 cerdos.

Cuadro 1
Frecuencias de granjas porcícolas tecnificadas en Chiapas

<i>Intervalo</i>	<i>Frecuencia (f_i)</i>	<i>Frecuencia relativa (p_i)</i>
(0, 1,000]	15	0.38
(1,000, 2,000]	14	0.36
(2,000, 3,000]	8	0.21
(10,000, 11,000]	2	0.05
Total	39	1.00

Fuente: Elaboración propia con datos del Comité Sistema Producto Porcino de Chiapas (2013).

El promedio de cerdos para la frecuencia mayor es de 652 y de la segunda frecuencia más representativa es de 1,194 cerdos, por tal razón se hace la propuesta de análisis financiero de inversión para dos tamaños de granja 500 y 1,000 cerdos con sistema biodigestor-motogenerador.

Venegas (2014) estimó el costo por kilowatt en granjas tecnificadas en Puebla antes de instalar un biodigestor tipo laguna y motogenerador, la estimación fue en base a sus recibos de la CFE, la tarifa para la zona sur de México es la OM la cual se le suma el cargo por kilowatt de demanda máxima de cada granja. Se consideró un precio promedio de \$2.3 kW, por lo que es el precio considerado para obtener el ingreso por ahorro de electricidad. Además se consideró como ingreso la venta por biofertilizante, de acuerdo con Venegas (2014), una granja de 500 cerdos produce 6 toneladas y una de 1,000 produce 12 toneladas. No existen precios estandarizados por biofertilizante por lo que se consideró un precio promedio con productores en la zona centro de México de \$900 por tonelada.

En el cuadro 2 se presentan los egresos, ingresos y flujo de fondos para sistema biodigestor-motogenerador para dos tamaños propuestos en un horizonte de 10 años.

Cuadro 2
Egresos, ingresos y flujo de fondos actualizado (Pesos)

Años	Tamaño de granja de 500 cerdos				Tamaño de granja de 1,000 cerdos			
	Egresos	Ingresos	FA (13.3%)	Flujo de fondos actualizado	Egresos	Ingresos	FA (13.3%)	Flujo de fondos actualizado
0	699,971	0	1	-699,971	1,274,848		1.00	-1,274,848
1	28,423	154,032	0.88	110,864	53,943	316,987	0.88	232,166
2	28,423	154,032	0.78	97,850	53,943	316,987	0.78	204,913
3	28,423	154,032	0.69	86,364	53,943	316,987	0.69	180,858
4	28,423	154,032	0.61	76,226	53,943	316,987	0.61	159,628
5	28,423	154,032	0.54	67,278	53,943	316,987	0.54	140,890
6	28,423	154,032	0.47	59,380	53,943	316,987	0.47	124,351
7	28,423	154,032	0.42	52,410	53,943	316,987	0.42	109,754
8	28,423	154,032	0.37	46,258	53,943	316,987	0.37	96,870
9	28,423	154,032	0.33	40,827	53,943	316,987	0.33	85,499
10	28,423	270,003	0.29	69,305	53,943	658,951	0.29	173,565

FA: Factor de actualización.

Fuente: Elaboración Propia.

El análisis financiero mostró que en un escenario de diez años, los tres indicadores financieros calculados demuestran que la inversión en sistemas digestor-

motogenerador es rentable para los dos tamaños de granja tecnificadas propuestos para Chiapas. La Tasa Interna de Retorno es mayor que la tasa de descuento del 13.3% y el VAN tiene resultados favorables ($VAN > 0$). Además, el indicador Beneficio/Costo tiene resultados positivos ($B / C > 1$) ver cuadro 3.

Cuadro 3
Análisis financiero para tamaño de granja propuesto
de 500 y 1,000 cerdos

<i>Tamaño de granja</i>	<i>Biogás m³</i>	<i>Energía Eléctrica del motogenerador kW Año⁻¹</i>	<i>VAN</i>	<i>TIR</i>	<i>B/C</i>
500	39,482	40,560	\$6,791	14%	1.01
1,000	78,965	85,176	\$233,644	17%	1.15

Fuente: Elaboración propia.

Escalera *et al.* (2014:334-336) evaluaron proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) de granjas porcinas en México, evaluaron un motogenerador de 60 kWh y obtuvieron indicadores financieros muy altos, TIR con valores entre 30.34 y 171.91%, considerando una tasa de actualización del 12% y B/C de entre 3.06 y 11.35. FIRCO realizó la evaluación para el mismo motogenerador y tasa de actualización, calculó una TIR de 66.3%, VAN de \$1,149,976 y B/C de 4.4 (SAGARPA, 2007:31).

Venegas *et al.* (2013:123) evaluaron sistemas biodigestor-motogenerador para una granja porcina de 2,000 cerdos para el mismo motogenerador de 60 kWh, obtuvieron una TIR de 21.6% y un VAN de \$592,665. De igual forma FIRCO calculó la factibilidad financiera del sistema biodigestor-motogenerador para un tamaño de granja porcina de entre 1,000 y 2,500 cerdos, considerando una tasa de actualización del 12% obtuvo una VAN de \$195,612, TIR de 14.7% y B/C de 1.5 (SAGARPA, 2007:33).

La creciente demanda de energía a nivel mundial a base de combustibles de origen fósil ha ocasionado severos daños al ambiente, el aprovechamiento de las excretas de ganado bovino y porcino para la generación de biogás y obtención de energía eléctrica, es una opción de energía renovable que resulta ser altamente atractiva en cuanto al ahorro que se puede obtener en la factura de la Comisión Federal de Electricidad para las unidades de producción (Vera *et al.*, 2014; Venegas *et al.*, 2017).

Conclusiones

En Chiapas se identificaron catorce municipios importantes en la producción de cerdos, existen 53 granjas porcícolas tecnificadas, de las cuales 39 tienen potencial para aprovechar sus desechos y generar energía limpia.

Con el empleo de biodigestores en granjas porcícolas es posible la generación de energía limpia, en los catorce municipios que cuentan con granjas porcícolas tecnificadas existe un potencial de 5,381,925 m³ de biogás por año, donde el potencial por cerdo es de 0.21 m³ por día.

Con el metano estimado para las 39 granjas, se calculó un potencial de generación de 7,593 Megawatts de energía eléctrica por año para los 14 municipios con granjas de cerdos tecnificadas, la cual podría abastecer la demanda de energía en las unidades de producción. Con base a la metodología utilizada el potencial de las granjas es de 2.4 kW por metro cúbico de metano.

Los problemas de contaminación y de salud pública han etiquetado por mucho tiempo la actividad de las granjas porcícolas, sin embargo dichos problemas se pueden revertir con el empleo de biodigestores. Se calculó una línea base de 37,469 toneladas de dióxido de carbono equivalente por manejo de estiércol. Por otra parte, con la incorporación de energía renovable, en concreto con el uso de biodigestores para generar biogás, las granjas tecnificadas de Chiapas tendrían un potencial de reducción de 29,167 toneladas de dióxido de carbono equivalente por año.

Se evaluaron dos tamaños de granja propuestos para Chiapas, los cuales son los más representativos. Los tamaños propuestos son de 500 y 1,000 cerdos, el análisis financiero resultó favorable para los dos tamaños ya que los dos tamaños propuestos tuvieron un VAN mayor a cero, lo cual indica que el proyecto obtendrá ganancias, los dos tamaños propuestos tuvieron una TIR superior a la tasa de actualización, por otra parte los dos tamaños obtuvieron una relación B/C mayor a uno que es el criterio de aceptación.

Referencias

- Alemán, N. G. S., Casiano, F. V. H., Cárdenas, C. D. L., Díaz, C. R., Scarlat, N., Mahlknecht, J., Dallemand, J. F. & Parra, R. (2014). "Renewable energy research progress in Mexico: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 140–153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.004>
- Baca, U. G. (2013). *Evaluación de Proyectos*. (7a ed.), México D. F.: McGraw-Hill.
- Casas, P. M. Á., Rivas, L. B. A., Soto, Z. M., Segovia, L. A., Morales, M. H.A., Cuevas, González. M. I. y Keissling, D. C. M. (2009). "Estudio de factibilidad

para la puesta en marcha de los digestores anaeróbicos en establos lecheros en la cuenca de Delicias, Chihuahua”, *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. XIII, núm. 024, pp. 745-756.

- Cervi, G. R., Esperancini, T. S. M. y Bueno, C. O. (2011). “Viabilidad económica de la utilización de biogás para la conversión en energía eléctrica”, *Información Tecnológica*, vol. 22, núm. 4, pp. 3-14. doi: 10.4067/S0718-07642011000400002
- Chen, Y. R. (1983). “Kinetic Analysis of Anaerobic Digestion of Pig Manure and its Design Implications”, *Journal of Agricultural Wastes*, vol. 8, no. 2, pp. 65-81. [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(83\)90105-1](https://doi.org/10.1016/0141-4607(83)90105-1)
- Comité Sistema producto Porcino del estado de Chiapas. (2013). *Plan rector 2013*, Tuxtla Gutiérrez: Secretaría del Campo/SAGARPA/Sistema Producto Porcino. <http://www.sistemaporcinos.org.mx/prchiap.pdf>. Consultado el 22 de febrero de 2016.
- Coss y León, M. H. J., Del campo, M. C. I. M., Loza, Ll. J. A., Durand, M. L. C., Monteros, C. E., y Lopez, A. E. (2015). “Tratamiento de sustrato de bovino y producción de biogás en un biodigestor continuo con lombricultura”, *e-Gnosis*, vol. 13, núm. 4, pp. 1-16.
- Creutzig, F., Ravindranath, N. H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F., Chum, Corbera, E., Delucchi, M., Faaij, A., Fargione, J., Haberl, H., Healt, G., Lucon, O., Plevin, R., Popp, A., Robledo, A. C., Rose, S., Smith, P., Stromman, A., Suh, S. and Masera, O. (2015). “Bioenergy and climate change mitigation: an assessment”, *Global Change Biology*, vol. 7, pp. 916-944. doi: 10.1111/gcbb.12205
- De la Mora O. C., Ruíz, C. J. A., Flores, L. H. E., Zarazúa V. P., Ramírez, O. G., Medina G. G., Rodríguez, M. V. M. y Chávez, D. A. A. (2016). “Índices de cambio climático en el estado de Chiapas, México, en el periodo 1960-2009”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, núm. 13, pp. 2523-2534.
- Demirbas, A. (2008). “Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections”, *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 2106–2116. doi:10.1016/j.enconman.2008.02.020
- Díaz, C. G. (2012). “El cambio climático”, *Ciencia y Sociedad*, vol. XXXVII, núm. 2, pp. 227-240.
- Díaz, G. L. A. (2016). “Secuenciación de regiones hipervariables V3 y V6 de microorganismos presentes en un biodigestor de nopal”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 7, núm. 3, pp. 559-572.
- DOF –Diario Oficial de la Federación (2012). Resolución por la que la Comisión Reguladora de Energía expide las Reglas Generales de Interconexión al Sistema Eléctrico Nacional para generadores o permisionarios con fuentes de energías

- renovables o cogeneración eficiente. Consultado el 20 de marzo de 2018. http://diariooficial.gob.mx/nota_to_pdf.php?fecha=22/05/2012&edicion=MAT.
- Escalera, C. M. E., Gallegos, F. G. and Leal, V. J. C. (2014). "Clean energy a CDM project option", *European Scientific Journal*, vol. 10, núm. 15, pp. 326-338.
- FIRCO -Fideicomiso de Riesgo Compartido. (2007). *Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario. Documento de trabajo*. México: SAGARPA.
- FIRCO. (2011). *Diagnóstico general de la situación actual de los sistemas de biodigestión en México*, México: SAGARPA.
- Foreest, V. F. (2012). *Perspectives for biogas in Europe*, Oxford: Oxford Institute for Energy Studies.
- García, B. C. A. y Macera, C. O. (2016). *Estado del arte de la bioenergía en México*, México: Imagia Comunicación S. de RL. de CV.
- Gittinger, J. P. (1983). *Análisis económico de proyectos agrícolas*, Madrid: Editorial Tecnos S.A.
- Grande-Acosta, G. and Islas-Samperio, J. (2017). "Towards a low-carbon electric power system in Mexico", *Energy for Sustainable Development*, vol. 37, pp. 99–109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2017.02.001>
- Hashimoto, A. G., Chen, Y. R. and Varel, V. H. (1981). *Theoretical aspects of methane production: state of the art in Livestock Wastes: A Renewable Resource*, Michigan, USA: ASAE.
- Hashimoto, A. G. (1984). "Methane from swine manure: Effect of temperature and influent substrate concentration on kinetic parameter (K)", *Journal of Agricultural Wastes*, vol. 9, no. 4, pp. 299-308. [http://dx.doi.org/10.1016/0141-4607\(84\)90088-X](http://dx.doi.org/10.1016/0141-4607(84)90088-X)
- IEA -International Energy Agency. (2013). *World Energy Outlook*. (2nd ed.), Paris, France: Corlet.
- INECC -Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y SEMARNAT -Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). *Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. (1a ed.), México: INECC/SEMARNAT.
- IPCC -Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories". In Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe K. (eds.), *Agriculture, Forestry and Other Land Use*, Japan: IGES.
- Martínez, C. C. (2007). "Volumen de biodigestores". *Energía y tú*, 39. [En línea]. <<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia39/HTML/articulo04.htm>>.

- Martínez, L. M. (2015). “Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato”, *Nova Scientia*, vol. 7, núm. 15, pp. 96-115.
- Monroy, H. O., Famá, B. G., Meraz, R. M., Montoya, L. L., y Macarie, O. H. (1998). “Digestión anaerobia en México: Estado de la tecnología”, *Ingeniería y ciencias ambientales*, vol. 10, núm. 39, pp. 12-23.
- Ngumah, C. C., Ogbulie, J. N., Orji, J. C. and Amadi, E. S. (2013). “Biogas Potential of Organic Waste in Nigeria”. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 110-116. doi: 10.4090/juee.2013.v7n1.110116
- PACCCH -Programa de Acción Ante el Cambio Climático del estado de Chiapas. (2010). *Inventario estatal de gases de efecto invernadero del estado de Chiapas*, Tuxtla Gutiérrez: SEMAHN.
- PACCCH. (2011). *Programa de Acción Ante el Cambio Climático del Estado de Chiapas*. (1ra ed.), Tuxtla Gutiérrez: SEMAHN.
- Ramos, G. L. de J., y Montenegro, F. M. (2012). “La generación de energía eléctrica en México”, *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, núm. 4, pp. 197-211.
- Rivas, L. B. A., Zúñiga, A. G., Sáenz, S. J. I., Guerrero, M. S., Segovia, L. A. y Morales, M. H. A. (2012). “Perspectivas de obtención de energía renovable de la biomasa del estiércol del ganado lechero en la región centro-sur de Chihuahua”, *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. XVI, núm. 30, pp. 872-885.
- Rivas, S. O., Faith, V. M., Guillén, W. (2010). “Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad”, *Tecnología en Marcha*, vol. 23, núm. 1, pp. 39-46.
- Rutz, D., & Janssen, R. (2007). *Biofuel Technology Handbook*, München Germany: WIP Renewable Energies.
- SAGARPA -Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2007). “Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario”, *Claridades Agropecuarias*, núm. 168, pp. 3- 40.
- Salvi, O., Chaubet, C., and Evanno, S. (2012). “Improving the safety of biogas production in Europe”, *Revista de Ingeniería*, no. 37, pp. 57-65.
- Santos, P. (2000). *Guía técnico de biogás*, Portugal: CCE/AGEEN.
- SENER –Secretaría de Energía. (2012). *Prospectivas de Energías Renovables 2012-2016*, México D. F.: SENER.
- SENER. (2015a). *Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2029*, México D. F.: SENER.
- SENER. (2015b). *Balance Nacional de Energía 2014*. (1a ed.), México, D. F.: SENER.
- Souza, J., Luna, W. H. D., y Schaeffer, L. (2012). “Sistema de compresión de biogás”, *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 29, pp. 13 – 17.

- Tatlidil, F., Bayramoglu, Z., & Akturk, D. (2009). "Animal Manure as One of the Main Biogas Production Resources: Case of Turkey", *Journal of Animal and Veterinary Advances*, vol. 8, no. 12, pp. 2473-2476.
- UNFCCC -United Nations Framework Convention on Climate Change. (2013). *ACM0010 Large-scale Consolidated Methodology: GHG emission reductions from manure management systems V. 8.0.* (5th ed.), Bonn, Germany: UNFCCC.
- Unión Europea. 2010. *Informe complementario sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en Extremadura*, Extremadura: Fondo Europeo para el Desarrollo Regional.
- USDA -United States Department of Agriculture. (1996). *Agricultural waste management field handbook National engineering handbook*, Washington D.C.: USDA.
- USDA. (2007). *An Analysis of Energy Production Cost from Anaerobic Digestion Systems on U.S. Livestock Production Facilities (Technical Note No. 1)*, Washington D. C.: USDA.
- USDA. (2014). *Biogas Opportunities Roadmap*, USA: USDA/EPA/DOE.
- USEPA -United States Environmental Protection Agency. (2004). *A Manual for Developing Biogas Systems at Commercial Farms in the United States.* (2nd edition), Washington D. C.: USEPA.
- USEPA. (2006). *AgSTAR Digest*, Washington D. C.: USEPA.
- Venegas, V. J. A., Perales, S. A., y Del Valle, S. M. (2013). "Potencial de generación de biogás y energía eléctrica en granjas porcinas en el estado de Veracruz por medio de biodigestores", *Ecodigma Nueva Época*, núm. 15, pp. 110-125.
- Venegas, V. J. A. (2014). *Análisis económico y ambiental por el uso de biodigestores y motogeneradores en el estado de Puebla*. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. de México, México.
- Venegas, V. J. A., Espejel, G. A., Pérez, F. A., Castellanos, S. J. A., y Sedano, C. G. (2017). "Potencial de energía eléctrica y factibilidad financiera para biodigestor-motogenerador en granjas porcinas de Puebla", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 8, núm. 3, 735-740.
- Vera, R. I., Martínez, R. J., Estrada, J. M., y Ortiz, S. A. (2014). "Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino", *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XV, núm. 3, pp. 429-436.
- Weber, B., Rojas, O.M., Torres, B. M. y Pampillón, G. L. (2012). *Producción de biogás en México, estado actual y perspectivas*, México: Red Mexicana de Bioenergía, A. C.
- Zamora, M. M. C. (2015). "Cambio Climático", *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 6, núm. 31, pp. 4-7.