

ARTÍCULO ORIGINAL

Estimación del potencial energético técnico a partir de biomasa residual agroindustrial y pecuario en el Perú

Estimation of technical energy potential from agro-industrial and livestock residual biomass in Peru

Julio Manuel Reyes Chávez  ^{1a*} y Silvia Barrenechea Ramírez  ^{1b}

¹ Instituto Tecnológico de la Producción (ITP), Callao, Perú

^a jreyes@itp.gob.pe, ^b sbarrenechea@itp.gob.pe

* Autor de correspondencia

| Recibido: 23/03/22 |

| Arbitrado por pares |

| Aceptado: 15/06/22 |

Resumen

El desarrollo de las actividades productivas del sector agroindustrial y pecuario, generan grandes cantidades de residuos, que representa un problema ambiental. Para tratar estos residuos orgánicos y aprovechar la disposición de los mismos la digestión anaerobia (DA) es una tecnología eficiente. El objetivo del presente trabajo fue describir la metodología basada en lo propuesto por Baserga 1998; Santolaria, 2014 y VDI:4630 (2016), para determinar el potencial teórico de generación de biogás (PT) y su conversión a energía, potencial energético técnico (PET), a través del estudio de las características de la composición química proximal (CQP) y los volúmenes de producción de los principales residuos orgánicos agroindustriales de nuestro país según lo informado por el INEI del 2017 al 2019. Dentro de los residuos más importantes esta la caña de azúcar con 60 millones de toneladas por año (t/año) que pueden producir aproximadamente 30 mil GWh/año de PET. Para los residuos pecuarios el más abundante es el estiércol de ganado vacuno con 21 millones t/año. presentando un PET de 1718.9 GWh/año. Este valor aunado a los potenciales de los demás residuos analizados podría proporcionar un PET total de 46 mil GWh /año, que representa el 88% de los 52 mil GWh/año de la demanda



del Perú. La información obtenida podría servir de información preliminar para dar inicio a estudios de prefactibilidad de instalación de plantas de biogás que permitirían contribuir al desarrollo sostenible del país, valorizando los residuos orgánicos y produciendo energía limpia, preservando el medio ambiente.

Palabras claves: residuos agroindustriales; potencial energético técnico; potencial teórico de biogás; composición química proximal; biogás; digestión anaeróbica

Abstract

The development of productive activities in the agro-industrial and livestock sectors generate large amounts of waste, which represents an environmental problem. For the treatment and use of this organic waste, anaerobic digestion (AD) is an efficient technology. The objective of this research was to describe the methodology based on what was proposed by Baserga 1998; Santolaria, 2014 and VDI:4630 (2016), to determine the theoretical potential for biogas generation (TP) and its conversion to energy, technical energy potential (TEP), through the study of the characteristics of the proximal chemical composition (PCC) and the production volumes of the main agro-industrial organic waste in our country as reported by the INEI from 2017 to 2019. Among the most important waste is sugarcane with 60 million tons per year (t/year) that it can produce approximately 30 thousand GWh/year of TEP. For livestock waste, the most abundant is cattle manure with 21 million t/year, presented a TEP of 1718.9 GWh/year. This value, together with the potential of the other waste analyzed, could provide a total TEP of 46 thousand GWh/year, which represents 88% of the 52 thousand GWh/year of Peru's demand. The information obtained could serve as preliminary information to initiate pre-feasibility studies for the installation of biogas plants that would contribute to the sustainable development of the country, valuing organic waste and producing clean energy, preserving the environment.

Keywords: agro-industrial waste; technical energy potential; theoretical biogas potential; proximal chemical composition (CQP); anaerobic digestion

Introducción

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura define a la agroindustria, como el subconjunto del sector manufacturero que transforma materias primas y productos intermedios procedentes de la agricultura, la ganadería, la pesca, la actividad forestal y la producción de alimentos (Da Silva et al., 2013). Como resultado de estas actividades del sector agroindustrial, se genera ingentes cantidades de subproductos y/o residuos, que son considerados un problema ambiental (Restrepo et al., 2011). En el Perú las principales fuentes de residuos orgánicos agroindustriales, son los que provienen del procesamiento de caña de azúcar (6,376,907 t/año), arroz cáscara (5, 591,424 t/año), plátano (8, 051,997 t/año), maíz amarillo duro (859,789 t/año), palma aceitera (1,713,845 t/año) y espárragos (1,979,091 t/año). En el sector agropecuario se comprenden residuos ganaderos y avícolas (Retto, 2019; INEI, 2021).

Los residuos orgánicos, provenientes del sector agroindustrial, pueden ser aprovechados a través de la tecnología de la digestión anaerobia (DA) para la producción de biogás (Gonzales et al, 2015). La DA transforma la materia orgánica en biogás, mezcla de (metano, 60-70 %; dióxido de carbono, 30-40 %) (Balat, M. y Balat, H., 2009) y un bioabono que consiste en un efluente digerido estabilizado. (Varnero, 2011) La (DA) de un solo residuo (monosustrato) no siempre logra ser eficiente ya que la mayoría de los sustratos tiene una composición química con balance perfecto carbono nitrógeno (C:N 15:1 y 30:1) para una producción optima de biogás, por lo cual es necesario mejorarla con otros sustratos transformándose la técnica en un proceso de codigestión anaeróbica, donde se aprovecha las características diferentes de CQP de los sustratos logrando balancear las carencias de cada material, alcanzando un equilibrio adecuado para la estabilidad de las mezclas permitiendo incrementar la eficiencia de la codigestión, maximizando la producción de biogás y optimizando la calidad de los bioabonos. (Das y Mondal, 2016). Este proceso de codigestión, puede realizarse a partir de los múltiples sustratos orgánicos biodegradables que pueden ser el estiércol animal, residuos sólidos orgánicos urbanos y lodos de depuradora etc. Producíendose un mayor potencial en la generación de metano, dependiendo de las proporciones agregadas; coadyuvando al control de los impactos ambientales relacionados a la disposición de residuos orgánicos (Labatut & Pronto, 2018; Sarabia, Laines, Sosa & Escalante, 2017),valorizando los residuos al generar metano (CH₄), que puede ser aprovechado para la generación de calor y/o energía eléctrica, como también el digerido, empleado como fertilizante de suelos potenciando la actividad agrícola orgánica (Cárdenas et al., 2016); convirtiéndose en fuente de energía renovable, que responde a la demanda de un modelo sostenible de bajo impacto ambiental (Korberg et al., 2020).

Todos los residuos tienen una CQP diferente que es esencial conocer, para determinar si es rentable y/o sostenible su valorización mediante la producción de biogás. Con la CQP se puede determinar hasta qué límite pueden ser utilizados en digestión o codigestión anaeróbica y cuál será el procedimiento necesario, para su estudio a escala de laboratorio y su posterior uso

a nivel industrial. (VDI 4630, 2016 y Baserga 1998). Los residuos se clasifican según su composición y los procesos de los cuales se derivan, pueden ser de origen vegetal o animal de los cuales puede obtenerse diferentes cantidades de gas metano, en función del contenido de carbohidratos, grasas y proteínas (CQP). En la composición, los Sólidos totales (ST) es la parte seca del residuo, representa la cantidad de sólidos que contiene el sustrato puede ser muy variable, los contenidos óptimos de (ST) en las mezclas son del orden del 10 al 15%. Los Sólidos Volátiles (SV), contienen componentes orgánicos (Carbohidratos, Proteínas y Lípidos), es el volumen de masa orgánica que contiene el sustrato; importante ya que es el porcentaje real del contenido que produce biogás; el porcentaje de sólidos volátiles respecto al de sólidos totales (%SV) de los residuos orgánicos agroindustriales suele tener entre el 70 – 95% SV, residuos con porcentaje inferior al 60% SV no suelen considerarse buenos sustratos para la digestión anaerobia. La humedad contenida en los residuos no produce biogás, sin embargo, resulta imprescindible para que el proceso fermentativo se desarrolle adecuadamente a nivel microbiológico. (Liebetrau & Pfeiffer, 2020). Los materiales orgánicos biodegradables con contenido de lignina razonables (es decir que no sean madera) son sustratos excelentes para los procesos de producción de biogás. (Edwiges et al., 2018)

En el Perú se han realizado diversos estudios a nivel laboratorio aplicando diferentes metodologías, estos muestran que se ha logrado obtener biogás con hasta con un 74% de metano a partir de efluentes de una planta extractora de aceite de palma en la región Ucayali. (Panduro et al, 2020). Asimismo, se han realizado investigaciones para determinar el potencial de biogás por codigestión anaeróbica, con estiércol de ganado bovino combinados con residuos agroindustriales producidos en las regiones de Amazonas y Loreto (Barrena et al, 2019; Olortegui, 2019). En la región San Martín se estudió la producción de biogás con estiércol de ganado vacuno y residuos agroindustriales como torta de piñón, cascarilla de arroz y rumen de ganado bovino, logrando una producción de biogás de hasta un 49% de metano en la composición del biogás (Cornejo, 2012). En cuanto a la producción a nivel industrial existen algunas plantas instaladas para producir biogás y biofertilizantes superiores a 1.500 m³, otros de volúmenes intermedios superior a 100 m³, y biodigestores tubulares pequeños de 5 a 10 m³ (Peña et al., 2018). La información sobre la CQP de los residuos orgánicos producidos por actividades agroindustriales, en el Perú, es escasa, pero es posible la valorización tomando valores de estudios realizados en América del Sur y estudios previos realizados en el país. (Barrenechea et al., 2021)

Es necesario precisar que el potencial teórico de generación de biogás (PT), es un valor que está determinado por la cantidad total de biomasa que es producida o generada en forma de residuos sin considerar restricciones técnicas o económicas, consideradas en los estudios de factibilidad de instalación de plantas de biogás. El PET corresponde a la energía eléctrica y térmica que es posible generar a partir del biogás producido, aplicando restricciones tecnológicas a la conversión, fundamentalmente en términos de eficiencias eléctrica y térmica de los equipos de cogeneración (Navarro, 2017; Chamy et al., 2007).

En el Perú la energía proveniente de la biomasa, mediante la digestión anaeróbica, constituye solamente el 2.4% de la producción de energía primaria, siendo más importantes las provenientes del gas natural con un (70%), hidroenergía (10%) y la del petróleo crudo (8.2%) (MINEM, 2018).

El objetivo del presente trabajo fue describir la metodología basada en lo propuesto por Baserga 1998; Santolaria, 2014 y VDI:4630 (2016), para determinar el PT y su conversión a energía, PET, a través del estudio de las características de la composición química proximal (CQP) y los volúmenes de producción de los principales residuos orgánicos agroindustriales de nuestro país según lo informado por el INEI del 2017 al 2019

Material y métodos

La estimación del PT a partir de la biomasa residual y pecuaria, se realizó a partir de supuestos y aproximaciones metodológicas basadas en la información con que se cuentan en la bibliografía, con lo cual la confiabilidad de los resultados varía según el tipo de residuo de que se trate. Por tal razón, junto a los resultados, el estudio presenta tanto la información como la metodología usada, tal que permita a otros investigadores realizar sus propias estimaciones.

Para el desarrollo de este estudio se tomaron los datos de los principales cultivos agroindustriales y pecuarios (toneladas producidas por año), entre los años 2017 y el 2019, publicados por el Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI. Se calculó el promedio como medida de tendencia central para 12 tipos de residuos derivados de 7 cultivos agroindustriales y 3 residuos pecuarios (estiércoles) considerando para su elección los mayores volúmenes de producción tanto para mercado externo como interno. (INEI, 2021). En el caso de los residuos agroindustriales se consideró un factor residuo (producción de residuo con respecto al producto), establecida por cada autor para calcular a partir del producto las toneladas de residuo producido. (Ricce et al., 2013; Escalante et al., 2011 y Lock, 2018). Para los residuos de origen pecuario se utilizó el factor residuo establecido por Varnero (2011).

La caracterización CQP se estableció de acuerdo a la información encontrada en la bibliografía revisada. Se calculó la cantidad de carbono orgánico aplicando la Ecuación 1. Seguidamente se estableció la relación Carbono y Nitrógeno (C/N) para cada residuo según recomendado por Weinrich et al. (2018).

Ecuación 1

$$\% \text{ de Carbono orgánico} = \% \text{ materia orgánica} * 1.724$$

Donde: 1.724= factor de conversión

Los porcentajes de SV y ST (Ecuación 2) fue determinado según lo establecido por FAO

et al. (2019).

Ecuación 2

$$ST = 100 - \%H$$

$$SV = \%ST - CE (ST/100)$$

Donde: ST: Solidos Totales; SV: Solidos Volátiles; CE: Cenizas; H: Humedad

Para la determinación del potencial teórico de generación de Biogás y metano se utilizó como referencia lo recomendado por Baserga 1998 y Santolaria, 2014 (Tabla 1).

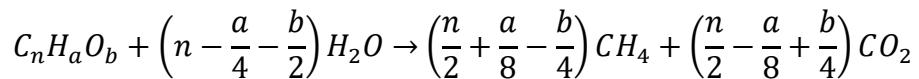
Tabla 1

Potencial de biogás de los compuestos orgánicos

Compuesto Orgánico	Baserga 1998	
	Biogás (L/Kg)	Metano (%)
Carbohidratos	790	50
Proteínas	700	71
Lípidos	1250	68

En la ecuación 3 se visualiza la obtención de los rendimientos teóricos biogás, metano (CH4) y dióxido de carbono (CO2).

Ecuación 3



Equivalencia de Biogás a energía eléctrica

FAO (2019) sugiere que para la conversión de biogás a energía eléctrica se considere un motor generador eléctrico de aproximadamente 500 Kilovatios (kVa) de un rendimiento de 42%, con lo cual es posible generar un equivalente de biogás en energía eléctrica, kilowatt hora por metro cubico (kWh/m3), de 2.2 de Biogás con 55% metano; dato que usamos para fines de este estudio.

Resultados

Los resultados promedios calculados a partir de la información del INEI entre el 2017 y 2019 muestran que los residuos agroindustriales más abundantes son el cogollo y bagazo de la caña de azúcar que juntos suman más de 60 millones de toneladas por año de residuos, le siguen los residuos de plátano (raquis y vástago) con alrededor de 9 millones de t/año y los residuos del arroz (Cascarilla y paja) con más de 9 millones de t/año. (Tabla 2). En cuanto a los residuos pecuarios, el más importante fue el de vacuno con 21 millones t/año de estiércol (Tabla 3).

Tabla 2

Cantidad promedio de los principales residuos agroindustriales producidos en Perú promedio 2017-2019 (INEI, 2021)

Producto	Producción (t)	Residuo vegetal	Factor residuo	Residuo (t)
Esparrago	372197.4	Peladilla	0.49 ¹	182376.7
Banano-plátano	1577764.7	Raquis	1.0 ²	1577764.7
		Vástago	5.0 ²	7888823.4
Arroz	3238342.4	Paja	2.35 ²	7610104.6
		Cascarilla	0.2 ²	647668.5
Caña de azúcar	10117801.5	Cogollo (hojas)	3.26 ²	32984032.8
		Bagazo	2.68 ²	27115707.9
Café	337004.9	Pulpa	0.44 ²	148282.2
		Cascarilla	0.21 ²	70771.0
Cacao	126543.8	Cascarilla	0.9 ³	113889.4
		Mucilago	0.02 ³	2530.9
Palma aceitera	860377.6	Fibra	0.63 ²	542037.9

Nota. 1. ¹Ricce et al.(2013). ²Escalante et al. (2011). ³Lock (2018)

Tabla 3

Cantidad promedio de los principales residuos pecuarios producidos en Perú promedio 2017-2019 (INEI, 2021)

Cabezas de ganado	Unidades	Factor residuo ¹ Kg/d	Residuo animal (t)
Vacuno	5785554.3	10	21117273.2
Porcino	3190178.9	2.25	2619934.422
Aves	161008225.8	0.18	10578240.44

Nota. ¹Varnero (2011); Kg/d: Kilogramo por día

Según las referencias bibliográficas consultadas los resultados de CQP son variables; estableciéndose en el caso de los residuos vegetales rango de composición para proteína total de 2.2% hasta 19.9%, carbohidratos totales 32.8% a 64.3%, grasa total 0.2% a 14.3%, ceniza 2.3% a 18.5% y humedad 2.4% a 94%. Encontrándose en los residuos pecuarios un alto contenido de Proteína total en el estiércol aviar de un 20.8% y un importante contenido de grasas totales en el estiércol porcino de 5.2%. (Tabla 4).

Tabla 4

Caracterización químico proximal (CQP) de los principales residuos agroindustriales y pecuarios producidos en el Perú

Residuo	H ¹ (%)	CE ¹ (%)	PT ¹ (%)	CT ¹ (%)	GT ¹ (%)	FT ¹ (%)	Autor
Esparrago-Peladilla	92.3	3.5	15.9	60.8	1.3	18.5	Patricio y Sifuentes, 2019.
Banano-Raquis	68.5	3.4	8.6	64.2	0.1	23.7	Neira, 2018.
Banano-Vástago	94.0	9.7	7.6	57.1	1.9	23.7	Boschini et al., 2015.
Arroz-Paja	9.2	18.5	4.2	34.3	1.0	42.0	MINAGRI-Chile, 1992.
Arroz-Cascarilla	2.8	16.1	3.9	32.8	0.2	47.0	Godoy et al., 2020.
Caña azúcar-Cogollo	75	6.4	4.9	59.7	0.7	28.3	Lagos y Castro, 2019.
Caña azúcar-Bagazo	55.4	2.3	2.2	61.8	0.4	33.3	Lagos y Castro, 2019.
Café-Pulpa	5.7	5.8	12.9	64.3	2.4	14.6	Godoy et al., 2020.
Café-Cascarilla	11.5	3.7	5.1	33.4	5.8	52.0	Soto, 2012.
Cacao-Cascarilla	9.0	7.1	19.9	33.5	14.3	25.1	Godoy et al., 2020.
Cacao-Mucilago	77.3	2.9	5.41	83.1	0.4	8.22	Arteaga, 2013.
Palma aceitera-Fibra	2.4	7.5	7.4	39.9	7.7	37.5	Godoy et al., 2020.
Estiércol Vacuno	93.37	12.8	8.6	49.8	2.1	26.7	Cornejo, 2012.
Estiércol Porcino	69.8	13.0	17.2	49.0	5.2	15.6	Riascos et al., 2018.
Estiércol Aviar	81.9	34.9	20.8	23.3	1.2	19.8	Mullo, 2012.

Nota. ¹Base seca. H: Humedad; CE: Cenizas; PT: Proteína Total; CT: Carbohidratos totales; GT: Grasa total; FT: Fibra total

Los residuos agroindustriales que por sus características de CQP tiene el mayor PT son los residuos del procesamiento de palma aceitera los que podrían producir hasta los 739 m3/t SV, con un contenido de metano de 397 m3/t SV. Otro de los residuos importantes fue la cascarilla de café con 732 m3/t SV de biogás y 385 m3/t SV de metano; finalmente la cascarilla de arroz con 708 m3/t SV de biogás y 361 m3/t SV de metano. Los residuos vegetales que presentaron mejor balance (C/N) fue la pulpa de café, la peladilla de esparrago y el raquis del banano con 21,31 y 17 de relación (C/N) respectivamente. En cuanto a los residuos pecuarios el estiércol vacuno fue el de mejor potencial, ya que puede llegar a producir Biogás hasta 634 m3/t SV con un contenido de 333 m3/t SV de metano con un balance C/N de 29.2 (Tabla 5).

Tabla 5*Potencial teórico de Biogás y metano de residuos agroindustriales y pecuarios*

Residuo	C/N	ST	SV	Biogás (m³/t SV)	Metano (m³/t SV)	Biogás (m³/t)	Metano (m³/t)
Esparrago-Peladilla	17.5	7.71	96.5	547	293	41	22
Banano-Raquis	31.8	31.50	96.6	665	344	202	105
Banano-Vástago	34.0	6.00	90.3	673	351	36	19
Arroz-Paja	54.9	90.80	81.5	712	365	527	270
Arroz-Cascarilla	60.4	97.20	83.9	708	361	578	294
Caña azúcar-Cogollo	53.9	25.00	93.6	710	363	166	85
Caña azúcar-Bagazo	124.4	44.60	97.7	711	359	310	157
Café-Pulpa	21.2	94.30	94.2	592	315	526	280
Café-Cascarilla	55.3	88.55	96.3	732	385	624	328
Cacao-Cascarilla	14.9	91.10	91.1	547	316	463	268
Cacao-Mucilago	50.5	22.66	97.1	708	362	156	80
Palma aceitera-Fibra	37.4	97.60	92.5	739	397	667	358
Estiércol vacuno	29.2	6.63	87.2	634	333	37	19
Estiércol porcino	15.2	30.20	87.0	560	310	147	81
Estiércol aviar	9.3	18.10	65.1	462	262	54	31

Nota. t: toneladas; C/N: Relación Carbono-Nitrógeno; SV: Solido Volátil; ST: Solido Total

Fuente: Elaboración propia

La estimación del PT, muestra que los residuos de la caña (bagazo y cogollo) son los que presentan la mayor cantidad y el PET más alto de todos los residuos para este estudio, llegando en conjunto a sumar más de 30 mil GWh/año. Otros de los residuos importantes fue la pajilla de arroz con un PET de 8823.2 GWh/año. El estiércol vacuno, dentro de los residuos pecuarios, es el más importante presentado un valor de 1718.9 GWh/año. (Ver Tabla 6 y Gráfico 1). En conjunto los PET de residuos agroindustriales y pecuarios suman un potencial total de 46531.7 GWh/año.

Tabla 6

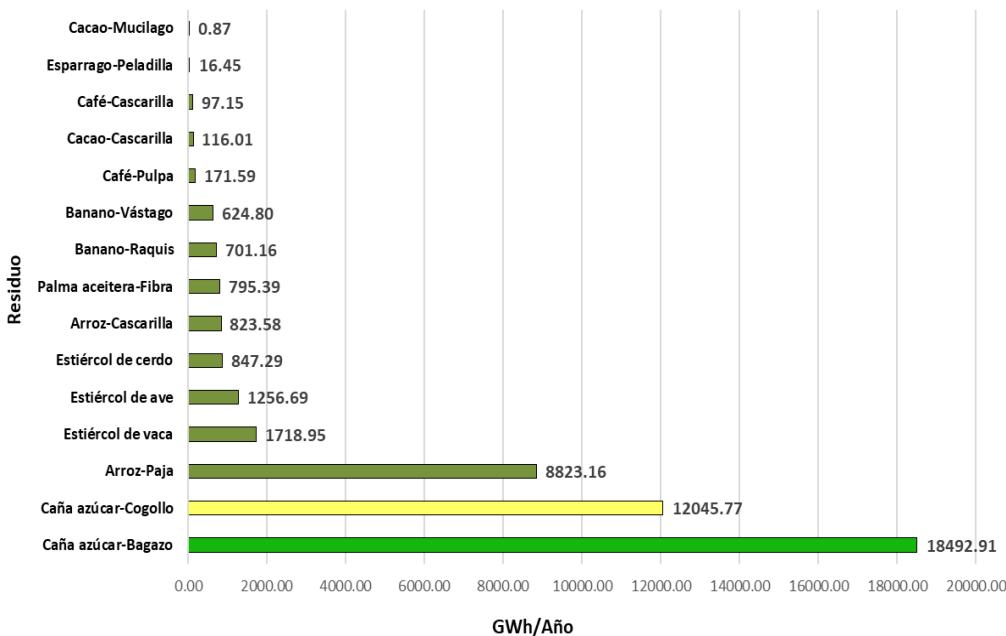
Potencial teórico de generación de Biogás residuos agroindustriales y pecuarios en el Perú en el periodo de un año

Residuo	Residuos producidos (t)	Potencial de Biogás (m ³)
Caña azúcar-Bagazo	27115707.9	8 405 869 449
Caña azúcar-Cogollo	32984032.8	5 475 349 445
Arroz-Paja	7610104.6	4 010 525 124
Arroz-Cascarilla	647668.5	374 352 393
Palma aceitera-Fibra	542037.9	361 539 279
Banano-Raquis	1577764.7	318 708 469
Banano-Vástago	7888823.4	283 997 642
Café-Pulpa	148282.2	77 996 437
Cacao-Cascarilla	113889.4	52 730 792
Café-Cascarilla	70771	44 161 104
Esparrago-Peladilla	182376.7	7 477 444
Cacao-Mucilago	2530.9	394 820.4
Estiércol vacuno	21117273.2	781 339 108
Estiércol aviar	10578240.44	571 224 983
Estiércol Porcino	2619934.422	385 130 360
TOTAL	113199438.06	21150796853

Nota. 1m³ Biogás =2.2kWh

Gráfico 1

Potencial de generación energético técnico de residuos agroindustriales anuales en el Perú



Nota. *Giga watts hora: GWh

Discusión

Para obtener resultados, auspiciosos, en la generación de energía mediante la DA se debe conjugar factores como los volúmenes y disponibilidad de los residuos frente a su capacidad de producir Biogás, que esta función de la CQP que deriva en el contenido SV que es el generador de metano en la composición del biogás. Otros factores como el balance C/N y el contenido de lignina determinan la forma de uso del residuo. Es decir, si este puede producir biogás de forma óptima como monosustrato o si requiere de otros residuos para optimizar la producción de biogás que coincide con lo encontrado por Das y Mondal (2016).

Los residuos de caña de azúcar son los que tienen mayores volúmenes de residuos y podrían producir hasta 30 mil de GWh/año de PET y 711 m3/t SV de PT (Grafico1 y Tabla 5), no obstante, el residuo que mostro mejor capacidad de producir biogás fue el residuo derivado de la palma aceitera que pudo alcanzar un PT de 739 m3/t SV (Tabla 5), similar al cálculo experimental realizado por Suksong et al. (2016) y un PET de 795.39 GWh/año que no compite con los volúmenes de producción de residuos de caña de azúcar.

En la mayoría de los casos todos los residuos agroindustriales vegetales son susceptibles de emplearse en proceso de codigestión anaerobia debido a que los balances C/N indican que deben conformar mezclas para optimizar la producción de Biogás como lo recomienda Das y Mondal. (2016). Para los residuos como los pecuarios el mejor PET la tuvo el estiércol de ganado vacuno con 1718.95 GWh/año (Grafico 1) con un balance C/N de 29.2 y un contenido de SV de 87.2 (Tabla 5) lo cual lo convierte en excelente residuo que puede actuar como monosustrato para producción optima de Biogás confirmando lo analizado por Varnero, (2011).

Los resultados de pruebas experimentales de laboratorio, por lo general proporcionan valores por debajo de los calculados por el método de PT donde se aplica el método estequiométrico propuesto por Santolaria, (2014), empleado para este estudio. Donde se considera que toda la materia orgánica disponible se convierte en biogás, los datos obtenidos no tienen en cuenta factores importantes como los biológicos y fisicoquímicos, considerados en los estudios experimentales de laboratorio, como puede ser la proporción de lignina como fibra bruta presente en el sustrato, la cual no es fácilmente biodegradable por DA y factores técnicos como disponibilidad, accesibilidad y estacionalidad que son importantes de considerar.

Se ha determinado que si se sumaran todos los PET obtenidos de residuos de origen agroindustrial y pecuarios (Grafico 1), producidos anualmente en el Perú se obtendría un estimado de PET total de más de 46 mil GWh/año, lo cual representa el 88% de la producción total de energía generada en el Perú en el 2019 que fue de 52 mil GWh/año (MINERGI, 2020)

Debe acotarse que no todos los residuos orgánicos producidos por la Agroindustria y actividades pecuarias están totalmente disponibles y/o accesibles, lo cual reduciría en la práctica, la cantidad de energía que se podría producir a partir de ellos, además se debe tener

en cuenta factores tecnológicos y/o ambientales para la implementación de esta tecnología. Por eso es necesario ensayos de laboratorio que sustente estudios de prefactibilidad e instalación de una planta productora de biogás sostenible, o de ser el caso el uso del residuo en otro tipo de proceso tecnológico de valorización.

Conclusiones

Los cálculos del PET sobre conocimiento de la CQP y los volúmenes de residuos agropecuarios y pecuarios indican que el Perú podría contar con un PET 46 mil GWh /año, que representa el 88% de los 52 mil GWh/año que el Perú demanda. Esta información puede usarse como referencia para iniciar estudios de pre factibilidad, que permitan la instalación de plantas de biogás. Explotar este potencial podría contribuir al país en su desarrollo sostenible, valorizando los residuos orgánicos generados para producir energía limpia, mejorando las condiciones medioambientales al reducir la emisión de CO₂.

Contribución de autoría

Julio Reyes Chávez, cálculos y determinación de los PET, PT, análisis de resultados y redacción del artículo.

Silvia Barrenechea Ramírez, revisión e interpretación de resultados y redacción del artículo.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés con la fuente o propiedad de los datos usados.

Referencias bibliográficas

Arteaga, Y. (2013). estudio del desperdicio del mucilago de cacao en el cantón naranjal (provincia del Guayas). *Revista ECA Sinergia*, 4(4), 49-59.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6197548>

Balat, M. & Balat, H. (2009). Biogas as a Renewable Energy Source—A Review .*Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(14), 1280-1293.

<https://doi.org/10.1080/15567030802089565>

Barrena, M., Cubas, F., Gosgot, W., Ordinola, C., Rascon, J. (2019). System for the production of biogas and biofertilizers from bovine manure, Molinopampa.

<http://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26214>

- Barrenechea, S., Reyes, J., Ayala, M., & Steinmetz, R. (2021). Valorización energética de macroalgas marinas, residuos pesqueros y de vegetales como sustrato de codigestión anaerobia en la Bahía de Pucusana, Lima-Perú. *Revista Red de Biodigestores para Latinoamérica y el Caribe*, 5, 9-14. <https://bit.ly/3zjqqng>
- Baserga, U. Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen-Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras. *FAT-Berichte*. (1998). 512, 1-11. <https://bit.ly/3Plax0k>
- Boschini, C. Russo, R. Chacon, P. 2015. El vástago de banano: un banco forrajero para afrontar los cambios climáticos. *Revista Oficial Horizonte Lecherío*, 2(6), 48-50. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/75261>
- Cárdenes, L., Parra, B., Torres, P. y Vásquez, C. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Ion*, 29(1), 95-108. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>.
- Chamy, R., Vivanco, E., & Escuela de Ingeniería Bioquímica, PUCV. (2007). *Potencial de Biogás. Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de Biogás*. GTZ. <https://bit.ly/3zd73Mn>
- Cornejo. (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 de Ingeniería, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. <https://bit.ly/3Sabb8G>
- Da Silva, C., Baker, D., Shepherd, A., & Jenane, C. (Eds.). (2013). Agroindustrias para el desarrollo. FAO. <https://www.fao.org/3/I3125s/I3125s.pdf>
- Das, A. y Mondal, C. (2016). Biogas Production from Co-digestion of Substrates: A Review. *International Research Journal of Environment Sciences*, 5(1), 49-57. <https://bit.ly/3vgAlml>
- Edwiges, T., Frare, L., Mayer, B., Lins, L., Mi Triolo, J., Flotats, X., & de Mendonça Costa, M. S. S. (2018). Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. *Waste Management*, 71, 618–625. <https://bit.ly/3OE0x5n>
- Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M., & Duarte, M. (2011). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Bucaramanga (Colombia)*. Universidad Industrial de Santander. <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1058>
- FAO, Ministerio de Producción y Trabajo, & Ministerio de Hacienda. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el bogás y los biodigestores: Colección Documentos Técnicos*. 12. <https://bit.ly/3S40UuB>
- Godoy, D. Daza, R. Fernandez, L. Laysa, A. Roque, R. Hidalgo, V. Gamarra, S. Gomez, C. (2020). Caracterización del valor nutricional de los residuos agroindustriales para la alimentación de ganado vacuno en la región de San Martín, Perú. *Cienc. Tecnol. Agropecuaria*, 21(2), 41640. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num2_art:1374
- Gonzales M.E., Pérez S.F., Wong A.B., Bello R. y Yañez G. Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*.2015; 47(3):229-235. <https://bit.ly/3Q9Hdjn>

- INEI. (2021). *Principales indicadores macroeconómicos 2014–2020*. <https://bit.ly/3OKyOS8>
- Korberg, A., Skov, I., & Mathiesen, B. (2020). The role of biogas and biogas-derived fuels in a 100% renewable energy system in Denmark. *Energy*, 199, 1–11. <https://bit.ly/3beJKKj>
- Labatut, R., & Pronto, J. (2018). Sustainable waste-to-energy technologies: anaerobic Digestion. *Sustainable Food Waste-To-energy Systems*, 47–67. <https://bit.ly/3zHQUjo>
- Lagos, E & Castro, E. (2019). Caña de azúcar y subproductos de la agroindustria azucarera en la alimentación de rumiantes. *Agronomía Mesoamericana*, 30(3), 917-934. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v30i3.34668>
- Liebetrau, J., & Pfeiffer, D. (Eds.). (2020). *Collection of Methods for Biogas Methods to determine parameters for analysis purposes and parameters that describe processes in the biogas sector*. DBFZ. <https://bit.ly/3vqmekt>
- Lock, D. (2018). Potencial energético de los residuos de la cadena de valor del cacao (*Theobroma Cacao*) en la Región Madre de Dios [Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3660>
- MINAGRI Chile. 1992. *Tablas de composición de alimentos para ganado de las zonas centro y centro sur de Chile*. Pontificia Universidad Católica de Chile Facultad de Agronomía Departamento de Zootécnica. <https://bit.ly/3vtSnr9>
- MINEM.2018. Balance Nacional de Energía. Dirección general de eficiencia energética área de planeamiento energético. <https://bit.ly/3vqbDFW>
- MINERGI. (2020). Balance Nacional de Energía 2018. <https://bit.ly/3zHTExc>
- Mullo, I. (2012). *Manejo y procesamiento de la Gallinaza*. [Tesis de Ingeniería, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias Pecuarias]. <https://bit.ly/3JiSAMa>
- Navarro, N. (2017). *Potencial técnico para la producción de biogás generado a partir de residuos orgánicos producidos en la comuna de independencia*. [tesis de Maestría, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza]. <https://bit.ly/3cLGHcR>
- Neira, O. (2018). *Obtención y caracterización de harina de raquis de banano (*musa paradisiaca*)*. [Tesis de Ingeniero, Universidad de Sipán]. <https://bit.ly/3biq08A>
- Olórtegui, C. (2019). *Producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos de: chonta (*Bactris gasipaes*), Plátano (*Musa paradisiaca*), yuca (*Manihot esculenta*) y Naranja (*Citrus sinensis*); obtenidos del mercado Belén-Iquitos departamento de Loreto-Perú* [Tesis de Ingeniero, Universidad Científica del Perú. Loreto-Perú]. <https://bit.ly/3cL3dT7>
- Panduro, G., Calderón, R., Herrera, S., Iannacone, J. (2020). Biological purification of biogas from oil palm plant sludge, using Microalgae. *The biologist* (lima) . ,18 (1),135-145. https://www.unu.edu.pe/portal/pdf/2020/Articulo_Cientifico.pdf
- Patrício, V. y Sifuentes, E. (2019). *Efecto de la técnica de secado y solvente en la determinación de polifenoles y actividad antioxidante de residuos de esparrago*. [Tesis de Ingeniero, Universidad Nacional del Santa]. <https://bit.ly/3cRZIdK>
- Peña J., Castro J., Mestas S., Fernando Mejía, Cárdena L., Roque F., Reátegui J., Salazar I. (2018). Presurización y uso de biometano como sustituto de combustibles fósiles en el sector agrícola en Arequipa, Perú. *Revista RedBiolac*, 2, 28-32. <https://bit.ly/3oH2SDS>

- Restrepo, A., Sandoval, E., Manjarres, P. (2011). Cortezas de naranja comestibles: una aproximación al desarrollo de productos con valor agregado a partir de residuos agroindustriales. *Producción + Limpia*, 6(2), 47-57. <https://bit.ly/3OJ6HmC>
- Retto, H. (2019). *Potencial de la producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales lignocelulósicos en el Perú*. [Tesis de Ingeniero, Universidad Nacional de Trujillo]. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/12153>
- Riascos, A. Apraez, J. Vargas, D. Londoño, A. (2018). Efecto de la suplementación con ensilaje de estiércol porcino sobre los indicadores productivos en bovinos Hartón del Valle. *Orinoquia*, 22(1), 34-40. <https://bit.ly/3Jeg5NP>
- Ricce, C., Leyva, M., Medina, I., Miranda, J., Saldarriaga, L., Rodriguez, J., & Siche, R. (2013). Uso de residuos agroindustriales de la libertad en la elaboracion de un pan integral. *Agroindustrial science*, 3, 41–46. <https://doi.org/10.17268/agroind.science.2013.01.05>
- Santolaria, C. 2014. Diseño de un modelo semiempírico de codigestión anaerobia. Proyecto de fin de carrera. Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza. <https://bit.ly/3PLy2Wu>
- Sarabia, M., Laines, J., Sosa, J., & Escalante, E. (2017). Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 109–116. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.01.10>
- Soto, M. (2012). Desarrollo del proceso de producción de cascarilla de semilla de cacao en polvo destinada al consumo humano. [Tesis de Ingeniero, Universidad Simón Bolívar]. <https://bit.ly/3vpjbJ4>
- Suksong, W., Kongjian, P., Prasertan, P., Imani, T., O-Thong, S. (2016). Optimization and microbial community analysis for production of biogas from solid waste residues of palm oil mill industry by solid-state anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 2014, 166-174. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.077>
- Varnero M., 2011. Manual de biogás. FAO. <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- VDI 4630.2016. *Fermentation of organic materials-Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*. Germany: Verein Deutscher Ingenieure. <https://bit.ly/3v0Ubrp>
- Weinrich, S., Schäfer, F., Bochmann, G., y Liebetrau, J., (2018). *Value of batch tests for biogas potential analysis; method comparison and challenges of substrate and efficiency evaluation of biogas plants*. IEA Bioenergy Task 37. <https://bit.ly/3PCquot>