

Valorización energética de macroalgas marinas, residuos pesqueros y de vegetales como sustrato de codigestión anaerobia en la Bahía de Pucusana, Lima-Perú

Estudio de caso



Silvia Barrenechea Ramírez¹; Julio Reyes Chávez¹; María Estela Ayala^{1*}; Ricardo Steinmetz²

¹ITP red CITE. PERU, ²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

*mayala@itp.gob.pe

Resumen

Se realizaron cálculos de valorización energética a ser obtenidos mediante codigestión anaerobia, utilizando datos de composición química proximal (CQP) de macroalgas marinas, de residuos de pescado y de vegetales generados por actividades comerciales en la Bahía de Pucusana (Lima-Perú). Tres mezclas fueron diseñadas según recomendaciones de Chen (2007) y VDI 4630 (2016), denominadas M1 (74 % SV-30C/N, residuos de pescado, zapallo y uva), M2 (71 %SV- 30C/N, macroalga verde, residuos de maíz y zanahoria) y M3 (75 % SV-20 C/N (macroalga parda, residuos de zapallo y beterraga). Estos generarían 520,0, 462,8 y 521,0 m³/kg SV, equivalentes a 3122,4, 2776,6 y 3128,9 kWh respectivamente. Los datos obtenidos contribuyen a gestionar residuos para producir y utilizar biogás en la Bahía de Pucusana, mejorando sus condiciones ambientales, sanitarias y turísticas del lugar, con un aporte estimado entre 353 y 678 kWh durante el año y un valor máximo en el mes de junio (1178 kWh).

Palabras clave:

Macroalgas; Residuos pesqueros; Residuos vegetales; Máximo potencial de biogás; Composición química proximal (CQP).

Energy valuation of marine macroalgae and fishery and vegetable wastes as anaerobic codigestion substrate in Pucusana Bay, Lima-Perú

Abstract

Calculations of energy recovery of wastes to be processed by anaerobic codigestion (ACoD) were carried out using chemical proximate composition data of seaweed and fish and vegetable wastes generated by commercial activities in the Bay of Pucusana (Lima-Peru). Three mixtures were designed according to Chen (2007) and VDI 4630 (2016) recommendations, M1 (74 % SV-30 C/N, fish, pumpkin and grape wastes), M2 (71 % SV-30 C/N, green macroalgae, corn and carrot wastes) and M3 (75 %/ SV-20 C/N brown macroalgae, pumpkin and beet wastes). Estimated energy values of these residues mixtures would be 520.0, 462.8 y 521.0 m³/kg SV, equivalent to 3122.4, 2776.6 and 3128.94 kWh respectively. Data obtained suggest an important contribution to waste management in Pucusana Bay to produce and use biogas, improving environmental, sanitary and touristic conditions of the site, with an estimated input between 353 and 678 kWh during the year with a maximum pike in June (1178 kWh) was calculated.

Keywords:

Seaweed, Fishery and vegetable wastes, Biogas maximum potential, Chemical proximate, Chemical composition.

Forma de citar: Barrenechea Ramírez, S., Reyes Chávez, J., Ayala, M. S., y Steinmetz, R. Valorización energética de macroalgas marinas, residuos pesqueros y de vegetales como sustrato de codigestión anaerobia en la Bahía de Pucusana, Lima-Perú. RedBioLAC, 5, 9-14.

Introducción

La codigestión anaerobia (CoDA) como tecnología eficiente transforma residuos orgánicos en fuentes de energía renovable, mitigando el impacto al ambiente. La CoDA utiliza dos o más tipos de residuos a fin de alcanzar el equilibrio Carbono/Nitrógeno (C/N) adecuado para la estabilidad de la mezcla. La mezcla de sustratos asegura la digestión eficiente, optimiza la producción de biogás y la calidad de los biofertilizantes (FAO 2019). La idoneidad y cantidad de cada sustrato determinan la sinergia para producir metano utilizando carbohidratos y lípidos (Keymer & Schilcher 2003 a partir de Baserga 1998).

Las actividades pesqueras son muy importantes en Perú y originan volúmenes considerables de residuos. En la bahía de Pucusana abundan algas verde y parda (*Ulva sp*, *Macrocystis sp*) generalmente varadas a orillas del mar generando problemas de contaminación ambiental (Vásquez 2009). Las macroalgas marinas también representan gran aporte para producir biogás por su abundancia y disponibilidad, son fuentes ricas de carbohidratos (hasta 60 %), proteína (7 % –16 %), bajas cantidades de lípidos (1 % –3 %) y contenido variable de cenizas (18 % –53 %) (Barbot *et al.*, 2016). En pescado (bonito, caballa, cabinza, cachema, lorna, camotillo, jurel, lisa, machete, merluza, pejerrey y perico) las cantidades de residuo respecto a especie entera varían entre 51,82 a 63,95 % (Barriga *et al.*, 2012). Los residuos vegetales se caracterizan por elevados contenidos de humedad (mayor al 80 %) y Sólidos Volátiles (SV) que pueden superar 95 % de sólidos totales (ST) (Vereda *et al.*, 2006); sin embargo, los elevados contenidos de lignocelulosa no facilitan la biodegradación (Edwiges *et al.*, 2018).

González *et al.* (2015) y Varnero (2011) refieren que la eficiencia de producción energética depende de la

composición química proximal (CQP) y del tipo y origen del residuo; al respecto, diversas metodologías han sido desarrolladas para el cálculo de potencial de biogás a partir de las macromoléculas componentes de los residuos y sus mezclas (Weinrich *et al.*, 2018 y VDI 2016).

Considerando la escasa información en Perú sobre el aprovechamiento y valorización de residuos orgánicos, este trabajo estima el potencial energético obtenido a partir de macroalgas y residuos pesqueros y vegetales, muy abundantes en el desembarcadero pesquero artesanal (DPA) y el mercado de Pucusana. Los resultados aportan al manejo ambiental y mejora de condiciones higiénico sanitarias, sociales y económicas en esta zona de intensa actividad pesquera y alto valor paisajístico y recreacional.

Descripción del caso

Pucusana, distrito ubicado en la bahía del mismo nombre, en la costa sur de Lima, desarrolla actividades recreativas y pesqueras (**Figura 1**), estas últimas generan grandes volúmenes de residuos obtenidos del corte y evisceración, especialmente entre mayo a julio, (194 toneladas) y disminuyendo desde agosto. Próximo al DPA están ubicados dos mercados de abasto, generadores de considerables cantidades de residuos vegetales (frutas, hortalizas y tubérculos) y cuya segregación se observa no es permanente. Una tercera fuente de residuos está constituida por enormes cantidades de macroalgas (aproximadamente 2 toneladas diarias), cuyo recojo está a cargo del Servicio Municipal del distrito, alga verde (AV) abundante entre enero a marzo y alga parda (AP) presente durante todo el año, su presencia contamina y afecta el desarrollo de la productividad marina y el ornato del balneario. Las actividades descritas y metodologías de trabajo se indican en la **Tabla 1** y la **Tabla 2**, muestra los códigos asignados a las muestras.



Figura 1 | Bahía de Pucusana Lima-Perú.

Fuente: Propia.

Tabla 1 | Etapas de desarrollo del estudio.

Etapa 1: Evaluación y Análisis (VDI 2016)
Evaluación de tipos de residuos de la zona
Selección de residuos y tomas de muestra.
Caracterización de la CQP de los residuos
Etapa 2: Determinación de cálculos para estimar el Potencial de Biogás (Mojica <i>et al.</i> , 2016)
Determinación de valores de ST
Determinación de SV
Determinación de carbono orgánico total (%COT)
Determinación de la relación C/N.
Etapa 3: Diseño de las Mezclas de residuos (Chen <i>et al.</i> , 2008 y VDI 2016; Keymer & Schilcher 2003 a partir de Baserga 1998)
Estimación del Máximo Potencial de Metano (Mpt-M)
Determinación de la equivalencia MPt-M y valorización energética
Selección de las mezclas de residuos para producir Metano

Fuente: (Elaboración Propia).

Tabla 2 | Códigos de identificación de los residuos.

Residuo	Descripción	Residuo	Descripción
VOI	Vísceras pejerrey– cabinza.	PFZ	Panca fresca Maiz.
RIC	Residuos cabinza – perico.	DAG	Descarte apio.
ECO	Espinazo y cola pejerrey.	HBV	Hojas betarraga.
VCO	Vísceras y cabeza pejerrey.	CCS	Cascara naranja.
VIM	Vísceras cabinza - lisa.	CCM	Cascara zapallo.
CIC	Cabeza, cola, cabinza.	CDC	Cascara zanahoria.
VCCO	Víscera, espinazo pejerrey.	CST	Cascara papa.
AV	Alga verde.	DVV	Descarte uva de mesa.
AP	Alga parda.	PCM	Pulpa y semilla zapallo.

Fuente: (Elaboración Propia).

Los residuos fueron sometidos a análisis de humedad, ceniza, nitrógeno total y carbohidrato total (referidos en valores porcentuales de Composición Química Proximal, CQP) en los Laboratorios de Físicoquímica del Instituto Tecnológico de la Producción (ITP Red CITE) sede Callao.

Los resultados fueron utilizados en el cálculo de los valores sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), balance carbono/nitrógeno (C/N) y carbono orgánico total (COT) (Mojica *et al.*, 2016) (Tablas 3 y 4).

Tabla 3 | Composición Química Proximal de los residuos (g/100 g).

Residuo	Humedad ²	Ceniza ^{1,2}	Grasa ^{1,2}	Fibra ^{1,2}	Proteína ^{1,3}	Carbohidrato ^{1*}
VOI	75,88	12,94	10,78	Nr	58,98	17,31
RIC	77,85	7,14	6,21	Nr	70,32	16,33
ECO	73,20	29,25	6,08	Nr	55,21	9,46
VCO	67,13	12,20	17,86	Nr	34,13	35,81
VIM	71,81	5,57	33,20	Nr	45,85	15,38
CIC	69,64	26,18	24,70	Nr	43,41	5,71
VCCO	78,46	13,83	12,31	Nr	59,63	14,24
AV	88,79	13,35	3,91	9,04	32,63	41,07
AP	84,60	24,87	1,82	5,00	30,44	37,87
PFZ	80,50	2,84	0,44	22,53	3,72	70,47
DAG	92,27	23,76	2,69	19,48	21,02	33,05
HBV	91,94	30,18	5,82	17,24	29,10	17,66
CCS	71,77	4,46	3,64	16,94	7,48	67,48
CCM	94,15	10,09	4,73	22,72	9,80	52,66
CDC	90,84	14,41	3,47	18,32	3,60	60,20
CST	85,81	9,02	1,03	9,62	15,01	65,31
DVV	84,61	6,63	3,05	29,76	3,25	57,31
PCM	84,83	8,50	22,41	6,39	28,43	34,26

(1) base seca. Nr = no realizado. (*) Por diferencia. (2) Desviación estándar relativa (DER) = 0,5 % (3) DER = 0,7 %.

Tabla 4 | Valores Calculados de Máximo Potencial de Biogás en los residuos.

		C/N	Solidos Totales (ST)	Solidos Volátiles (SV)	Biogás (m ³ /t SV)	Metano (m ³ /t SV)	kWh
Residuos pesqueros	VOI	5,0	24,1	87,1	472	312	2832
	RIC	4,4	22,2	92,9	452	302	2712
	ECO	4,3	26,8	70,8	456	308	2736
	VCO	8,7	32,9	87,8	509	316	3054
	VIM	7,7	28,2	94,4	545	363	3270
	CIC	6,4	30,4	73,8	535	364	3210
	VCCO	4,9	21,5	86,2	476	318	2856
Macroalgas	AV	8,1	11,2	86,7	466	272	2796
	AP	7,5	15,4	75,1	459	268	2754
Residuos vegetales	PFZ	73,4	19,5	97,2	710	361	4260
	DAG	10,8	7,7	76,2	508	285	3048
	HBV	7,6	8,1	69,8	475	285	2850
	CCS	37,0	28,2	95,5	720	378	4320
	CCM	27,0	5,9	89,9	644	344	3864
	CDC	68,6	9,2	85,6	724	376	4344
	CST	17,5	14,2	91,0	546	292	3276
	DVV	82,3	15,4	93,4	722	372	4332
PCM	11,0	15,2	91,5	569	350	3414	

Fuente: (Datos obtenidos aplicando metodología de Keymer & Schilcher 2003 a partir de Baserga 1998).

Los elevados contenidos de ceniza en todo sustrato guardan relación con valores bajos de SV, los datos de la **Tabla 3** indican que estos son elevados en residuos pesqueros con partes óseas, como en el caso de las muestras VCO - los cuales además producen mayores valores de ST (**Tabla 4**)- a diferencia de los conformados por partes blandas (RIC y VIM). También en los dos tipos de macroalgas se determinó elevados valores de ceniza, además de proteína y carbohidratos y un bajo contenido graso. En residuos vegetales, los contenidos de ceniza fueron muy variables (2,84 % en PFZ y 30,18 % en HBV) y los tenores grasos fueron bajos, excepto en PCM (pulpa y semilla de zapallo). Respecto al desequilibrio de nutrientes que favorece la inhibición de bacterias metanogénicas, Varnero (2011) recomienda que el C/N en rangos de 20 a 30 asegura la estabilidad del proceso. También Bouallagui *et al.* (2005) comentan este comportamiento y añaden que los elevados valores de carbono generan ácidos grasos volátiles acidificantes del medio y ralentizantes del crecimiento

microbiano. La elevada humedad de residuos vegetales favorece la CoDA; en la selección de mezclas no se consideró CCS, PFZ, DVV y CDC, aunque presentan elevado valor ST, por su conocido contenido lignocelulósico y pectínico que interfiere en la generación de metano (Christensen *et al.*, 2020 y Edwiges *et al.*, 2018).

Los valores SV son determinantes para una CoDA eficiente, valores mayores a 70 son recomendados (Baserga 1998). Las vísceras de pescado con altos contenidos de SV son fácilmente digeridas, su alto valor nitrogenado y graso complementa favorablemente las mezclas con residuos vegetales, de acuerdo con las recomendaciones de Chen (2007), estos podrían ser incorporados en las mezclas de residuos hasta en 15 % para obtener un balance C/N adecuado. Los valores de energía han sido calculados tomando en cuenta la equivalencia citada por Hilbert (2011), 1 m³ de metano equivale a 6 kWh (**Tabla 5**).

Tabla 5 | Valorización Estimada de mezclas de residuos*

	Residuo	% Mezcla	SV	C:N	Biogás (m ³ /Kg SV)	Metano (m ³ /t SV)	kWh
M1	Agua	18	74	30	520,4	283,7	3122,4
	DVV	20					
	VOI	15					
	CCM	47					
M2	Agua	21	71	30	462,8	251,3	2776,6
	PFZ	18					
	CDC	19					
	AV	43					
M3	Agua	14	75	20	521,5	282,0	3128,9
	CCM	66					
	AP	10					
	HBV	10					

Fuente: (Elaboración Propia).

Con relación a los valores energéticos estimados, la **Figura 2** permite apreciar que existe disponibilidad sostenida de residuos durante el año, a partir de la cual se podría generar un potencial energético con valores

comprendidos entre 353 y 678 kWh y valores máximos en el mes de junio (1178 kWh). Esta estimación podría contribuir a propósitos de gestión de residuos para la producción y la utilización de biogás en la Bahía de Pucusana.

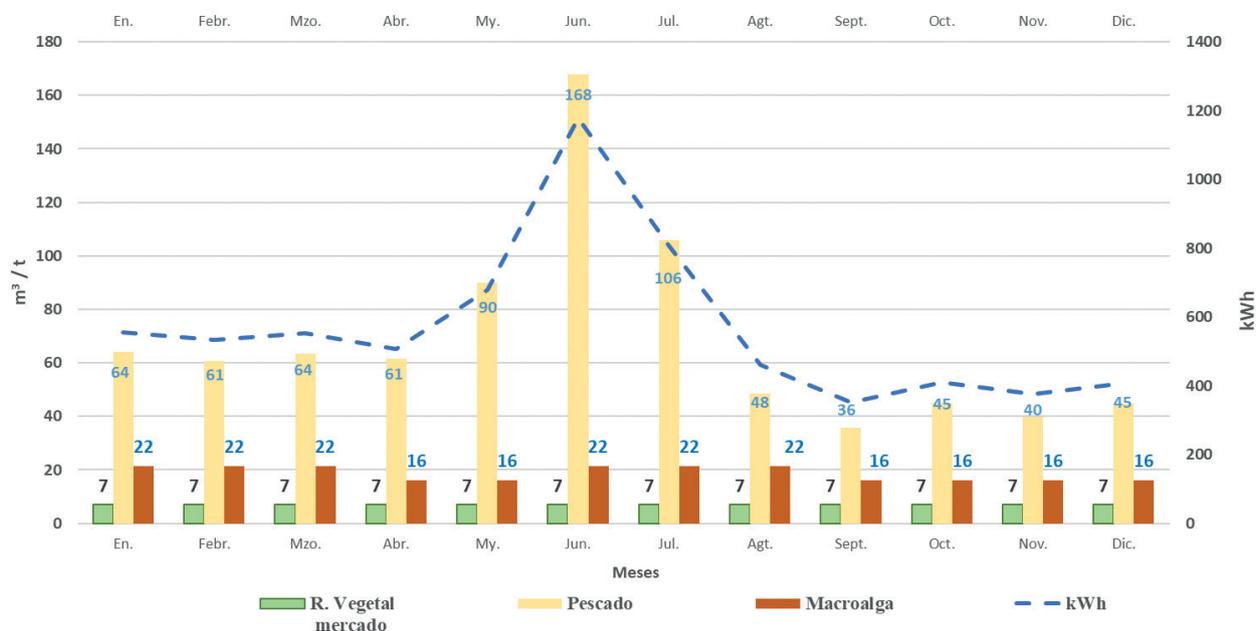


Figura 2 | Potencial de Biogás estimado en función a la disponibilidad de residuos orgánicos DPA – Pucusana.

Resultados y lecciones aprendidas

La caracterización mediante CQP constituye la herramienta de inicio para formular mezclas de residuos sometidas a CoDA con fines de valorización energética.

La inclusión de residuos pesqueros de partes blandas en las mezclas favorecería el proceso CoDA, no así huesos ni sustratos de elevados contenidos de ceniza. La incorporación de 15 % de residuos de pescado y 10 % de residuos de macroalgas (mezclas M1 y M3) permitiría obtener inclusive valores ligeramente mayores a M2, mezclas que fueron conformadas sólo por residuos vegetales.

Los valores energéticos sugieren la implementación de la CoDA para los residuos generados (macroalgas, pesqueros y vegetales) en la Bahía de Pucusana y en todo desembarcadero o puerto de similares condiciones, contribuyendo a la mejora de condiciones higiénico sanitarias, comercio y desarrollo económico de la zona.

Conclusiones y recomendaciones

La disponibilidad de residuos de macroalgas marinas, pescado y vegetales en la Bahía de Pucusana sugiere un potencial energético sostenible durante el año, en un rango entre 353 y 678 kWh y valores máximos en el mes

de junio (1178 kWh). La variedad y características de los residuos descritos en el presente estudio propicia el trabajo de mezclas y la aplicación de la CoDA. La información obtenida contribuye a la gestión de residuos y mejoramiento de las condiciones ambientales, sanitarias y turísticas del lugar. Se recomienda el desarrollo de pruebas de validación de las mezclas óptimas calculadas a escala piloto como paso previo a la instalación de un biodigestor anaeróbico.

Referencias

- Barbot, Y., Al-Ghaili, H., y Benz, R. (2016). A Review on the Valorization of Macroalgal Wastes for Biomethane Production. *Marine Drugs*, 14(6), 120. <https://doi.org/10.3390/md14060120>
- Barriga, M., Salas, A., Aranda, D., Castro, C., Albrecht, M., Solari, A., y Arpi, E. (2012). Información nutricional sobre algunas especies comerciales del mar peruano. *Boletín de investigación Instituto Tecnológico Pesquero del Perú*, 10. <http://repositorio.itp.gob.pe/handle/ITP/37>
- Baserga, U. (1998). *Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen: Biogas aus organischen Reststoff en und Energiegras. Tänikon: FAT*. https://www.infothek-biomasse.ch/images//1998_FAT_Landwirtschaftliche_Biogasanlagen.pdf

- Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., & Hamdi, M. (2005). Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry*, 40(3-4), 989–995. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.03.007>
- Bücker, F., Marder, M., Peiter, M. R., Lehn, D. N., Esquerdo, V. M., Antonio de Almeida Pinto, L., y Konrad, O. (2020). Fish waste: An efficient alternative to biogas and methane production in an anaerobic mono-digestion system. *Renewable Energy*, 147, 798–805. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.140>
- Chen, Y., Cheng, J. J., y Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 4044–4064. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- Christensen, T. H., Cossu, R., & Stegmann, R. (2020). Environmental Aspects. Landfilling of Waste: Biogas, 85–233. <https://doi.org/10.1201/9781003062097-3>
- 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://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.030>
- FAO. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Colección Documentos Técnicos N° 12. Buenos Aires. <http://www.fao.org/3/ca5082es/ca5082es.pdf>
- Gonzales, M., Pérez, S., Wong, A., Bello, R., y Yañez, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229-235. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=213041741010>
- Hilbert J. (2011). Manual para la producción de biogás. Instituto de ingeniería rural I.N.T.A.-Castelar. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf
- Keymer, U., & Schilcher, A. (2003). Biogasanlagen: Berechnung der Gasausbeute von Kosub-straten. <http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/031560/>
- Mojica, C., Vidal, E., Rueda, B. y Acosta, D. (2016). Estudio de las características físico-químicas de residuos orgánicos para su uso potencial en la producción de biogás. *Revista de Energía Química y Física*, 3(6), 15–22. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol3num6/Revista_Energia_Quimica_Fisica_V3_N6_3.pdf
- Varnero M. (2011). Manual de biogás. MINENERGIA/PNUD / FAO / GEF, Proyecto CHI/00/G32, 2011. <http://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://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/richtlinien/inhaltsverzeichnisse/2385990.pdf
- Vereda, C., Gómez, C., García, F., Rodríguez, M.(2006). Producción de Biogás a partir de residuos vegetales (I). *Revista Ingeniería Química*, 432, 114-122. <https://www.researchgate.net/publication/236590804>
- 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. Murphy, J.D. (Ed.) IEA Bioenergy Task, 37, 2018: 10. https://task37.ieabioenergy.com/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/Batch_tests_web_END.pdf