



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO (CALOR Y ELECTRICIDAD) DEL ESTIÉRCOL BOVINO EN NICARAGUA 2023

ESTIMATION OF THE ENERGY POTENTIAL (HEAT AND ELECTRICITY) OF BOVINE MANURE IN NICARAGUA 2023

Marlon José Díaz Robleto¹

(Recibido/received: 20-noviembre-2023; aceptado/accepted: 10-diciembre-2023)

RESUMEN: Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) la ganadería es una de las principales causas de degradación del suelo y recursos hídricos, además genera más gases de efecto invernadero (GEI) que el sector transporte, debido entre otras causas a los volúmenes de excretas generadas. En Nicaragua el sector ganadero es uno de los principales contribuyentes al desarrollo económico del país, siendo el principal emisor de GEI causado por la fermentación entérica (metano). El objetivo de esta investigación fue presentar una prospección con base en fundamentos teóricos internacionalmente aceptados para realizar estimaciones de la generación entérica de metano a causa de las deposiciones de estiércol del ganado, así mismo se utilizó literatura nacional conteniendo cálculos utilizados en estudios de caso y proyectos pilotos ejecutados, con ese respaldo teórico se estimó el potencial energético (calor y electricidad) de las excretas del ganado bovino de Nicaragua. El enfoque de la investigación fue cuantitativo con perspectiva teórica de extensión crítica y de modelización empleando las ecuaciones contenidas en la teoría, guías y documentos utilizados como fuentes primarias y secundarias. Como resultado de esta investigación se estimó que el potencial energético del estiércol bovino del país es de 57,393.89 MWh por día o 46.37 TCal/día, dicho potencial fue estimado a partir del cálculo de más de 9 millones de metros cúbicos de biogás por día que generan las más de 186 mil toneladas de estiércol que el hato ganadero del país genera a diario.

PALABRAS CLAVES: Biogás, estiércol, generación de calor y electricidad, metano, potencial energético.

¹ *Docente. Universidad de Tecnología y Comercio (UNITEC), Nicaragua. Correo: Ing_marlondiaz@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7271-4689>*

ABSTRACT: According to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), livestock farming is one of the main causes of degradation of soil and water resources, and it also generates more greenhouse gases (GHG) than the transportation sector, due among other causes. to the volumes of excreta generated. In Nicaragua, the livestock sector is one of the main contributors to the country's economic development, being the main emitter of GHG caused by enteric fermentation (methane). The objective of this research was to present a survey based on internationally accepted theoretical foundations to make estimates of the enteric generation of methane due to the deposition of livestock manure. Likewise, national literature containing calculations used in case studies and projects was used. pilots executed, with this theoretical support the energy potential (heat and electricity) of the excreta of Nicaraguan cattle was estimated. The research approach was quantitative with a theoretical perspective of critical extension and modeling using the equations contained in the theory, guides and documents used as primary and secondary sources. As a result of this research, it was estimated that the energy potential of the country's bovine manure is 57,393.89 MWh per day or 46.374263493 TCal/day, said potential was estimated from the calculation of more than 9 million cubic meters of biogas per day that generate the more than 186 thousand tons of manure that the country's livestock herd generates daily.

KEYWORDS: Biogas, manure, heat and electricity generation, methane, energy potential.

INTRODUCCIÓN

El presente artículo se enfoca en una revisión documental de fuentes primarias y secundarias para obtener una estimación del potencial energético (calor y electricidad) contenido en las excretas bovinas de la población del hato ganadero de Nicaragua, específicamente refiriéndonos al ganado identificado en el estudio nacional del hato bovino 2023, realizado por el Ministerio Agropecuario (MAG) y presentado en agosto del presente año. En el estudio antes mencionado se tomó en cuenta 9.5 millones de manzanas y 154,701.00 fincas que cuentan con al menos una cabeza de ganado.

El objetivo general es lograr una estimación teórica del potencial energético de las excretas bovinas a nivel departamental y nacional. Los objetivos específicos se han centrado en identificar los departamentos con mayor población de cabezas de ganado, mismos que resultan en los mayores generadores de metano y por consiguiente son los departamentos que cuentan con mayor potencial energético para producir calor y electricidad a base de la transformación anaerobia del estiércol bovino, así mismo se pretendió elaborar un mapa GIS (Sistema de Información Geográfica) del potencial energético para aprovechamiento de las excretas bovinas de Nicaragua para el año 2023.

La importancia de la presente investigación radica en que en Nicaragua alrededor del 80% de la superficie deforestada cada año es convertida a pastizales y la actividad ganadera ha sido criticada por ser una de las actividades con mayores emisiones de gases con efecto invernadero (GEI) a nivel mundial (FUNIDES 2017). Cabe mencionar que desde noviembre de 2010

Nicaragua se integró a la Iniciativa Global de Metano (GMI por sus siglas en inglés), dicha iniciativa tiene como objetivo reducir las emisiones globales de metano (CH₄) capturándolo a un costo razonable y usándolo como fuente de energía limpia.

Si bien el sector público y privado han realizado diferentes esfuerzos en pro del aprovechamiento de las excretas bovinas, aún no existe un instrumento que sirva de línea base para identificar el potencial de estos residuos, por lo que el desarrollo del presente artículo, servirán al sector público para la prospección de futuros proyectos, a la academia para generar otras líneas de investigación pudiendo tener como punto de partida la estimación calculada y al sector privado para analizar posibles oportunidades de inversión en el tema de generación de calor y electricidad mediante la captura y aprovechamiento del metano provenientes del estiércol del ganado vacuno.

Cuando se habla de reducción de GEI y específicamente del metano generado por el estiércol mediante el aprovechamiento energético, está implícito un proceso biológico llamado digestión anaerobia o biometanización el cuál es un proceso biológico que tiene lugar en ausencia de oxígeno, en el que parte de la materia orgánica (estiércol) se transforma, mediante la acción de los microorganismos, en una mezcla de gases (biogás), constituido principalmente por metano y dióxido de carbono y otros gases en pequeñas cantidades (amoníaco, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, etc.), si bien como resultado del proceso de digestión anaerobia se obtiene biol y biosol que son fertilizantes naturales líquido y sólido respectivamente con gran valor económico, este artículo, se limita a la estimación del potencial energético del estiércol.

Debido a la falta de estudios relacionados al potencial energético del estiércol bovino y por ende a limitantes de información, actualmente no se cuenta con un apoyo constante en la búsqueda de la consolidación de una hoja de ruta para la reducción de las emisiones de metano mediante el aprovechamiento energético de este.

El presente artículo pretende dar a conocer una estimación del potencial energético, tanto en términos de energía eléctrica (kWh), cómo en términos de energía térmica (kCal) contenido en las excretas del ganado bovino, con el fin de poner a disposición un recurso que sirva de línea base para futuros proyectos de aprovechamiento energético del metano producido por el estiércol del ganado.

Los cálculos realizados en la presente investigación se respaldan teóricamente en publicaciones de los siguientes autores, instituciones y organismos internacionales: 1) Dr. Roberto A. González Castellano. 2) Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 3) Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). 4) Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). 5) Ministerio Agropecuario (MAG).

METODOLOGÍA

La presente investigación comprendió la estimación del potencial energético (Calor y Electricidad) del estiércol bovino, bajo el supuesto de aprovechamiento de esta biomasa mediante un tipo genérico de tecnología de digestión anaerobia para generar biogás y utilizarlo como combustible para generar energía eléctrica o energía térmica.

La base de todos los cálculos fue el número de cabezas de ganado, el cual se obtuvo del Estudio Anual al Hato del Ganado Bovino 2023; para la distribución porcentual de cabezas de ganado por departamento, se utilizó como base los valores de población de ganado bovino por categorías, según tamaño de las explotaciones agropecuarias” del informe final: IV Censo Nacional Agropecuario (CENAGRO).

El potencial energético se calculó con base en la cantidad de metano contenida en el biogás que se puede generar a partir de las excretas del ganado, esto implicó que los cálculos se realizaron bajo el supuesto de aprovechamiento de las excretas bovinas para generar biogás, por lo que se requirió calcular la cantidad de biogás que las eyecciones del ganado producen en el lugar donde fueron expulsadas y que no fueron sometidas a ningún tipo de tratamiento. Con la cantidad de biogás obtenida se utilizó factores de conversión para calcular la cantidad de energía eléctrica (kWh) y la cantidad de energía térmica (kCal) que se podría obtener del aprovechamiento de excretas bovinas.

Como primer paso, se requirió calcular la cantidad de materia orgánica (estiércol) disponible por día (kg/día), para esto, se multiplicó el peso promedio de una res, por el número de reses del departamento respectivo, por el porcentaje promedio de las deyecciones por día de una res. El peso promedio del ganado nicaragüense, según Baltodano A (2016) corresponde 400 kg, las deyecciones promedio de una res, normalmente rondan el 8% de su peso (Pérez 2017), con esta información se aplicó la ecuación (1) para calcular la cantidad de estiércol por día que genera el hato ganadero nicaragüense por departamento y a nivel nacional.

$$E = P \times C \times 8\% \quad (1)$$

Dónde:

E: Cantidad de estiércol por día en (kg/día)

P: Peso promedio del ganado (kg)

C: Cantidad de reses

8%: Porcentaje de excretas respecto al peso promedio.

González Roberto A (2019) indica que para calcular el biogás que se puede producir con la materia orgánica generada, se aplicó el modelo propuesto por Chen y adaptado por Harris², en el cual se plantea que 1 kg de sólidos volátiles (SV) puede producir como máximo 0.5 m³ de

² Paul H. Harris. Biogas Notes, University of Adelaide, Adelaide, 2008

metano (CH₄), lo que representa el 100% de eficiencia en la conversión de la materia orgánica volátil.

La cantidad de SV digerible y aprovechable para producir biogás que se genera en el proceso de digestión anaerobia se determinó por los porcentajes de SV contenidos en los sólidos totales (ST) producida por la materia orgánica, como se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.-Contenido de sólidos totales y volátiles

<i>Estiércol</i>	
<i>ST</i>	<i>SV en ST</i>
20%	80%

Fuente: Planta de Biogás para el Rastro Municipal de Bluefields 2014 Estudio de Factibilidad Tecnológica.

Para determinar la cantidad de sólidos totales por día (ST/día) se aplicó la ecuación (2), la cual consiste en multiplicar la cantidad de estiércol por el porcentaje de ST contenido en la materia.

$$ST = E \times \%ST \quad (2)$$

Dónde:

ST: Cantidad de sólidos totales (kg/día)

E: Cantidad de estiércol por día en (kg/día)

%ST: Porcentaje de sólidos totales contenidos en el estiércol (20%)

Con la cantidad de ST, se procedió a determinar la cantidad de SV contenidos en los ST, los cuales corresponden al 80% de los ST, esto se realizó por medio de la ecuación (3).

$$SV = ST \times \%SVST \quad (3)$$

Dónde:

SV: Cantidad de sólidos volátiles (kg/día)

ST: Cantidad de sólidos totales (kg/día)

%SVST: Porcentaje de sólidos volátiles contenidos en los sólidos totales (80%)

Con la cantidad de SV se procedió a calcular el potencial bioquímico del metano (m³ CH₄/kg SV; metro cubico de metano por kilogramo de sólidos volátiles) BMP, por sus siglas en inglés o coeficiente de conversión específica. En la tabla 2 se indica el BMP y el contenido de metano (en porcentaje) presente en el estiércol.

Tabla 2.-Potencial Bioquímico del CH₄ y contenido de CH₄ en el biogás

<i>Estiércol</i>	
<i>BMP</i> <i>(m³ CH₄/kg SV)</i>	<i>Contenido de</i> <i>CH₄ (%)</i>
20%	65%

Fuente: Planta de Biogás para el Rastro Municipal de Bluefields 2014 Estudio de Factibilidad Tecnológica.

Con base en los datos mostrados en la tabla 1 y la tabla 2, se procedió a calcular la cantidad de metano y con ello se la cantidad de biogás a partir del total de materia orgánica disponible.

La cantidad de metano se calculó multiplicando la cantidad de SV por el BMP, para ello se utilizó la ecuación (4).

$$CH_4 = SV \times BMP \quad (4)$$

Dónde:

CH₄: Cantidad de metano producido (m³/día)

SV: Cantidad de sólidos volátiles (kg/día)

BMP: Porcentaje de metano por kilogramo de sólidos volátiles (20%)

Vanero, M. (2011) indica que una concentración promedio de metano (CH₄) producido por estiércol bovino ronda el 65% en el biogás, con este dato se procedió a realizar el cálculo respectivo dividiendo la cantidad de m³ de CH₄ por 65% como se muestra en la ecuación (5).

$$B = CH_4 \times \%CH_4 \quad (5)$$

Dónde:

B: Cantidad de biogás (m³/día)

CH₄: Cantidad de metano producido (m³/día)

% CH₄: Porcentaje de metano contenido en el biogás (65%)

Con este último cálculo se obtuvo la cantidad de biogás disponible en metros cúbicos por día (m³/día), con este dato base se determinó la cantidad de biogás disponible al mes con base en un mes típico de 30 días y la cantidad disponible al año con base en un año típico de 365 días. Finalmente, para obtener el potencial energético del estiércol bovino se utilizó los siguientes factores: 1m³ de biogás puede generar 6.25 kWh o bien 5,050 kCal (Páez (sf)).

Una vez finalizado el cálculo de la estimación del potencial energético del biogás obtenido a partir del estiércol de ganado por departamento, se procedió a realizar el trabajo de elaboración de los mapas de potencial nacional y por departamento. Para la elaboración de los mapas se utilizó una

metodología genérica para el uso sistemas de información geográfica, esto permitió generar información geográfica y atributos asociados a dicha información.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nicaragua, desde hace varios años ha realizado cambios en su matriz energética, impulsando proyectos de generación con fuentes renovables que aprovechan recursos como la biomasa, el sol y el viento entre otros. El aprovechamiento de la biomasa para generar energía eléctrica, según datos del anuario estadístico del sector eléctrico nacional (2021) del Ministerio de Energía y Minas (MEM) está representada por un 12.40% de participación en la generación anual, dicho aprovechamiento está limitado a la utilización del bagazo de caña de azúcar, producto del proceso de zafra de los ingenios azucareros, otro energético utilizado que forma parte de la biomasa, es la leña, sin embargo este energético es aprovechado mayoritariamente para generar calor para cocción de alimento y otros procesos industriales.

Durante la revisión de la literatura consultada se encontró información muy limitada acerca del potencial energético de esta parte de la biomasa (excretas bovinas), dicha documentación se limita a casos de estudio, proyectos pilotos, estudios de mercado, pero todos orientados al aprovechamiento de excretas bovinas por medio de la producción de biogás para generar calor para cocción de alimentos a nivel domiciliario y pocos usos productivos y no se analiza el potencial desde el punto de vista como materia para producir electricidad, tampoco se encontró estudios oficiales a nivel nacional que analicen este recurso. No se omite mencionar que los resultados de esta investigación se centraron en la estimación del potencial teórico y no en la estimación del potencial económico, técnico, de mercado o de implementación.

Aclarado lo anterior en la figura 1 se ilustra la cantidad de reses por departamento, se observa cuales cuentan con mayor hato ganadero, mismos que tienen mayor potencial para la generación de biogás y por consiguiente mayor potencial para generar calor y electricidad.



Figura 1. Cabezas de ganado por departamento

Fuente: Elaboración propia, con base en datos del informe final del CENAGRO

Los datos de la población de reses en Nicaragua muestran que el 38.55% de dicha población está concentrada en la Zona Atlántica del país, representada por dos departamentos, la mayor concentración de reses se ubica en la Zona Central con el 43.49% de la población, distribuida en ocho departamentos, el restante 17.96% se concentra en la Zona Pacífico del país distribuida en 7 departamentos. En la tabla 3 se puede apreciar la cantidad de reses por departamento, el porcentaje que representa con respecto al total de la población y la zona a la que pertenece el departamento.

Tabla 3. Distribución porcentual del ganado por zona geográfica

<i>Departamento</i>	<i>Total de Cabezas de Ganado Bovino</i>	<i>%</i>	<i>Zona</i>
Masaya	39,556.39	0.68%	Pacífico
Carazo	54,210.71	0.93%	Pacífico
Granada	58,052.20	1.00%	Pacífico
Rivas	121,955.43	2.09%	Pacífico
Managua	185,861.47	3.19%	Pacífico
Chinandega	255,039.35	4.38%	Pacífico
León	331,965.04	5.69%	Pacífico
Madriz	74,661.10	1.28%	Central
Nueva Segovia	138,816.57	2.38%	Central
Estelí	152,778.97	2.62%	Central
Jinotega	279,011.34	4.79%	Central
Boaco	365,908.56	6.28%	Central
Río San Juan	410,817.11	7.05%	Central
Matagalpa	536,306.82	9.20%	Central
Chontales	577,044.12	9.90%	Central
RACCN	657,060.20	11.27%	Atlántico
RACCS	1,590,021.62	27.28%	Atlántico
<i>Total</i>	<i>5,829,067.00</i>	<i>100%</i>	

Fuente: Elaboración propia, con base en datos del informe final del CENAGRO

En la figura 2, se muestra la distribución porcentual de la generación de estiércol por zona geográfica del país, se puede observar que la Zona Central con un 43.49%, es la zona en la que se genera mayor cantidad de estiércol, seguido por la Zona del Atlántico con un 38.55% y un 17.96% para la zona del pacífico.

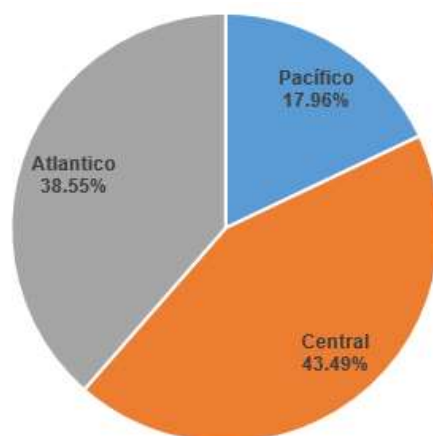


Figura 2. Generación de estiércol, distribución porcentual por zona geográfica.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la Tabla 3

El total de cabezas de ganado mostrado en la tabla 3, genera unas 186,530 toneladas de estiércol por día a nivel nacional, dicho resultado se obtuvo por medio de la aplicación de la ecuación (1), en la tabla 4 se detalla la cantidad calculada por cada departamento.

Tabla 4.-Generación de estiércol por departamento

<i>Departamento</i>	<i>Estiércol (kg /día)</i>	<i>%</i>
Masaya	1,265,804.39	0.68%
Carazo	1,734,742.76	0.93%
Granada	1,857,670.54	1.00%
Rivas	3,902,573.70	2.09%
Managua	5,947,567.06	3.19%
Chinandega	8,161,259.17	4.38%
León	10,622,881.20	5.69%
Madriz	2,389,155.06	1.28%
Nueva Segovia	4,442,130.15	2.38%
Estelí	4,888,927.09	2.62%
Jinotega	8,928,362.79	4.79%
Boaco	11,709,073.95	6.28%
Río San Juan	13,146,147.49	7.05%
Matagalpa	17,161,818.36	9.20%
Chontales	18,465,412.00	9.90%
RACCN	21,025,926.40	11.27%
RACCS	50,880,691.89	27.28%
<i>Total</i>	<i>186,530,144.00</i>	<i>100%</i>

Fuente: Cálculos propios, resultados de la utilización de la ecuación (1)

Con estos resultados ya es posible prever que los departamentos con mayor potencial del país para un aprovechamiento energético de las excretas bovinas son RACCS, RACCN, Chontales y Matagalpa, esto debido a que la generación de biogás es directamente proporcional a la cantidad de materia disponible, a mayor cantidad de excretas mayor es la cantidad de biogás que se puede producir.

En el siguiente enlace: <https://my.visme.co/view/x4nov46n-generacion-de-estiercol-por-departamento> se puede acceder al mapa "Generación de estiércol por departamento" elaborado con base en los resultados obtenidos.



Figura 3. Mapa Generación de estiércol por departamento (kg/día)

En cuanto a las emisiones de metano que genera el hato ganadero de Nicaragua, se calculó 367.23 Gg CH₄/año (trescientos sesenta y siete punto veinte y tres giga gramos de metano por año), dichas emisiones obedecen el patrón de distribución porcentual por zona geográfica, siendo la zona del Pacífico responsable del 17.96% de las emisiones de CH₄, la zona central es la responsable de la mayor parte de las emisiones con un 43.49% y por lo tanto la región que emite mayor cantidad de emisiones de metano por fermentación entérica, seguida por la zona del Atlántico que es responsable del 38.55% de las emisiones totales.

En la tabla 5, se muestra el detalle de emisiones de metano por departamento, así como la cantidad de estiércol en toneladas por año que se calculó para cada departamento según la población de reses.

Tabla 5.-Emisiones de metano por año

<i>Departamento</i>	<i>Total de Cabezas de Ganado Bovino</i>	<i>Estiércol (ton /año)</i>	<i>Emisiones (Gg CH₄/año)</i>
Masaya	39,556.39	462,018.60	2.49
Carazo	54,210.71	633,181.11	3.42
Granada	58,052.20	678,049.75	3.66
Rivas	121,955.43	1,424,439.40	7.68
Managua	185,861.47	2,170,861.98	11.71
Chinandega	255,039.35	2,978,859.60	16.07
León	331,965.04	3,877,351.64	20.91
Madriz	74,661.10	872,041.60	4.70
Nueva Segovia	138,816.57	1,621,377.51	8.75
Estelí	152,778.97	1,784,458.39	9.63
Jinotega	279,011.34	3,258,852.42	17.58
Boaco	365,908.56	4,273,811.99	23.05
Río San Juan	410,817.11	4,798,343.83	25.88
Matagalpa	536,306.82	6,264,063.70	33.79
Chontales	577,044.12	6,739,875.38	36.35
RACCN	657,060.20	7,674,463.14	41.39
RACCS	1,590,021.62	18,571,452.54	100.17
Total	5,829,067.00	68,083,502.56	367.23

Fuente: Cálculos propios, resultados de las emisiones obtenidos por medio de utilización de la ecuación (10.19) del Capítulo 10, Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol, Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero Volumen 4.

Con base en los datos de la tabla 5, se elaboró un mapa donde se dispuso los resultados de las emisiones de metano por departamento y por zona geográfica del país (Pacífico, Centro y Atlántico), figura 4.

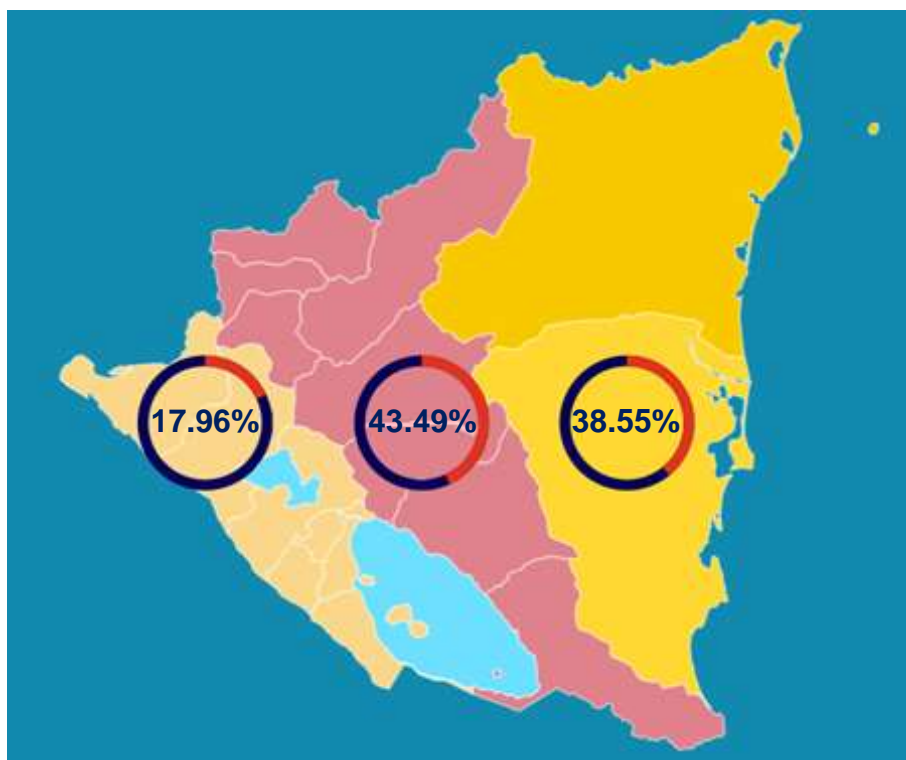


Figura 4. Porcentaje de emisiones de CH₄ por región, año base 2023

El mapa de la figura 4, se puede consultar en línea en el siguiente enlace web: <https://my.visme.co/view/8rmzxmvm-untitled-project> en él, se puede explorar información más detallada de las emisiones de metano por cada departamento del país.

Con los datos de la tabla 4 y aplicando las ecuaciones (2), (3) y (4) se obtuvo las cantidades de sólidos totales en kg/día, los sólidos volátiles en kg/día y la cantidad de metano en m³/día que genera cada departamento del país. Los resultados de la aplicación de las ecuaciones antes mencionadas indican que la generación promedio de biogás (m³/día) por departamento ronda los 540,000.00 (Quinientos cuarenta mil metros cúbicos de biogás por día). En la tabla 6 se muestra a detalle los resultados de los cálculos para cada departamento.

Tabla 6. Producción de metano a partir de sólidos volátiles

<i>Departamento</i>	<i>Estiércol (kg /día)</i>	<i>ST (kg/día)</i>	<i>SV (kg/día)</i>	<i>Metano CH₄ (m³/día)</i>
Masaya	1,265,804.39	253,160.88	202,528.70	40,505.74
Carazo	1,734,742.76	346,948.55	277,558.84	55,511.77
Granada	1,857,670.54	371,534.11	297,227.29	59,445.46
Rivas	3,902,573.70	780,514.74	624,411.79	124,882.36
Managua	5,947,567.06	1,189,513.41	951,610.73	190,322.15
Chinandega	8,161,259.17	1,632,251.83	1,305,801.47	261,160.29
León	10,622,881.20	2,124,576.24	1,699,660.99	339,932.20
Madriz	2,389,155.06	477,831.01	382,264.81	76,452.96
Nueva Segovia	4,442,130.15	888,426.03	710,740.82	142,148.16
Estelí	4,888,927.09	977,785.42	782,228.33	156,445.67
Jinotega	8,928,362.79	1,785,672.56	1,428,538.05	285,707.61
Boaco	11,709,073.95	2,341,814.79	1,873,451.83	374,690.37
Río San Juan	13,146,147.49	2,629,229.50	2,103,383.60	420,676.72
Matagalpa	17,161,818.36	3,432,363.67	2,745,890.94	549,178.19
Chontales	18,465,412.00	3,693,082.40	2,954,465.92	590,893.18
RACCN	21,025,926.40	4,205,185.28	3,364,148.22	672,829.64
RACCS	50,880,691.89	10,176,138.38	8,140,910.70	1,628,182.14
<i>Total</i>	<i>186,530,144.00</i>	<i>37,306,028.80</i>	<i>29,844,823.04</i>	<i>5,968,964.61</i>

Fuente: Cálculos propios con base en los datos de la tabla 4 y aplicando las ecuaciones (2), (3) y (4)

Con los datos de la tabla 6 y la aplicación de la ecuación (5), se estimó la cantidad de biogás por día y a partir de ese resultado se obtuvo las cantidades por mes y por año para cada departamento, el detalle de los resultados se puede observar en la tabla 7.

Se determinó que las excretas bovinas pueden generar más de 9 millones de metros cúbicos de biogás por día, más de 275 millones de metros cúbicos por mes y más de 350 mil millones de metros cúbicos de biogás por año. La producción promedio de biogás por día por departamento es de 540 mil metros cúbicos de biogás por día.

Tabla 7. Producción estimada de biogás por día, mes y año por departamento

Departamento	Biogás (m ³ / día)	Biogás (m ³ / mes)	Biogás (m ³ / año)
Masaya	62,316.52	1,869,495.72	22,745,531.26
Carazo	85,402.72	2,562,081.61	31,171,992.95
Granada	91,454.55	2,743,636.49	33,380,910.59
Rivas	192,126.71	5,763,801.16	70,126,247.46
Managua	292,803.30	8,784,099.04	106,873,204.97
Chinandega	401,785.07	12,053,552.01	146,651,549.45
León	522,972.61	15,689,178.39	190,885,003.69
Madriz	117,619.94	3,528,598.25	42,931,278.65
Nueva Segovia	218,689.48	6,560,684.53	79,821,661.84
Estelí	240,685.64	7,220,569.24	87,850,259.05
Jinotega	439,550.17	13,186,505.04	160,435,811.37
Boaco	576,446.72	17,293,401.52	210,403,051.83
Río San Juan	647,194.95	19,415,848.60	236,226,158.00
Matagalpa	844,889.52	25,346,685.58	308,384,674.52
Chontales	909,066.44	27,271,993.10	331,809,249.43
RACCN	1,035,122.53	31,053,675.91	377,819,723.62
RACCS	2,504,895.60	75,146,868.02	914,286,894.26
Total	9,183,022.47	275,490,674.22	3,351,803,202.95

Fuente: Cálculos propios con base en los datos de la tabla 6 y aplicando la ecuación (5)

En el siguiente enlace se puede acceder al mapa “Estimación de la producción de biogás por departamento” elaborado con base en los resultados obtenidos. <https://my.visme.co/view/w471pyp1-estimacion-de-la-produccion-de-biogas-por-departamento>



Figura 5. Estimación de la producción de biogás por departamento, año base 2023

Con los datos de la tabla 7, aplicando los factores de conversión para energía eléctrica, se obtuvo la tabla 8, en la que se muestra que existe un potencial para generar más de cincuenta y siete millones trescientos mil kilowatts hora por día; más de un millón setecientos mil Megawatts hora por mes y más de veinte millones novecientos mil Megawatts hora por año. El potencial promedio de energía por mes por departamento es de más de cien mil Megawatts, estas cantidades de energía revelan el gran potencial energético contenido en las excretas bovinas.

Tabla 8. Generación de electricidad a base de biogás

<i>Departamento</i>	<i>(kWh/día)</i>	<i>MWh/mes</i>	<i>MWh/año</i>
Masaya	389,478.28	11,684.35	142,159.57
Carazo	533,767.00	16,013.01	194,824.96
Granada	571,590.93	17,147.73	208,630.69
Rivas	1,200,791.91	36,023.76	438,289.05
Managua	1,830,020.63	54,900.62	667,957.53
Chinandega	2,511,156.67	75,334.70	916,572.18
León	3,268,578.83	98,057.36	1,193,031.27
Madriz	735,124.63	22,053.74	268,320.49
Nueva Segovia	1,366,809.28	41,004.28	498,885.39
Estelí	1,504,285.26	45,128.56	549,064.12
Jinotega	2,747,188.55	82,415.66	1,002,723.82
Boaco	3,602,791.98	108,083.76	1,315,019.07
Río San Juan	4,044,968.46	121,349.05	1,476,413.49
Matagalpa	5,280,559.50	158,416.78	1,927,404.22
Chontales	5,681,665.23	170,449.96	2,073,807.81
RACCN	6,469,515.82	194,085.47	2,361,373.27
RACCS	15,655,597.50	469,667.93	5,714,293.09
<i>Total</i>	<i>57,393,890.46</i>	<i>1,721,816.71</i>	<i>20,948,770.02</i>

Sin duda, emprender acciones encaminadas al aprovechamiento energético de las excretas bovinas para generar electricidad por medio de biogás puede ser factible y tiene externalidades positivas como la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), reducción de la contaminación de suelos y fuentes acuíferas, valorización económica de un residuo que actualmente su manejo genera costos, entre otros.

Con los datos de biogás ($m^3/día$) de la tabla 7, aplicando los factores de conversión para energía térmica se obtuvo la tabla 9, donde en promedio se podría obtener más 2,700 kilo Calorías de energía térmica por día por departamento a partir del biogás obtenido de las excretas bovinas. Los cálculos indican que el potencial ronda las mil trescientas Tera calorías por mes y las dieciséis mil seiscientas Tera calorías por año.

Los resultados muestran que también existe gran potencial para el aprovechamiento energético en forma de energía térmica del biogás que se puede producir a partir de las excretas bovinas.

En la tabla 9 se muestra el detalle de los resultados de los cálculos de las kilocalorías por día, por mes y por año, por cada departamento, debido a que las cantidades numéricas resultaron tan grandes se optó por utilizar el factor Tera para mostrar los resultados calculados para mes y año.

Tabla 9. Generación de calor a base de biogás

<i>Departamento</i>	<i>(kCal/día)</i>	<i>TCal/mes</i>	<i>TCal/año</i>
Masaya	314,698,446.20	9.44	113.29
Carazo	431,283,738.05	12.94	155.26
Granada	461,845,475.29	13.86	166.26
Rivas	970,239,862.18	29.11	349.29
Managua	1,478,656,671.48	44.36	532.32
Chinandega	2,029,014,588.26	60.87	730.45
León	2,641,011,694.83	79.23	950.76
Madriz	593,980,704.61	17.82	213.83
Nueva Segovia	1,104,381,896.70	33.13	397.58
Estelí	1,215,462,488.25	36.46	437.57
Jinotega	2,219,728,349.16	66.59	799.10
Boaco	2,911,055,922.61	87.33	1,047.98
Río San Juan	3,268,334,514.83	98.05	1,176.60
Matagalpa	4,266,692,072.17	128.00	1,536.01
Chontales	4,590,785,505.83	137.72	1,652.68
RACCN	5,227,368,778.86	156.82	1,881.85
RACCS	12,649,722,783.60	379.49	4,553.90
<i>Total</i>	<i>46,374,263,492.92</i>	<i>1,391.23</i>	<i>16,694.73</i>

La tabla 10, muestra el potencial energético calculado para las excretas bovinas del hato ganadero de Nicaragua, con base en la literatura consultada durante la realización de la presente investigación.

Tabla 10. Potencial energético de las excretas bovinas

<i>Metano CH₄</i> <i>(m³/día)</i>	<i>Biogás</i> <i>(m³ / día)</i>	<i>Energía</i> <i>Eléctrica</i> <i>(kWh/día)</i>	<i>Energía Térmica</i> <i>(kCal/día)</i>
5,968,964.61	9,183,022.47	57,393,890.46	46,374,263,492.92

Los principales hallazgos de esta investigación son:

Según el resumen de los principales indicadores del subsector electricidad del año 2022, publicado por el Instituto Nicaragüense de Energía (INE), la generación bruta fue de 4,292,633.00 MWh. El potencial de energía eléctrica calculado con base en el hato ganadero del año 2023 fue de 20,948,770.02 MWh, 4.88 veces la generación bruta obtenida con las fuentes actuales (bagazo de caña, solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y bunker), es decir, teóricamente sería posible utilizar biogás producido a partir de estiércol como único combustible para cubrir todos los requerimientos energéticos actuales del país.

Con base en el potencial energético calculado, se puede afirmar que la producción de biogás a partir de las excretas bovinas por medio de algún tipo genérico de tecnología de biodigestión para usarlo como combustible y generar energía eléctrica, es viable desde el punto de vista de aseguramiento del recurso, además tiene externalidades positivas como la reducción de GEI, liberación de recursos financieros por manejo del estiércol y posibles ingresos por venta de bonos de carbono.

Al tratarse de una estimación de potencial teórico y no de un potencial de implementación que tome en cuenta aspectos económicos, sociales, ambientales, tecnológicos y de mercado, se propuso tres escenarios de aprovechamiento energético de las excretas bovinas, con el objetivo de validar la utilidad de los resultados de la investigación. En la figura 6 se muestra la representación de los escenarios de aprovechamiento planteados.

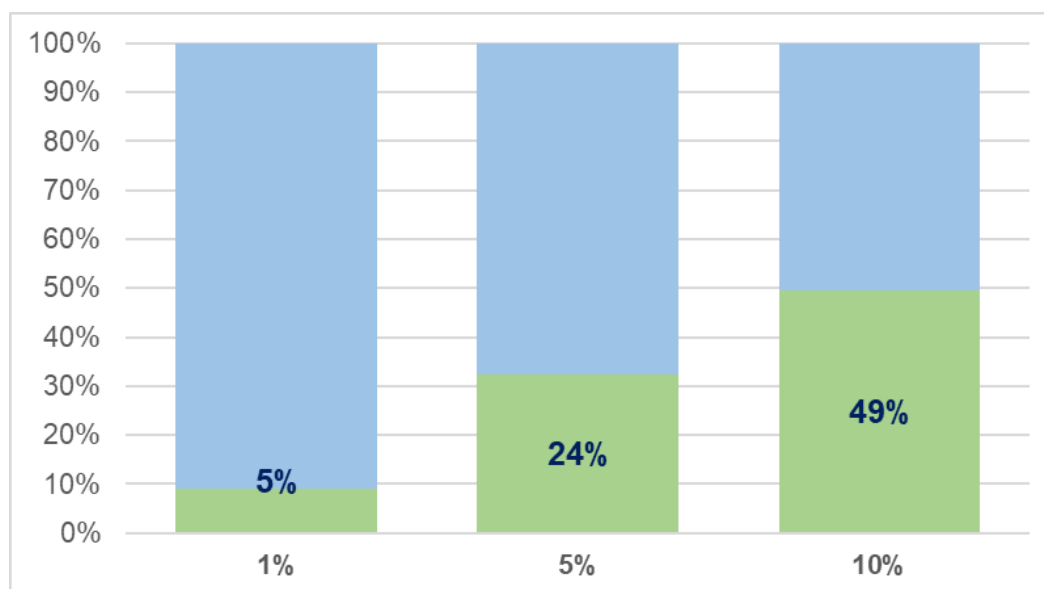


Figura 6. Escenarios de aprovechamiento del potencial energético (electricidad).

Los escenarios mostrados en la figura 6, se plantearon bajo el supuesto de aprovechamiento parcial del potencial teórico calculado, de la siguiente manera:

Escenario alto, supone un aprovechamiento del 10% del potencial teórico, dicho porcentaje representaría el 49% de la generación bruta. Escenario medio, supone un aprovechamiento del 5% del potencial teórico, este escenario representaría un 24% de aporte de la generación bruta. Escenario bajo, supone un aprovechamiento del potencial teórico del 1%, este escenario representaría un 5% de la generación bruta.

El mismo análisis de escenario se aplicó a la demanda de energía del año 2022, la cual fue de 4,833,234.89 MWh, en este caso el potencial teórico calculado representa 4.33 veces la demanda del país. En un escenario de aprovechamiento del 10% del potencial teórico representaría un 43% de la demanda, en un escenario medio representado por el 5% representaría un 22% de la demanda y en un escenario bajo de apenas un 1% de aprovechamiento del potencial teórico calculado representaría un 4% de la demanda de energía.

Este hallazgo, pone en evidencia que el aprovechamiento de al menos un porcentaje bastante conservador del potencial teórico calculado, representaría valores significativos dentro del mix energético del país, aunado a esto, se incrementaría la generación de energía renovable pudiendo desplazar generación con fuentes fósiles.

CONCLUSIONES

Esta investigación se considera un avance en el camino orientado al aprovechamiento energético de las excretas bovinas y a la reducción de las emisiones de metano asociadas, pudiéndolas capturar a un costo razonable y usándolo como fuente de energía limpia.

Los resultados de la investigación indican que la utilización de las excretas bovinas para producir biogás y con él, generar calor o electricidad resulta ser bastante atractivo, ya tiene un gran potencial energético. La prospección realizada a partir de los datos disponibles refleja que existe un potencial promedio de generación de biogás por departamento de más 16,250,000 m³/mes (Dieciséis millones doscientos cinco mil metros cúbicos) de biogás por mes, lo que equivale a más de 101,280 MWh/mes (energía eléctrica) o bien 81.84 TCal/mes (energía térmica).

El potencial total de generación de biogás del país se calculó en 275,490,674.22 m³/mes (Doscientos setenta y cinco millones cuatrocientos noventa mil seiscientos setenta y cuatro puntos veinte y dos metros cúbicos al mes), lo que equivale a 1,721,816.71 MWh/mes (Un millón setecientos veintiún mil ochocientos dieciséis puntos setenta y un Mega Watts hora por mes) o 1,391.23 TCal/mes.

Se elaboró una serie de mapas con información que muestran una perspectiva gráfica en cuanto a la distribución por departamento del ganado bovino, emisiones de metano y potencial para generar calor y electricidad a base de biogás producto de la biodigestión de las excretas del hato ganadero de Nicaragua para el año 2023.

REFERENCIAS

Baltodano A (2016) SuKarne apoyará a Nicaragua en el mejoramiento genético. (s/f). Ganaderia.com. Recuperado el 30 de octubre de 2023, de <https://www.ganaderia.com/destacado/SuKarne-apoyara-a-Nicaragua-en-el-mejoramiento-genetico>.

FUNIDES (2017): Cambio climático en el sector ganadero de Nicaragua. Serie económica Ambiental No. 2. <https://funides.com/wp-content/uploads/2017/04/cambio-climatico-sector-ganadero-nicaragua-abril-2017.pdf>

González, Roberto A. (2018). Planta de Biogás para el Rastro Municipal de Bluefields 2014 Estudio de Factibilidad Tecnológica.

INIDE-MAGFOR (2012): Informe final IV Censo Nacional Agropecuario. <https://www.inide.gob.ni/docs/Cenagro/INFIVCENAGRO/IVCENAGROINFORME/assets/common/downloads/Informe%20Final%20IV%20CENAGRO.pdf>

IPCC (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). Publicado por: IGES, Japón.

Pérez (2017) Evaluación del potencial de generación de estiércol como materia prima para la producción de biogás en la Zona Altamira, Tamaulipas. *Revista de Sistemas Experimentales Vol.4 No.10 34-40* https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol4num10/Revista_de_Sistemas_Experimentales_V4_N10_5.pdf

Paéz (sf) Gobierno de la Provincia de Buenos Aires (SF). Manual del Biogás. Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos. https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf

Vanero, M. (2011): Manual de Biogás. Santiago de Chile (Chile): MINERGÍA, PNUD, FAO. <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

SEMBLANZA DEL AUTOR



Marlon José Díaz Robleto: Graduado como Ingeniero Eléctrico en la Universidad Nacional de Ingeniería (2011), con maestría en Gerencia de Proyectos de Desarrollo (2013), Miembro del Comité Técnico a cargo de la revisión de la Norma Técnica Nicaragüense denominada: NTN 15 014 – 15 Cocinas Limpias: Métodos de Ensayo (2014), Miembro del Comité Técnico de Biogás a cargo de la revisión de la Norma Técnica Nicaragüense denominada: NTN 10 004 - 17 Biogás. Sistema de biodigestión tipo domo fijo (ladrillo de barro). Especificaciones de construcción (2017), con 16 años de experiencia habiendo desarrollado su práctica profesional como técnico, analista y especialista dentro del departamento de biomasa, biocombustibles y dendroenergía, actualmente colaborador en la Dirección de Energías Renovables Alternativas del Ministerio de Energía y Minas (MEM) y docente en la Universidad Tecnológica y de Comercio (UNITEC).