

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE

INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



TESIS

Potencial de producción energética de biogás a partir de residuos pecuarios en la región La Libertad

(Potential energy production of biogas from livestock waste
in the region La Libertad)

AUTOR : Br. Rigoberto Javier Altamirano Barrios

ASESOR : Dr. Guillermo Alberto Linares Lujan

TRUJILLO - PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AGROINDUSTRIAL**

**POTENCIAL DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE
BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS PECUARIOS EN LA
REGIÓN LA LIBERTAD**

(POTENTIAL ENERGY PRODUCTION OF BIOGAS
FROM LIVESTOCK WASTE IN THE REGION LA
LIBERTAD)

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

Rigoberto Javier Altamirano Barrios

SUSTENTADO Y APROBADO ANTE EL HONORABLE JURADO:

PRESIDENTE : M.Sc. Leslie Cristina Lescano Bocanegra

SECRETARIO : M.Sc. Alexander Sánchez Gonzales

MIEMBRO (Asesor) : Dr. Guillermo Alberto Linares Lujan

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso, a la Virgen Santa Rosa de Lima, por iluminar mi camino, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos.

Con cariño y aprecio a mis queridos padres Virginia Barrios Ramírez e Isabel Altamirano Palomino por cimentar un futuro mejor para sus hijos con educación y perseverancia, por su paciencia, por su incondicional y fiel apoyo para alcanzar mis objetivos. ¡Gracias por darme la vida! ¡Los quiero mucho!

Para mis hermanos y hermana por su incesante apoyo y amor incomparable haciéndome pasar momentos inolvidables que, con sus consejos oportunos, me permitió demostrarle, que con esfuerzo y sacrificio se pueden alcanzar las metas. ¡Gracias!

Dedico también estas páginas a aquellas personas quienes con sus consejos, incentivos, conocimientos y esfuerzos han influido en mi formación profesional, gracias a todos ustedes, los estimo mucho.

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la virgen Santa Rosa de Lima, por ser mi sustento espiritual, por ser la luz y guiar mis pasos día a día por el camino del bien, por darme sabiduría e inteligencia para culminar con éxito una etapa más de mi vida, y poder servir a la sociedad con mis conocimientos para el progreso del país, el de mi familia y el mío en particular.

A mis padres y hermanos por enseñarme a ser fuerte, a la perseverancia y superación, al respeto hacia el prójimo y por tener siempre su apoyo incondicional.

A los docentes de la Universidad Nacional de Trujillo que han contribuido con sus enseñanzas, conocimientos y experiencias a lo largo de mi formación profesional.

Agradecer a todos mis amigos quienes me han ofrecido su amistad sincera, por estar siempre apoyándome y acompañándome cuando lo necesito y por enseñarme a luchar por lo que se desea alcanzar.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Guillermo Alberto Linares Lujan por su apoyo, las facilidades brindadas y orientación oportuna en la ejecución y desarrollo del presente trabajo.

Gracias a todos.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PRODUCCION GANADERA EN LA REGION LA LIBERTAD	3
3. METODOLOGIA.....	6
3.1. Población pecuaria.....	6
3.2. Residuos pecuarios.....	8
3.3. Cálculo del potencial de producción de biogás a partir de los residuos pecuarios	10
3.4. Cálculo del contenido de metano (CH ₄) del biogás y el potencial de producción energética a partir del biogás	12
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	13
4.1. Producción de residuos pecuarios	13
4.2. Potencial de producción de biogás	15
5. CONCLUSIONES	23
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	24

RESUMEN

El trabajo reporta el potencial de producción energética de biogás obtenido a partir de residuos pecuarios (estiércol, sangre y rumen) de la región La Libertad, Perú. Se empleo información de la producción pecuaria del año 2015 emitida por la Gerencia Regional de agricultura La Libertad - Oficina de Información Agraria para conocer la población de ganado vacuno, ovino, caprino y aves que se cría y beneficia en la región, posteriormente, se estableció una cantidad promedio de estiércol, sangre y rumen por especie animal en base a un peso corporal promedio. Se calculo la cantidad total de estiércol, sangre y rumen y se estimó el potencial de producción de bigas, el contenido de metano (CH₄) presente en el biogás, el poder calorífico generado por el CH₄; así como también la producción energética. Los resultados de este estudio indican que 817 178 221.8 m³ año⁻¹ de biogás podrían ser producidos a partir de residuos pecuarios en la región La Libertad en el 2015 que podría proporcionar una producción energética de 1 470 920.81 MWh año⁻¹. Este potencial energético cubriría 76.72% del total de la energía eléctrica consumida en la región en el 2015 o el 72.86% de la energía eléctrica consumida en el 2016.

Palabras clave: Residuos pecuarios, estiércol, contenido ruminal, biomasa, digestión anaeróbica, biogás, bioenergía, producción energética, energías renovables, metano.

ABSTRACT

The work reports the potential for energy production of biogas obtained from livestock residues (manure, blood and rumen) from the La Libertad region, Peru. Information was used on the livestock production of the year 2015 issued by the La Libertad Regional Agricultural Management Office of Agrarian Information to know the population of cattle, sheep, goats and birds that are raised and benefited in the region, an average amount of manure, blood and rumen per animal species based on an average body weight. The total amount of manure, blood and rumen was calculated and estimated the charcoal production potential, the methane (CH₄) content present in the biogas, the heat generated by CH₄; as well as energy production. The results of this study indicate that 817 178 221.8 m³ year⁻¹ of biogas could be produced from livestock residues in the La Libertad region in 2015 that could provide an energy production of 1 470 920.81 MWh year⁻¹. This energy potential would cover 76.72% of the total electric energy consumed in the region in 2015 or 72.86% of the electricity consumed in 2016.

Keywords: Livestock residues, manure, ruminal content, biomass, anaerobic digestion, biogas, bioenergy, energy production, renewable energy, methane.

1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global, la contaminación atmosférica, el deterioro de la biodiversidad y el agotamiento intensivo de los recursos combustibles fósiles son preocupaciones latentes surgidas en los últimos tiempos en el entorno del ser humano. La actividad mundial depende de combustibles fósiles (petróleo), de una u otra manera contaminantes, y la escasez de estos ha provocado conflictos sociales y económicos de gran magnitud. Como alternativa energética surgen los biocombustibles para la reducción del consumo del petróleo y derivados y de esta manera contribuir al desarrollo sustentable (Gutiérrez et al., 2012). Del mismo modo, los desechos originados por las industrias pecuarias son también causantes de contaminación del medio ambiente (suelos, agua y aire) si no son gestionados adecuadamente. La creciente concientización de la sociedad en los últimos tiempos al cuidado del medio ambiente está llevando a crecientes tendencias de búsqueda de nuevas alternativas de energías renovables, rentables y menos contaminantes.

El biogás es el producto de la digestión anaeróbica (DA) natural de descomposición de la materia orgánica (desechos pecuarios, basuras orgánicas). Se compone principalmente de metano (CH_4) (60%) y dióxido de carbono (CO_2) (35 - 40%). Además, el biogás contiene una baja cantidad de otros gases tales como amoníaco (NH_3), sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2), nitrógeno (N_2) y monóxido de carbono (CO) (Abdeshahian *et al.*, 2016). Este gas se conoce por varios nombres, dependiendo de donde se forma, dado que la digestión anaeróbica es muy frecuente en los humedales, es por ello que se le pone el nombre de gas de pantano. Sin embargo, no importa donde se forme, todo biogás se produce con las mismas reacciones químicas para tener casi la misma composición gaseosa (Ávila, 2009). El metano que compone principalmente al biogás, es un gas combustible que permite la utilización de este con fines energéticos. En este sentido, el biogás puede ser de gran utilidad ya que por su poder calorífico puede reemplazar con cierta ventaja a combustibles tradicionales que cumplen la misma función (Corona, 2007).

Una vez producido el biogás es necesario purificarlo a fin que sea considerado apto para sustituir los combustibles fósiles energéticos, puede ser utilizado en cualquier equipo comercial diseñado para uso con gas natural (Ávila, 2009).

El uso de biogás, producto de la descomposición de desechos orgánicos, está tomando cada vez más fuerza dentro de las nuevas alternativas bioenergéticas (Castillo y Vargas, 2011). La composición química del biogás indica que el componente más abundante es el metano (CH_4); este es el primer hidrocarburo de la serie de los alcanos y un gas de efecto invernadero. La mezcla de CH_4 con el aire es combustible y arde con llama azul (Cepero *et al.*, 2012). El biogás permite emplearlo con propósitos de generación de energía; en iluminación y medio de calentamiento para cocción de alimentos; como combustible para una caldera; para calentar un espacio o en equipos de refrigeración. El poder calorífico aprovechable depende del rendimiento de los quemadores o de los equipos que funcionan a base del biogás (Silva, 2002).

Todos los residuos orgánicos (basura de cocina, restos vegetales, restos animales, aguas servidas, aserrines, virutas, bosta y excrementos) son adecuados para ser fermentados anaerómicamente. Las bacterias consumen el carbono y el nitrógeno y como resultado se produce el biogás o gas de los pantanos. En la producción de biogás es necesario la construcción de la cámara especial denominado biodigestor para que se obtenga la fermentación anaeróbica (sin aire) (Castillo y Vargas, 2011). La producción de biogás ayuda a reducir las emisiones de CH_4 a la atmosfera, el cual es 21 veces más dañino que el CO_2 como gas de invernadero (Gutiérrez *et al.*, 20012). La producción de biogás es un proceso que depende de varios parámetros: actividad bacteriana, temperatura, tiempo de retención, relación Carbono/Nitrógeno, porcentaje de sólidos, pH (Castillo y Vargas, 2011).

Los países generadores de tecnologías más importantes para el biogás son China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, Estados Unidos, Filipinas y Alemania (Ávila, 2009).

La región La Libertad cuenta con una importante población pecuaria; donde su explotación se realiza de manera intensiva, semi intensiva y extensiva. Esta

actividad es fuente importante en la generación de empleos e ingresos económicos para la región (GROLL, 2006). Pero, dicha actividad también genera grandes cantidades de residuos y que en su gran mayoría no son tratados, tampoco aprovechados adecuadamente. La producción de biogás a partir de residuos pecuarios, como fuente energética, es una alternativa para tratar los desechos originados por la industria pecuaria; haciéndola menos contaminante.

Son pocos los estudios realizados para evaluar el potencial de producción energética de biogás a partir de residuos pecuarios en la región La Libertad; es por ello que el presente estudio tiene como objetivo recolectar información acerca de la cantidad de animales existentes en la región, determinar su cantidad promedio de residuos generados por su crianza y beneficio y evaluar el potencial de producción de biogás a partir de los residuos pecuarios que se generen para así estimar el potencial de producción energética teórica en MWh de energía eléctrica a partir de los residuos pecuarios de la región.

El fin es contribuir a la fomentación del tratamiento de los desechos orgánicos producidos por la actividad pecuaria en la generación de combustibles energéticos renovables, baratos y menos contaminantes.

2. PRODUCCION GANADERA EN LA REGION LA LIBERTAD

La actividad pecuaria debe ser rentable, sostenible, autosuficiente, económica y financieramente viable, preservadora de los recursos naturales y socialmente aceptables. Los conocimientos científicos tecnológicos deben estar a favor de la ganadería ya que, aplicando tecnologías existentes y probadas, se puede en el mediano y largo plazo obtener resultados muy satisfactorios en la actividad pecuaria, las que favorecerán a los pequeños y medianos productores de la región (GROLL, 2006).

La actividad pecuaria tiene gran importancia en el desarrollo de la región, por el número de personas que trabajan en ella, por su participación como rubro generador de empleos y divisas, por la capacidad de generar el

autoabastecimiento del mercado, evitando la dependencia alimentaria externa; así como, por su aporte relevante en el producto bruto interno del país. El departamento de La Libertad tiene condiciones y características potenciales en cuanto a recursos naturales como suelo y agua para el desarrollo de la ganadería, así como los recursos humanos expresados en las costumbres y en las actitudes por adquirir nuevas capacidades para mejorar la competitividad. En esta actividad se dedican más del 70% de los hogares rurales principalmente de las 7 provincias ubicadas en la sierra liberteña. (GRLL, 2006). La explotación ganadera en la región se desarrolla de manera intensiva y semi intensiva en la zona costa; mientras que en la zona sierra la explotación se realiza de manera extensiva.

El aumento del número de unidades agropecuarias registradas en la región La Libertad, ratifica la vocación de la población rural que prefiere a la actividad agropecuaria como medio de generación de sus ingresos. El IV CENAGRO (2012) registra un incremento de unidades agropecuarias del 33.7% respecto al III CENAGRO (1994), es decir, el número de estas unidades aumentó en 32 mil 607 por el mayor dinamismo del sector agrario, como producto de los tratados de libre comercio, mejora en la infraestructura de riego y fundamentalmente de la infraestructura vial (INEI, 2012). La Tabla 1 muestra el número de unidades agropecuarias, en la región La Libertad según el resultado censal de 1994 y 2012.

Tabla 1

Número de unidades agropecuarias, por resultado censal de 1994 y 2012 en el departamento La Libertad.

Región	Unidades Agropecuarias			
	III CENAGRO	IV CENAGRO	Diferencia	Variación porcentual
	1994	2012		
La Libertad	96 722	129 329	32 607	33.7

Fuente: INEI - Censos Nacionales Agropecuarios.

La actividad pecuaria en la región La Libertad continúa creciendo como consecuencia de un creciente consumo de parte de la población de la costa y

sierra, principalmente por el mayor poder adquisitivo de la población, la concentración poblacional en la sierra, creciente desarrollo de la gastronomía nacional y regional, así como de las actividades como minería y agroindustria (Gerencia Regional de Agricultura La Libertad, 2013). Otro factor que impulsa el crecimiento de la industria pecuaria en la región son los constantes apoyos de los gobiernos (nacional, regional y local) con proyectos de emprendimiento productivo en las cadenas productivas pecuarias; mejorando así la producción y la productividad de dicha actividad.

La población pecuaria en la región está generando una elevada producción de residuos de animales, principalmente el ganado estabulado, lo que resulta dificultoso la eliminación de gran cantidad de estiércol. También en los centros de beneficio resulta dificultoso eliminar los desechos producidos producto de dicha actividad. Esto podría representar un grave peligro de contaminación para la salud y el medio ambiente si no son manejados adecuadamente.

Los residuos pecuarios son uno de los sustratos rentables y renovables para el proceso de producción de biogás. El tratamiento de enormes cantidades de residuos pecuarios al año será de gran ayuda para la adecuada gestión de los desechos animales, por la disminución de su efecto contaminante sobre el medio ambiente y la producción de biogás como fuente de energía renovable muy valioso. Además, la conversión de los residuos pecuarios para fertilizante orgánico es favorable para la mejora del crecimiento de los cultivos en tierras de cultivos orgánicos (Abdeshahian et al., 2016).

3. METODOLOGIA

Para el cálculo del potencial de producción energética de biogás a partir de residuos pecuarios en la región La Libertad, se recogieron datos de informes del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) - Censos Nacionales Agropecuarios (CENAGRO), Gobierno Regional La Libertad (GRLL), Gerencia Regional de Agricultura La Libertad (GRALL). Los datos incluyen la cantidad de población pecuaria existente en la región (animales mayores y menores), el número de animales beneficiados en los mataderos y camales de la región y el peso promedio en pie vivo de los animales en el año 2015. Las estimaciones de la cantidad de residuos orgánicos generados por año se realizaron en base al peso corporal promedio vivo del animal. La producción del biogás se calculó en base a la cantidad de los residuos orgánicos animales generados por año. Los parámetros que tuvieron una correlación directa con la medida del biogás fueron considerados. Estos incluyen los sólidos totales de los residuos y la disponibilidad del estiércol animal. A continuación, se presentan los cálculos empleados.

3.1. Población pecuaria

La región La Libertad se encuentra ubicada en la región norte y occidental del Perú. Cuenta con una superficie de 25 499.90 Km² lo que representa el 2% del total nacional. Los suelos de la costa son de configuración aluvial. En la Sierra los suelos son de mediana a escasa capa arable. El clima en el departamento es muy variado, no presenta características extremas de calor, frío o precipitaciones. Los valles de la costa presentan un clima semi tropical y con una temperatura promedio de 18 °C, con humedad relativa promedio de 75% lo que hace que sea un área importante para el desarrollo de la agricultura y la ganadería (GRLL, 2006). La Tabla 2 muestra la cantidad de población pecuaria en la región La Libertad en el año 2015. Se observa una importante e interesante población pecuaria en la región sobre todo de aves, ganado ovino,

vacuno y caprino, los cuales estos generan gran cantidad de residuos pecuarios lo que serviría para la producción de una importante cantidad de biogás.

Tabla 2

Población de ganado vacuno, ovino, caprino y aves por provincia de la región La Libertad en el año 2015 (Unid.).

Provincia	Ganado vacuno	Ganado ovino	Ganado caprino	Aves*
Ascope	11 117	4 850	1 697	2 194 985
Bolívar	18 691	8 920	2 256	28 167
Chepén	9 693	5 728	504	1 843 059
Gran Chimú	11 851	7 469	5 611	52 638
Julcán	15 680	23 927	1 962	56 386
Otuzco	39 662	78 505	9 075	182 260
Pacasmayo	11 850	3 455	1 383	2 135 209
Pataz	31 450	40 192	13 256	81 200
Sánchez Carrión	33 116	117 127	11 907	129 167
Santiago de Chuco	31 974	53 442	10 855	70 463
Trujillo	18 721	5 211	1 920	11 814 402
Virú	12 825	7856	2 639	5 457 079
Total	246 630	356 682	63 065	24 045 015

(*): Solo incluye pollos, gallinas y gallos.

Fuente: Gerencia Regional de Agricultura La Libertad - Oficina de Información Agraria.

3.2. Residuos pecuarios

La industria pecuaria en la región La Libertad genera grandes cantidades de residuos los cuales en su mayoría estos no son gestionados adecuadamente; resultando peligroso, fuente de contaminación, para la salud y el medio ambiente (suelo, agua y aire) por su alto contenido de materia orgánica que posee. La digestión anaeróbica de los residuos orgánicos en biodigestores resulta un potencial importante para la producción de bioenergía (biogás).

Además del estiércol, la sangre procedente del sacrificio del ganado y aves, y el rumen obtenido de los rumiantes también se considera como residuos con potencial para la producción de biogás en las plantas biodigestoras. La cantidad de residuos generados por los diversos animales es variada, depende del tipo de animal, métodos de alimentación, tamaño del cuerpo, edad del animal, etc. (Abdeshahian *et al.*, 2016).

La estimación de la cantidad total de los residuos generados por la población pecuaria se determinó calculando la cantidad del estiércol producido por el ganado y aves y la cantidad del contenido de rumen y sangre producido por los animales sacrificados. Para ello, se clasificó al ganado en grandes rumiantes (vacunos) y en pequeños rumiantes (ovinos y caprinos). La cantidad de estiércol producido por animal se calculó en base a su peso corporal promedio vivo. La producción del estiércol puede variar en función del tipo, tamaño, peso corporal y edad del animal (Abdeshahian *et al.*, 2016).

Estudios han determinado que la cantidad de estiércol promedio que genera el ganado vacuno es de 10 - 20 kg/día, el ganado ovino y caprino genera 2 kg/día y las aves 0.08 - 0.1 kg/día, que representan el 5 - 6% del peso corporal/día, el 4 - 5% del peso corporal/día y el 3 - 4% del peso corporal/día respectivamente (Avcioglu y Türker, 2012). En el presente estudio, la cantidad de estiércol se calculó basándose en el 6% del peso corporal promedio de los grandes rumiantes, 5% del peso corporal promedio de los pequeños rumiantes y 4% del peso corporal promedio de las aves. El peso corporal promedio vivo de los grandes rumiantes (vacunos) es de 273.52 kg, de los rumiantes pequeños

(ovinos y caprinos) 31.55 kg y de las aves (pollos, gallinas y gallos) 2.43 kg (Gerencia Regional de Agricultura La Libertad - Oficina de Información Agraria, 2015). Por tanto, el cálculo de la cantidad media de estiércol generado resulto ser 16.41 kg/día para los grandes rumiantes, 1.58 kg/día para los rumiantes pequeños y 0.097 kg/día para las aves (Tabla 3).

La cantidad de sangre y rumen generado por el ganado producto del beneficio es proporcional al peso corporal y la edad de los animales. Estudios consideran que la cantidad de sangre obtenida (kg) del sacrificio de los vacunos es de 8.4% del peso corporal y la de los ovinos y caprinos 3% del peso corporal. De la misma manera, el peso del rumen (kg) de los grandes rumiantes sacrificados se considera 12% del peso corporal, mientras que para los pequeños rumiantes sacrificados 25% del peso corporal (Afazeli *et al.*, 2014). Estos datos fueron considerados en el presente estudio tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Cantidad promedio de residuos animales considerado en base al peso corporal.

Animales	Peso corporal (kg)	Estiércol (kg día⁻¹)	Sangre (kg día⁻¹)	Rumen (kg día⁻¹)
Rumiantes grandes	273.52	16.41	22.98	32.82
Rumiantes pequeños	31.55	1.58	0.95	7.89
Aves	2.43	0.097	-	-

Fuente: Gerencia Regional de Agricultura La Libertad - Oficina de Información Agraria.

La Tabla 4 muestra la cantidad de animales sacrificados en camales y mataderos de la región La Libertad en el año 2015. El mayor número de animales sacrificados fueron aves, seguido de ovinos, caprinos y vacunos (Tabla 4).

Tabla 4

Animales beneficiados en camales y mataderos de la región La Libertad en el año 2015 (unid.).

Región	Vacuno	Ovino	Caprino	Aves*
La Libertad	50 696	109 283	95 217	10 603 808

(*): Solo incluye pollos, gallinas y gallos.

Fuente: Gerencia Regional de Agricultura La Libertad - Oficina de Información Agraria.

3.3. Cálculo del potencial de producción de biogás a partir de los residuos pecuarios

La producción de biogás a partir de residuos pecuarios se ve afectado por diversos factores tales como régimen de alimentación del animal, tipo de animal, peso corporal, proporción de sólidos totales y disponibilidad de residuos (Avcioglu y Türker, 2012). Los sólidos totales presente en los desechos son también un factor importante para la producción de biogás a partir de los residuos de pecuarios (Abdeshahian *et al.*, 2016). La Tabla 5 muestra el rango de relación de sólidos totales en diferentes residuos pecuarios.

La disponibilidad del estiércol animal es variada, pues su recogida no siempre se puede llevar a cabo de manera eficiente. Por tanto, para el cálculo de la producción de biogás a partir del estiércol animal se tomó en cuenta el coeficiente de disponibilidad al momento de calcular el volumen de biogás acumulado (Abdeshahian *et al.*, 2016).

Tabla 5

Rango de sólidos totales (TS) presente en los residuos pecuarios y biogás producido en base a la cantidad de los sólidos totales.

Residuo pecuario	Sólidos Totales (%TS)	Biogás (m ³ kg ⁻¹ TS)
Estiércol de grandes rumiantes (fresco)	25 - 30	0.6 - 0.8
Estiércol de pequeños rumiantes (fresco)	18 - 25	0.3 - 0.4
Estiércol de aves	10 - 29	0.3 - 0.8
Sangre	18	0.3 - 0.6
Rumen	12 - 16	0.3 - 0.6

Fuente: Afazeli *et al.*, 2014.

El cálculo del potencial teórico de producción de biogás a partir de los residuos pecuarios generados en la región La Libertad se calculó como se muestra en la Ecuación (1):

$$TPB = M * TS * AC * EB_{TS} \dots\dots\dots (1)$$

Donde TPB denota el potencial teórico de biogás (m³ año⁻¹), M es la cantidad total de estiércol producido en la región (kg año⁻¹), TS representa la relación de los sólidos totales del estiércol pecuario, AC denota el coeficiente de disponibilidad y EB_{TS} es la cantidad estimada de biogás producido por kilogramo de sólidos totales (m³ kg⁻¹ TS).

En este estudio el valor del TS se consideró 25% para los grandes rumiantes, 25% para los pequeños rumiantes y 29% para las aves con un valor de la EB_{TS} de 0.6, 0.4 y 0.8 m³ kg⁻¹ TS respectivamente. El AC se consideró 50% para los rumiantes grandes, 13% para los rumiantes pequeños y 99% para las aves (Abdeshahian *et al.*, 2016).

Para el cálculo de producción de biogás a partir de la sangre y del contenido del rumen, se asumió que todos los residuos generados en los camales y mataderos de la región se trasladan a las plantas biodigestoras sin pérdida de

humedad. La cantidad de biogás producido a partir de la sangre y del rumen se calculó como 0.3 m³ por kg de residuos recogidos frescos (Afazeli *et al.*, 2014).

3.4. Cálculo del contenido de metano (CH₄) del biogás y el potencial de producción energética a partir del biogás

El porcentaje de CH₄ presente en el biogás, generado a partir de la digestión anaeróbica (AD) del estiércol animal, varía en función de la fuente del estiércol. Diversos estudios han estimado que el biogás obtenido del proceso de AD del estiércol de vaca se compone de 50 a 70% de CH₄, de la misma manera el biogás producido de la AD del estiércol de pollo contiene CH₄ en el rango de 50 a 70%; mientras que el biogás generado del estiércol del ganado ovino se compone de 40% al 50% de CH₄ (Abdeshahian *et al.*, 2016). En el presente estudio, la cantidad del contenido de CH₄ presente en el biogás producido del estiércol de los grandes rumiantes, pequeños rumiantes y aves se consideró como 60%, 45% y 60% respectivamente. El porcentaje de CH₄ presente en el biogás obtenido de los residuos de matadero (rumen y sangre) se asumió como el 60% (Abdeshahian *et al.*, 2016).

Para el cálculo del potencial de poder calorífico generado por el CH₄, se asumió que el 85% del CH₄ desarrollado se podría convertir al calor (eficiencia de conversión de 85% de calentamiento) en la caldera considerando un valor calorífico de 36 MJ por metro cúbico de CH₄ (36 MJ/m³) (Abdeshahian *et al.*, 2016).

El potencial de generación eléctrica a partir del biogás se calculó de acuerdo con la Ecuación (2):

$$e_{\text{biogás}} = E_{\text{biogás}} * \dots \dots \dots (2)$$

Donde $e_{\text{biogás}}$ es la cantidad de electricidad generada (kWh año⁻¹), $E_{\text{biogás}}$ es la energía cruda no convertida en biogás (kWh año⁻¹) y η indica la eficiencia

global de la conversión del biogás a electricidad (%). La cantidad de η es variada dependiendo de las plantas de generación de energía. El valor de η se considera 35 - 42% en plantas de energía con sistema de turbina grande y 25% en pequeños generadores. Para este estudio, el valor de η se asumió como 30% (Abdeshahian *et al.*, 2016). La cantidad $E_{\text{biogás}}$ se calculó usando la Ecuación (3):

$$E_{\text{biogás}} = \text{Energy content}_{\text{biogás}} * m_{\text{biogás}} \dots\dots\dots (3)$$

Donde $\text{Energy content}_{\text{biogás}}$ representa el valor calorífico del biogás (kWh m^{-3}) y $m_{\text{biogás}}$ denota la cantidad de biogás producido al año ($\text{m}^3 \text{año}^{-1}$). La cantidad del $\text{Energy content}_{\text{biogás}}$ es asumido como 6kWh m^{-3} considerando al valor calorífico del biogás como 21.5MJ por m^3 de biogás ($1\text{kWh} = 3.6 \text{MJ}$) (Abdeshahian *et al.*, 2016).

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Producción de residuos pecuarios

La cantidad de la producción de residuos pecuarios que se generó en la región La Libertad en el año 2015 de acuerdo a los datos registrados por la Gerencia Regional de Agricultura La Libertad - Oficina de Información Agraria, se muestra en la Tabla 6. Se observa que la mayor cantidad de estiércol en la región la produjo el ganado vacuno y las aves con cantidades de $1\,477\,227.38$ y $851\,313.76 \text{ ton año}^{-1}$ respectivamente, mientras que el ganado ovino y caprino lo hicieron en menor proporción con cantidades de $205\,698.51$ y $36\,369.59 \text{ ton año}^{-1}$ respectivamente (Tabla 6). La alta generación de estiércol obedece a un desempeño positivo en la producción del ganado vacuno y aves en la región (MINAGRI, 2015), además, a nivel nacional la región La Libertad ocupa el segundo lugar en producción de vacunos (MINAGRI, 2015) así como

también es el segundo productor más importante de aves (Diario Actualidad Avipecuaria, 2013 y Diario La República, 2013).

Asimismo, la Tabla 6 muestra la cantidad de sangre proveniente del sacrificio animal en los principales mataderos de la región, donde la mayor cantidad la generó el ganado vacuno, en menor proporción lo hizo el ganado ovino y caprino con cantidades de 425 222.84, 37 893.88 y 33 016.49 ton año⁻¹ respectivamente (Tabla 6). Para el caso de aves no se encontraron datos disponibles. Esto indica que el principal subproducto líquido del sacrificio de los animales es la sangre y que la mayor disponibilidad de sangre de ganado vacuno, ovino, caprino y otros, se obtiene en los grandes mataderos (Beltrán y Perdomo, 2007). Además, los grandes rumiantes producen mayor cantidad de sangre que los pequeños rumiantes debido a su diferencia en edad, tamaño y peso corporal vivo. La sangre generada en los mataderos es una rica fuente de proteínas (Abdeshahian *et al.*, 2016).

De la misma manera, se muestra que el ganado vacuno sacrificado produjo la mayor cantidad de rumen, seguido del ganado ovino y caprino con cantidades de 607 302.59, 314 718.65 y 274 210.68 ton año⁻¹ respectivamente (Tabla 6). Esta interesante cantidad de residuos pecuarios generados producto del sacrificio animal explica el crecimiento del subsector pecuario, así como el incremento en la producción de carne de vacuno y derivados en la región (CERPLAN, 2015).

Con referencia a la Tabla 6, de todos los residuos pecuarios que se generó en la región, la mayor cantidad fue estiércol, seguido de rumen y sangre con cantidades de 2 570 609.24, 1 196 231.92 y 496 133.21 ton año⁻¹ respectivamente. La cantidad total de residuos pecuarios que se produjo en la región en el año 2015 se estimó en 4 262 974.37 ton año⁻¹. La gran cantidad de residuos que se genera en la región se explica con el crecimiento del subsector pecuario mediante la producción de ganado, aves, huevos, leche fresca, etc. (INEI, 2015).

Tabla 6

Estimación de la cantidad de residuos pecuarios generados en la región La Libertad en el año 2015.

Región La Libertad		
Estiércol (Ton año ⁻¹)	Vacuno	1 477 227.38
	Ovino	205 698.51
	Caprino	36 369.59
	Aves*	851 313.76
Sangre (Ton año ⁻¹)	Vacuno	425 222.84
	Ovino	37 893.88
	Caprino	33 016.49
	Aves*	N. D.
Rumen (Ton año ⁻¹)	Vacuno	607 302.59
	Ovino	314 718.65
	Caprino	274 210.68

(*): Solo incluye pollos, gallinas y gallos.

N. D.: No Disponible.

4.2. Potencial de producción de biogás

La actividad pecuaria genera una gran cantidad y diversidad de residuos y subproductos. Los residuos pecuarios como la sangre, estiércol y rumen son muy buenos para la producción de biogás en procesos de AD, porque contienen bacterias que provienen de los tractos digestivos de los animales (Gruber *et al.*, 2011). Las materias primas con las cuales son alimentados los animales también favorecen la producción de biogás (Gruber *et al.*, 2011).

La Tabla 7 muestra el potencial de producción de biogás a partir de los residuos pecuarios generados en la región La Libertad. Se observa que el mayor potencial de generación de biogás a partir del estiércol animal proviene del estiércol de las aves (195 529 743.5 m³ año⁻¹) y del estiércol del ganado vacuno (110 792 053.5 m³ año⁻¹), menor cantidad aporta el estiércol del ganado ovino (2 674 080.6 m³ año⁻¹) y la del ganado caprino (472 804.6 m³ año⁻¹) (Tabla 7). Estos resultados coinciden con lo reportado por Castillo (2015)

quien evaluó la producción de biogás a partir de la utilización de estiércol de ovino comparado con el de otras especies (bovino y gallina), encontrando que la mejor materia orgánica para producir mayor volumen de biogás es el estiércol de gallinaza, en segundo lugar el de bovino, y por último lugar, pero con una notable producción de biogás es el estiércol de ovino adicionado con paja de avena; por tanto, estos resultados se debe al gran contenido de nutrientes que posee la gallinaza debido a su calidad en su alimentación a diferencia con la de otros animales. Otro factor que hace al estiércol de las aves que sea el mayor y excelente potencial de producción de biogás en la región es debido a que las explotaciones avícolas cuentan con un número de animales muy superior a las explotaciones de otros animales más grandes (vacunos, ovinos, caprinos, etc.) en la región, lo que compensa la diferencia (INEI, 2012 y Gerencia regional de agricultura La Libertad - oficina de información agraria, 2015). Además, la generación de biogás obedece al tamaño, especie y cantidad de estiércol producido por animal, así como en la capacidad de este de producir biogás (Vera *et al.*, 2014 y Sitiosolar, 2013); de la misma manera, parámetros como actividad bacteriana, temperatura, tiempo de retención, relación Carbono/Nitrógeno, porcentaje de sólidos, pH son factores importantes en la producción de biogás (Castillo y Vargas, 2011; Silva, 2002). El estiércol obtenido a partir de las aves mostró un excelente y alto potencial de generación de biogás en comparación con la del resto de animales (vacuno, ovino y caprino); por tanto, los distintos excrementos animales producen cantidades diferentes de biogás debido a su particular composición (Sitiosolar, 2013). A pesar de existir disparidad de información en las fuentes consultadas sobre la cantidad de estiércol producido por animal, así como en la capacidad de este de producir biogás, Calderón (2015) y Varnero (2011) mencionan que el estiércol producido por las aves es el mayor potencial de generación de bioenergía, seguido del estiércol producido por el ganado vacuno, ovino y caprino respectivamente; el cual, coincidimos en el presente estudio. Esto indica el papel fundamental del estiércol animal como fuente de generación de bioenergía en la región La Libertad.

De la sangre obtenida del sacrificio de los animales (Tabla 7), un alto potencial de generación de biogás proviene de la sangre del ganado vacuno ($127\ 566\ 851.7\ \text{m}^3\ \text{año}^{-1}$), seguido de la sangre del ganado ovino ($11\ 368\ 164.1\ \text{m}^3\ \text{año}^{-1}$) y caprino ($9\ 904\ 948.4\ \text{m}^3\ \text{año}^{-1}$) (Tabla 7). Las aves no registraron datos disponibles. A pesar de existir muy poca información sobre la producción de biogás a partir de la sangre de animales sacrificados, Abdeshahian *et al.* (2016) quien evaluó el potencial de producción de biogás de desperdicio de animal de campo en Malasia encontró que un total de 306.323 millones de $\text{m}^3\ \text{año}^{-1}$ de biogás produce la sangre de los animales sacrificados en Malasia, siendo la sangre de los grandes rumiantes (ganado vacuno y búfalos) la del mayor potencial de generación de biogás ($247.57\ \text{m}^3\ \text{año}^{-1}$), que representa el 80% del total de biogás producido. Esto indica el papel fundamental de la sangre animal para producir biogás. Los animales mayores producen mayor cantidad de sangre que los animales menores debido a su diferencia de edad, tamaño y peso corporal, es por ello que ofrecen un mayor potencial de generación de biogás (Abdeshahian *et al.*, 2016). La sangre generada en los mataderos por ser una fuente rica en proteínas es aprovechada en la obtención de harina de sangre para el alimento animal, albumina, plasma sanguíneo, etc. (Beltrán y Perdomo, 2007) pero en otros casos esta es vertida directamente al ambiente sin recibir tratamiento alguno, resultando fuente de contaminación de cuerpos de agua, aire y suelos. Una solución a este problema es utilizarlo en procesos co-digestión anaeróbica con otros residuos para la obtención de biogás. Pues, los residuos de la industria cárnica, con un alto contenido en grasas y proteínas, presentan un elevado potencial de producción energética mediante co-digestión anaerobia (Palatsi *et al.*, 2010).

En cuanto al potencial de generación de biogás a partir del rumen del ganado sacrificado, la mayor cantidad la generó el ganado vacuno ($182\ 190\ 777.9\ \text{m}^3\ \text{año}^{-1}$), seguido del ganado ovino ($94\ 415\ 594.4\ \text{m}^3\ \text{año}^{-1}$) y caprino ($82\ 263\ 203.1\ \text{m}^3\ \text{año}^{-1}$) (Tabla 7). El resultado obtenido guarda relación con lo reportado por Cornejo (2012) quien obtuvo mayor producción de biogás cuando utilizó mezclas de 20, 50 y 60% de rumen de ganado vacuno (la

producción de biogás se incrementó con la adición del rumen de ganado en la mezcla), pero no obtuvo mayor producción de biogás en las mezclas que no contenían rumen de ganado. Esto indica que el rumen del ganado contiene componentes esenciales para la generación de biogás como carbohidratos y fibra (Cornejo, 2012) que pueden ser muy bien aprovechados por los microorganismos anaeróbicos (bacterias, hongos, protozoos) responsables del proceso de fermentación y la producción de biogás (Abdeshahian *et al.*, 2016 y Cornejo, 2012).

Con relación a la Tabla 7, el mayor potencial de generación de biogás a partir de los residuos animales generados en la región la produjo el rumen ($358\ 869\ 575.4\ \text{m}^3\ \text{año}^{-1}$), seguido del estiércol ($309\ 468\ 682.2\ \text{m}^3\ \text{año}^{-1}$) y la sangre animal ($148\ 839\ 964.2\ \text{m}^3\ \text{año}^{-1}$). Estos resultados se relacionan con lo determinado por Sánchez *et al.* (2015) quien concluye que las excretas, el rumen y el lodo del ganado demuestran una alta producción de biogás en procesos de DA. Por tanto, de acuerdo a los resultados obtenidos, el rumen y el estiércol del ganado, de manera individual, son un potencial importante para la generación de biogás en la región. Esto es debido a que estos residuos proporcionan un sustrato adecuado y sirven como inóculo para la degradación de diversos desechos orgánicos debido a la alta carga de microbiana que poseen (Cornejo, 2012). La combinación y mezcla en diversas proporciones de los desechos pecuarios mejoraría la producción de biogás en procesos de DA; de la misma manera, el proceso de la co-digestión anaeróbica también favorece e incrementa la producción de biogás, esto se debe a que la tecnología de la co-digestión aprovecha al máximo los sustratos, co-sustratos e inóculos empleados en el proceso anaeróbico (Sánchez *et al.*, 2015).

El potencial total de producción anual de biogás a partir de los residuos pecuarios generados en la región La Libertad se estimó en $817\ 178\ 221.8\ \text{m}^3\ \text{año}^{-1}$. Este resultado muestra un excelente e importante potencial de generación de bioenergía (biogás) para la región, elemento fundamental para el desarrollo humano, pues la energía es esencial para promover o mejorar una serie de servicios básicos como alumbrado, agua potable, centros de salud,

colegios, comunicaciones y permitir la generación de valor agregado en la producción; así lo consideran instituciones como el Banco Mundial, Naciones Unidas, la Comunidad Económica Europea, el Consejo Mundial de la Energía y otras (Ministerio de Agricultura, 2011). Por tanto, la tecnología de la digestión anaerobia es factible para el aprovechamiento al máximo de los residuos orgánicos (biomasa) como fuente de generación de energía limpia (biogás), biol y biosol (biofertilizantes); además esta tecnología reduce enormemente las emisiones directas de gases efecto invernadero (GEI) hacia el medio ambiente (Sánchez *et al.*, 2015).

Tabla 7

Potencial teórico de producción de biogás a partir de los residuos pecuarios generados en la región La Libertad en el año 2015.

Región La Libertad		
Potencial de generación de biogás a partir de estiércol (m ³ año ⁻¹)	Vacuno	110 792 053.5
	Ovino	2 674 080.6
	Caprino	472 804.6
	Aves*	195 529 743.5
Potencial de generación de biogás a partir de sangre (m ³ año ⁻¹)	Vacuno	127 566 851.7
	Ovino	11 368 164.1
	Caprino	9 904 948.4
	Aves*	N. D.
Potencial de generación de biogás a partir de rumen (m ³ año ⁻¹)	Vacuno	182 190 777.9
	Ovino	94 415 594.4
	Caprino	82 263 203.1

(*): Solo incluye pollos, gallinas y gallos.

N. D.: No Disponible.

El principal componente del biogás es el gas CH₄, cuya composición depende del tipo de materia orgánica utilizada y las condiciones de la descomposición. Este gas CH₄ es el que le brinda al biogás las propiedades de combustible (Magaña *et al.*, 2006). La tabla 8 muestra el potencial de CH₄ presente en el biogás producido a partir de los residuos pecuarios generados en la región La

Libertad. Observamos que el potencial de CH₄ presente en el biogás generado a partir del estiércol, sangre y rumen animal se estimó en 185 209 176.5, 89 303 978.5 y 215 321 745.2 m³ año⁻¹ respectivamente (Tabla 8). El potencial total de CH₄ desprendido del biogás producido de los residuos pecuarios es de 489 834 900.2 m³ año⁻¹. Esto indica lo importante que resultaría aprovechar la materia orgánica proveniente de la actividad pecuaria de la región La Libertad en la producción de biogás, principalmente CH₄, como fuente de generación de energía. La Tabla 8 también muestra que el CH₄ desprendido del biogás producido a partir del estiércol, sangre y contenido ruminal es potencialmente capaz de proporcionar un poder calorífico de 5 667 400 801, 2 732 701 743 y 6 588 845 404 MJ año⁻¹ respectivamente en la región La Libertad (Tabla 8). El poder calorífico total ofrecido por el CH₄ desprendido del biogás producido a partir de los residuos pecuarios estudiados fue estimado en 14 988 947 948 MJ año⁻¹.

El biogás no daña el medio ambiente, mejora las condiciones higiénicas y es una fuente de energía moderna (Martínez, 2015). Su aprovechamiento en la generación de energía impulsa la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como el CH₄, cuyo potencial de calentamiento global es 21 - 30 veces mayor que el del CO₂ (Herrera, 2010; Rivas *et al.*, 2010 y Carmona *et al.*, 2005). La producción de biogás en biodigestores es una herramienta alternativa para reducir la contaminación ambiental por CH₄ y materia orgánica en descomposición en actividades agropecuarias, además es una fuente de producción de energía renovable que representa un ahorro de leña o gas propano para cocinar debido a su elevado poder calorífico que posee (Pinos *et al.*, 2012 y Herrera, 2010); pues el CH₄, el principal componente del biogás, es quien le confiere el poder calorífico que este tiene. Por tanto, el valor energético del biogás estará determinado por la concentración de metano el cual es alrededor de 20 a 25 MJ m⁻³, comparado con el gas natural que tiene de 33 a 38 MJ m⁻³ (Herrera, 2010 y Magaña *et al.*, 2006).

Tabla 8

Estimación del contenido de metano (CH₄) presente en el biogás y el potencial de poder calorífico generado por el CH₄, utilizando los residuos pecuarios producidos en la región La Libertad en el año 2015.

Región La Libertad		
Estiércol	CH ₄ (m ³ año ⁻¹)	185 209 176.5
	Poder calorífico (MJ año ⁻¹)	5 667 400 801
Sangre	CH ₄ (m ³ año ⁻¹)	89 303 978.5
	Poder calorífico (MJ año ⁻¹)	2 732 701 743
Rumen	CH ₄ (m ³ año ⁻¹)	215 321 745.2
	Poder calorífico (MJ año ⁻¹)	6 588 845 404

La Tabla 9 revela la cantidad energética que se produjo producto de la conversión de los residuos pecuarios en la región La Libertad en energía eléctrica. Se observa que el potencial de producción energética obtenido de la conversión del estiércol, sangre y rumen animal fue estimado en 557 043.63, 267 911.94 y 645 965.24 MWh año⁻¹ respectivamente (Tabla 9). La cantidad total de energía eléctrica generada producto de la conversión de los residuos pecuarios fue estimada en 1 470 920.81 MWh año⁻¹. Basándose en los resultados reportados en las Tablas 7 y 9; el biogás producido a partir de los residuos pecuarios de la región La Libertad (817 178 221.8 m³ año⁻¹) proporcionaría un potencial eléctrico de 1 470.92 GWh año⁻¹; con este potencial eléctrico generado se contribuiría a cubrir un 76.72% del total de energía eléctrica consumida en la región en el 2015 o el 72.86% de la energía eléctrica consumida en el 2016, pues el consumo total de electricidad en la región La Libertad en el año 2015 fue de 1 919.67 GWh año⁻¹ mientras que en el año 2016 se incrementó a 2 018.68 GWh año⁻¹ (MINEM, 2016). Por lo tanto,

esto indica que la producción de biogás a partir de los residuos pecuarios puede disminuir costos en la generación de energía eléctrica para la región al disminuir la importación de generadores eléctricos y el consumo de combustibles no renovables que son principales fuentes de generación de energía en múltiples provincias y distritos de la región; además, los desperdicios animales son de bajo costo y prometedora fuente de energía sostenible que podría ser muy bien utilizada de manera eficiente para la generación de bioenergía (biogás) y energía eléctrica (Abdeshahian *et al.*, 2016).

El crecimiento poblacional y las actividades de manufactura, minería, comercio, agroindustria, entre otros ha aumentado el consumo energético en la región La Libertad, se ha informado que el consumo de energía eléctrica per cápita en el 2015 fue de 1 032.3 kWh habitante⁻¹ y para el año 2016 ascendió a 1 072.39 kWh habitante⁻¹ (MINEM, 2016), en este sentido producir energía a partir de los residuos pecuarios resultaría beneficioso para la región debido a su creciente demanda en los últimos años; además, por otra parte la digestión anaerobia de residuos animales reduce sus efectos perjudiciales sobre el medio ambiente mediante la mejora de la salud pública (Abdeshahian *et al.*, 2016).

Tabla 9

Potencial de producción energética (MWh año⁻¹) a partir de los residuos pecuarios generados en la región La Libertad en el año 2015.

Región	Estiércol (Basado en energía eléctrica)	Sangre (Basado en energía eléctrica)	Rumen (Basado en energía eléctrica)
La Libertad	557 043.63	267 911.94	645 965.24

5. CONCLUSIONES

La región La Libertad en el año 2015 albergó una población pecuaria de 246 630 cabezas de ganado vacuno, 356 682 cabezas de ganado ovino, 63 065 cabezas de ganado caprino y 24 045 015 aves (pollos, gallinas y gallos) que produjeron alrededor de 2 570 609.24 Ton año⁻¹ de estiércol, 496 133.21 Ton año⁻¹ de sangre y 1 196 231.92 Ton año⁻¹ de rumen. Estos residuos pecuarios producirían 817 178 221.8 m³ año⁻¹ de biogás que podría proporcionar un poder calorífico de 14 988 947 948 MJ año⁻¹ y un potencial de producción energética de 1 470 920.81 MWh año⁻¹. Con este potencial eléctrico generado a partir de los residuos pecuarios se cubriría un 76.72% del total de la energía eléctrica consumida por la región en el año 2015 o el 72.86% de la energía eléctrica consumida en el año 2016.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Abdeshahian P., Shiun J., Shin W., Hashim H. & Tin C. (2016). Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, 714 - 723.

Afazeli H., Jafari A., Rafiee S. & Nosrati M. (2014). An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes. *Renew Sustain Energy Rev* 34, 380 - 386.

Avcio lu A. y Türker U. (2012). Status and potential of biogas energy from animal wastes in Turkey. *Renew Sustain Energy Rev* 16, 1557 - 1561.

Ávila E. (2009). Biogás: Opción real de seguridad energética para México. Tesis para optar el grado de maestro en ciencias en administración, planeación y economía de los hidrocarburos. Escuela superior de ingeniería y arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, México. 146 pp.

Beltrán C. y Perdomo W. (2007). Aprovechamiento de la sangre de bovino para la obtención de harina de sangre y plasma sanguíneo en el matadero Santa Cruz de Malambo Atlántico. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero de alimentos. Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia. 193 pp.

Calderón C. (2015). Diseño de un biodigestor tubular para obtener biogás a partir de residuos orgánicos del ganado vacuno generados en la hacienda Santa Mónica "Guamote". Trabajo de titulación para optar el grado académico de ingeniero en biotecnología ambiental. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 77 pp.

Carmona J., Bolívar D. y Giraldo L. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 18 (1), 49 - 63.

Castillo D. y Vargas C. (2011). Obtención de biogás a partir de excremento de cuy en condiciones ambientales en Tacna Perú. Revista Ciencia y Desarrollo. 13, 84 - 91.

Castillo V. (2015). Producción de biogás a partir de la utilización de estiércol de ovino comparado con el de otras especies (bovino y gallina). Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de ingeniero agrónomo en zootecnia. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 100 pp.

Centro Regional de Planeamiento Estratégico - CERPLAN (2015). Reporte de indicadores de producción, exportación y empleo: Región La Libertad enero - setiembre 2014. Trujillo. RIPEE N°01. 8 p. Recuperado de: http://sir.regionlalibertad.gob.pe/admin/docs/RIPEE_01_2015_LA%20LIBERTAD.pdf

Cepero L., Savran V., Blanco D., Díaz M., Suarez J. y Palacios A. (2012). Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. Revista Pastos y Forrajes, 35 (2), 219 - 226.

Cornejo E. (2012). Producción de biogás a nivel de laboratorio, utilizando estiércol de ganado vacuno y residuos agroindustriales (torta de piñón, cascarilla de arroz y rumen de ganado vacuno) en la E.E.A. el Porvenir - distrito de Juan Guerra. Tesis para optar el título profesional de ingeniero agroindustrial. Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú. 96 pp.

Corona I. (2007). Biodigestores. Monografía para obtener el título de ingeniero industrial. Instituto de ciencias básicas e ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Hidalgo. 69 pp.

Diario Actualidad Avipecuaria (2013). Región La Libertad registra incremento en producción avícola. Trujillo. 02 de setiembre de 2013. Recuperado de: <http://www.actualidadavipecuaria.com/noticias/aumenta-produccion-avicola-la-libertad-peru.html>

Diario La República (2013). La Libertad es la primera región agrícola y segunda a nivel agropecuario. Trujillo. 20 de mayo de 2013. Recuperado de: <http://larepublica.pe/20-05-2013/la-libertad-es-la-primera-region-agricola-y-segunda-nivel-agropecuaria>

Gerencia Regional de Agricultura La Libertad - Oficina de Información Agraria (2015). Recuperado de: <http://www.agrolalibertad.gob.pe/?q=node/736>

Gerencia Regional de Agricultura La Libertad (2013). Informe ejecutivo sobre el índice de crecimiento regional agropecuario enero - marzo 2013. Trujillo - Perú. 2 p.

Gobierno Regional La Libertad - GRL (2006). Plan ganadero de la región La Libertad 2006 - 2015. Trujillo - Perú. 129 p.

Gruber S., Hilbert J. y Sheimberg S. (2011). Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW_{el} con una planta de biogás de alta eficiencia. Recuperado de: http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_bc-inf-16-10-generacion_electrica_con_biogas.pdf

Gutiérrez G., Mondaca I., Meza M., Fuentes A., Balderas J. y Gortares P. (2012). Biogás: una alternativa ecológica para la producción de energía. Ideas CONCYTEG, 7 (85), 881 - 894.

Herrera G. (2010). Producción de biogás a partir de desechos de bovinos como una alternativa de energía renovable. Tesis para obtener el título de médico veterinario zootecnista. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Veracruzana, Veracruz. 93 pp.

Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI (2012). IV censo nacional agropecuario 2012. Lima - Perú. 93 p.

Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI (2015). Producción nacional marzo 2015. Lima. Informe técnico N° 05. 51 p.

Magaña J., Torres E., Martínez M., Sandoval C. y Hernández R. (2006).

Producción de biogás a nivel de laboratorio utilizando estiércol de cabras. Acta Universitaria de la Dirección de Investigación y Posgrado de la Universidad de Guanajuato, 16 (2), 27 - 37.

Maldonado R., Acosta B., Osorio J., Soto D. y Zeppieri S. (2014).

Selección y diseño de un esquema de separación CH₄ - CO₂ de una corriente de biogás. Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V., 29 (1), 115 - 126.

Martínez M. (2015).

Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato. Revista Nova Scientia, 7 (15), 96 - 115.

Ministerio de Agricultura (2011).

Biodigestores en el Perú - Guía de principales experiencias desarrolladas en el país. Perú: Soluciones Prácticas.

Ministerio de Agricultura y Riego - MINAGRI (2015).

Sistema integrado de estadística agraria - SIEA. Lima - Perú. 173 p.

Ministerio de Energía y Minas - MINEM (2016).

Anuario estadístico de electricidad 2015. Recuperado de: http://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=6&idEstadistica=10179

Ministerio de Energía y Minas - MINEM (2016).

Estadística eléctrica por regiones. Recuperado de: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Capitulo%20%20Estadistica%20por%20Regiones%202015%20FINAL.pdf>

Palatsi J., Rodríguez A., Fernández B. y Flotats X. (junio, 2010).

Digestión anaerobia de subproductos de la industria cárnica. Trabajo presentado en la II Jornada de la Red Española de Compostaje, Burgos, España.

Pinos J., García J., Peña L., Rendón J., González C. y Tristán F. (2012).

Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas

ganaderos de algunos países de América. Revista Agrociencia, 46 (4), 359 - 370.

Rivas O., Faith M., y Guillén R. (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Revista Tecnología en Marcha, 23 (1), 39 - 46.

Sánchez L., Laines J. y Sosa J. (2015). Producción de biogás por medio de la co-digestión anaerobia con excretas de ganado vacuno, lodo y contenido ruminal. Trabajo presentado en el 2º Congreso Nacional AMICA 2015 de la Asociación Mexicana de Ingeniería Ciencia y Gestión Ambiental, Coyoacán, México.

Silva J. (2002). Tecnología del biogás. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltex/gestion/biogas.pdf>

Sitio solar (2013). La generación de biogás en las explotaciones ganaderas. España. Portal de energías renovables. Recuperado de: <http://www.sitiosolar.com/la-generacion-de-biogas-en-las-explotaciones-ganaderas/>

Teniza O., Solís M., Pérez M., Gonzales J. y Valencia R. (2015). Producción de metano utilizando residuos cunícolas. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 14 (2), 321 - 334.

Varnero M. (2011). Manual de biogás. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

Vera I., Martínez J., Estrada M. y Ortiz A. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología, 15 (3), 429 - 436.