



REVISTA FIGEMPA

Aprovechamiento energético de la biomasa residual: caso de estudio de los restos de comida de familias de estudiantes de la Universidad de Guayaquil, para producción de biogás

Energy use of residual biomass: case study of the food remains of families of students of the University of Guayaquil, for biogas production

Magdalena Coello | [iD](#) Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. silvicoell@gmail.com

Benigno Rodríguez | [iD](#) Universidad da Coruña, España. benigno.rodriguez@udc.es

Yomar González | [iD](#) Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. yomar.gonzalez@ug.edu.ec

José Hidalgo | [iD](#) Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. jose.hidalgocr@ug.edu.ec

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recepción: 11/07/2021

Aceptación: 08/11/2021

PALABRAS CLAVE

Aprovechamiento de recursos, valoración orgánica, producción de biogás, contenido energético, tratamiento anaerobio.

ARTICLE HISTORY

Received: 11/07/2021

Accepted: 08/11/2021

KEY WORDS

Use of resources, organic valuation, biogas production, energy content, anaerobic treatment.

RESUMEN

Este trabajo describe el potencial energético de cierto tipo de biomasa residual (restos de comida) que proviene de los hogares urbanos y que pueden ser utilizados como un recurso energético alternativo de energía limpia, diferente a la actual dependencia de la energía fósil (gas GLP doméstico). El objetivo del estudio fue demostrar que el nivel de producción de biogás está determinado por la valorización energética del sustrato orgánico (restos de comida), el cual es viable para alimentar un dispositivo basado en fermentación metánica que sustituya a los actuales cilindros de gas doméstico de 15 kg. La aportación científica del artículo es el resultado de la investigación llevada a cabo mediante el diseño experimental al azar con cinco muestras de 196 hogares y dos muestras de dos hogares independiente y su posterior análisis. Los parámetros que se midieron fueron: análisis físico, punto de fusión de ceniza, análisis elemental y contenido energético cuyas variables inciden en el proceso de conversión de biomasa a energía, basados en métodos bioquímicos. En el contraste de hipótesis con otros tipos de RSU (resto de comida) no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$). Finalmente, los resultados del poder calórico superior e inferior promedio son de 3742,21 kcal/kg y 3309,68 kcal/kg, que muestran un potencial energético adecuado para utilizar la biomasa residual como una alternativa válida al uso de nuevas fuentes de energía renovables, en proyectos de valorización o generación de combustible con tratamiento de fermentación metánica. El uso de biomasa orgánica urbana o de sus derivados puede considerarse nulo en términos de emisiones netas que no afectarán al medio ambiente o a la atmósfera.

ABSTRACT

This work describes the energy potential of a certain type of residual biomass (food scraps) that comes from urban homes and that can be used as an alternative energy resource of clean energy different from the current dependence on fossil energy (domestic LPG gas). The objective of the study was to demonstrate that the level of biogas production is determined by the energy recovery of the organic substrate (food waste), which is viable to feed a device based on methane fermentation to replace the current domestic gas cylinders of 15 kg. The scientific contribution of the article is the result of the research carried out through the randomized experimental design with 5 samples from 196 households and 2 samples from two independent households and their subsequent analysis. The parameters that were measured were: physical analysis, ash melting point, elemental analysis and energy content whose variables influence the process of converting biomass to energy based on biochemical methods. In contrasting hypotheses with other types of MSW (rest of food), no significant differences were found ($p > 0,05$). Finally, the results of the average upper and lower caloric power are: 3742,21 kcal/kg and 3309,68 kcal/kg showing an adequate energy potential to use the residual biomass as a valid alternative to the use of new renewable energy sources, in recovery projects or fuel generation with methane fermentation treatment. The use of urban organic biomass or its derivatives can be considered null in terms of net emissions that will not affect the environment or the atmosphere.

INTRODUCCIÓN

La valorización energética de los biorresiduos orgánicos urbanos y su tratamiento tienen como objetivo minimizar los impactos ambientales negativos que puedan afectar

al medio ambiente y a la población (Carhuanco y León, 2015). El objetivo es recuperar y reintegrar estos residuos orgánicos como materia prima en las cadenas de valor. Por otro lado, las proyecciones sobre residuos de bio-

masa orgánica (RSU) en la provincia de Guayas se elevan cada año debido al crecimiento poblacional (INEC, 2018). Por lo tanto, es necesario aplicar metodologías adecuadas para evaluar estos desechos orgánicos. Los beneficios de la reintegración de residuos y su valoración pueden ser: ingresos monetarios, comercialización e industrialización del producto, reducción de residuos en vertederos (aumento de la vida útil de destino), ahorro económico en la operación de tratamiento de destino final, es decir, vertederos (Tello *et al.*, 2018). Es objetivo de este estudio, la valorización energética de los biorresiduos orgánicos urbanos de una muestra de la población de Guayaquil, constituida por familias de estudiantes universitarios con el fin de minimizar los impactos ambientales negativos que puedan afectar al medio ambiente y a la población. Se pretende establecer si la composición de los residuos generados es adecuada para la producción de biogás mediante biodigestores implantados en el ambiente urbano.

Actualmente, los estudios sobre producción de biomasa en el territorio ecuatoriano están enfocados al sector rural, y su respectivo potencial energético para cultivos agrícolas, entre los que se encuentran: banano, arroz, cacao, caña de azúcar, maíz, palma africana, piña, café, palmito y plátano, y tres actividades ganaderas (aves, porcinos y bovinos), así como para el sector forestal. Algunas investigaciones centran sus estudios en los biocombustibles como sustituto del diésel derivado del petróleo. Pero los problemas de Ecuador no solo se suman al consumo energético de gasolina (EP Petroecuador, 2016; Grafi *et al.*, 2014), un impacto negativo en la economía del país que ha llamado la atención en los últimos años es el aumento del consumo de fósiles, también conocido como gas GLP doméstico (Ramaraju y Kumar, 2011; Ministerio del Ambiente y Agua, 2020a). A pesar de que Ecuador es un país muy rico en biomasa, se descarta otro tipo de biomasa residual que se genera por la actividad humana, que son los residuos orgánicos urbanos (RSU). Al analizar estos aspectos negativos desde el punto de vista de la valoración energética y del aprovechamiento del recurso de la biomasa residual para producir energía limpia, que sustituya paulatinamente a los combustibles fósiles, estaríamos minimizando los impactos ambientales negativos y el consumo de gas GLP (Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífera, 2016; INEC, 2018).

No obstante, estos impactos dependerán de la gestión que cada municipio utilice en su localidad o comunidad y, de acuerdo a los residuos que genere la población, se aplicarán métodos para su correcta recolección, tratamiento, demanda local y regional de materiales e insumos provenientes del procesamiento de residuos sólidos (Ministerio del Ambiente y Agua 2020b; Martí *et al.*, 2017). Las metodologías más comunes reportadas para el aprovechamiento de residuos sólidos municipales (RSM) en

Ecuador son: compostaje, lombricultura y *bokashi*,¹ que son los tipos de mecanismos de explotación utilizados a nivel de los gobiernos autónomos municipales descentralizados (GADM) más frecuentes (PNABE, 2015; Ramos *et al.*, 2014). El uso de estos métodos requiere la búsqueda de nuevos cultivos agrícolas de bajo costo (Ibeto *et al.*, 2012; Atabani *et al.*, 2013). Desde 2015 se han coordinado propuestas de proyectos basados en tecnología anaeróbica (biodigestores tubulares de plástico) aplicada al sector rural (Ministerio del Ambiente Ecuador, 2015). Pero, ¿cuál es la cultura que tiene Ecuador, sus autoridades y habitantes en cuanto al aprovechamiento de nuevos recursos y valorización energética de los biorresiduos orgánicos? Por ejemplo, Europa se caracteriza por una cultura de recuperación de energía profundamente arraigada y comprometida vinculada a la protección del medio ambiente. Los países europeos invierten mucho en tecnología renovable; lo que significa que tienen niveles de vertido inferiores al 3%, es decir, hay una buena cultura sobre el uso del reciclaje para convertir residuos (Carballo y García, 2017). Pero, y ¿Ecuador? Entre los años 2015 y 2018, se observó un incremento en los métodos aplicados para el aprovechamiento de residuos orgánicos, con la participación de 221 cantones, utilizando los métodos descritos en el párrafo anterior. Sin embargo, la tecnología anaeróbica no parece muy viable (Gould *et al.*, 2020). ¿Cuál es el motivo de su desinterés por este tipo de tratamiento? Al parecer, el problema son los recursos y el desinterés de las autoridades por realizar estudios con este tipo de tecnología para implementar plantas de generación de biogás a partir de biorresiduos orgánicos (BSU).

Por otro lado, los GADM con mayores recursos económicos pueden optar por la tecnología anaeróbica a través del diseño de biodigestores a pequeña escala o, a su vez, en una planta de biomasa residual a gran escala. También se debe considerar el sustrato a utilizarse para la producción de biogás (ver Tabla 1). Éstos podrían clasificarse según su función, apariencia física, nivel de dilución, grado de concentración y características cuantitativas (porcentaje de sólidos totales (% ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO).

Hasta el presente, en Ecuador no se ha realizado ningún estudio de los residuos orgánicos urbanos (RSU) del sector marginal de las grandes ciudades metropolitanas. Dichos residuos son recolectados y depositados en los rellenos sanitarios de las diferentes urbes a nivel nacional, sin el empleo de ningún método de aprovechamiento y recuperación de energía (Arroyo-Vinueza y Reina-Guzmán, 2016; Rivard *et al.*, 2020), para la generación de energía eléctrica o sustitución de gas fósil GLP. El presente estudio se fundamenta en aprovechar estos recursos orgánicos que generan las familias ecuatorianas, mediante el análisis elemental y caracterización fisicoquímica del sustrato

¹ Bokashi: abono orgánico sólido que se usa para eliminar ciertos patógenos a través de la fermentación que acelera la degradación de la materia orgánica por elevación de la temperatura (Ramos Agüero, Terry Alfonso, Soto Carreño y Cabrera Rodríguez, 2014)

orgánico (restos de comida mezclada) para proponer un prototipo de digestor biológico a pequeña escala para el sector urbano-marginal, es decir, construir modelos de biodigestores domésticos con fines de producción de biogás que se adapten a cocinas domésticas con un sistema que se caracteriza por sus altos niveles de tecnificación (Atelge *et al.*, 2018; Pratima, 2019). Para valorar energéticamente estos restos alimentarios urbanos, debemos obtener un valor que esté dentro de los rangos típicos establecidos por otros estudios en el análisis de alimentos, incluso cuando la dieta varía entre países, como también obtener los parámetros que inciden en el tratamiento de la fermentación metánica (Nabin *et al.* 2021; Tchobanoglous *et al.*, 2002). El supuesto del estudio consiste en analizar si el nivel de producción de biogás está determinado por la valorización energética del sustrato orgánico (restos de comida mezclada) a través de la caracterización fisicoquímica de sus componentes y determinar si existen diferencias significativas de los sustratos de los hogares para generar biogás como sustituto del gas domiciliario (GLP).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se basa en la investigación básica con diseño no experimental al azar con cinco muestras de 196 hogares y dos muestras de dos hogares independiente (Hernández *et al.*, 2014). Parte de los datos sobre la clasificación de los biorresiduos orgánicos (solamente de restos de comida, cáscaras de vegetales y frutas) se obtuvo directamente de los hogares urbanos marginales de tres sectores de la ciudad de Guayaquil, que cuenta con un total de 614.453 hogares (INEC, 2019). En este trabajo se busca triangular los datos aportados por los hogares participantes a partir de métodos cualitativos y cuantitativos. Al aplicar múltiples metodologías obtendremos mejores resultados en el estudio debido al análisis de muestras representativas tomadas de los diferentes hogares guayaquileños y de esta manera inferir si los biorresiduos orgánicos (resto de comida) pueden ser utilizados como un recurso energético alternativo para producir biogás como sustituto de la energía fósil (gas GLP doméstico) (Fryn, 2019). Los resultados obtenidos de cada parámetro fisicoquímico de los biorresiduos o restos de comida se analizarán mediante la prueba Q de Dixon, asegurando así la alta precisión de los resultados (Zhichao *et al.*, 2001), las hipótesis se comprobarán con valores de puntaje z de dos colas ($p > 0,05$) y el estadígrafo t para muestra única. Los análisis se realizarán con el software SPSS.

FASE 1: DETERMINACIÓN DE LA MUESTRA DE ESTUDIO

Las muestras se recolectaron en tres sectores: Pascuales, Guasmos y Los Vergeles de la zona urbana marginal de

la ciudad de Guayaquil, en los que se realizó la respectiva tasación y clasificación de los restos de alimentos mixtos (RAM), cáscaras de frutas y verduras. Para determinar el número de hogares participantes se aplicó la siguiente fórmula:

$$n = \frac{(Z\alpha)^2 NS^2}{(N-1)^2 d^2 + Z\alpha^2 S^2} \quad \text{Ec.(1)}$$

En donde:

S^2 = Desviación estándar de la generación de desechos per cápita de la población = 0,04.

$Z\alpha$ = 1,96 con un grado de confianza de 95%.

d = Error permisible en la estimación de PPC (gr/hab/día) = 0,0056.

N = Número total de hogares = 586.539

n = Número de muestras a realizar.

Estos valores han sido considerados como los más apropiados, de acuerdo a la experiencia obtenida en otros estudios. Aplicando la fórmula se tiene que la muestra es de:

n = 196 hogares participantes,

empleó un tiempo de 28 días aplicando la técnica de análisis por muestreo estadístico y margen de error que dio aproximadamente un 18% con un nivel de significancia de 0,1 al 90% de confiabilidad (INEC, 2019).

$$z = 1 - \alpha \quad \text{Ec. (2)}$$

En donde:

$$e = z + \frac{\alpha}{2} \quad \text{Ec.(3)}$$

En donde:

$$n_{días} = \frac{t_{días} - 1}{1 + \frac{e^2 t_{días}}{z^2 \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2}} \quad \text{Ec. (4)}$$

En donde:

$$n_{días} \approx 28 \text{ días}$$

FASE 2: CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS BIORRESIDUOS ORGÁNICOS (RESTO DE COMIDA)

En cuanto a la determinación y análisis de las propiedades fisicoquímicas de los restos de alimentos mezclados, se recolectó en el último día de evaluación y tasación de los 196 hogares, aproximadamente 2.457.091 kg de restos de comida, más cáscaras de vegetales y frutas; los cuales fueron triturados y reducidos para su respectivo análisis fisicoquímico. Una vez reducido el tamaño de la

Tabla 1. Clasificación del sustrato para tratamiento con tecnología anaeróbica

Características	Clase	Tipo de sustrato	Características cuantitativas	Tipo de Biodigestor
Sólido	1	Basura doméstica Estiércol sólido Restos de cosecha	>20% ST 40-60% Fracción orgánica	Puede degradarse eficientemente en digestores tipo «por lotes»
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces de animales	100-150 g/l DQO 5%-10% ST 4%-8% SV	Son degradados de manera eficiente en digestores mezcla completa de operación continua. Por presentar una dilución mayor y en consecuencia una DQO menor
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (ss)	3	Heces de animales de cría y levante diluido con agua de lavado Aguas residuales de matadero	3-17 g/l DQO 1-2 g/l ss	Deben tratarse con digestores de alta eficiencia, como los de filtro anaerobio
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión; características	4	Aguas residuales de agroindustrias Clase Tipo de sustrato	5-18 g/l DQO Características cuantitativas	Debido a su alto contenido de DQO deben ser degradados en digestores aerobios intensivos para mayor eficiencia. Tipo de biodigestor.

Fuente: adaptado de Varnero Moreno (2011).

materia orgánica, se tomaron cinco muestras de aproximadamente 400 g de biomasa homogénea; todas las muestras se conservaron en refrigeración a 4°C hasta su procesamiento. La RAM no se mezcló con otros residuos orgánicos y se distribuyó de la siguiente manera:

Dos muestras de dos hogares independientes: la primera con mayor generación de residuos (diez habitantes en el hogar) y la segunda con la menor generación de RAM (cuatro habitantes en el hogar) para determinar si existen diferencias significativas entre los resultados de la composición fisicoquímica RAM. El contenido de sólidos totales, sólidos volátiles, materia seca y orgánica se determinó por métodos gravimétricos (15 g de muestra a 105°C durante una hora, lectura en un balance de humedad) (Venturin y Francisquetti, 2017). La relación carbono-nitrógeno (C/N) se aplicó por cálculo y por métodos espectrométricos para fósforo, potasio (Rojo *et al.*, 2019). potencial de hidrógeno (pH) por el método de potenciometría con electrodo de vidrio (15 g de muestra en 25 ml de agua destilada), su conductividad eléctrica por análisis de la prueba de Conductimetría a 25°C (15 g de muestra en 25

ml de agua destilada) (García *et al.*, 2016; Sakurai, 2000). Para determinar el porcentaje de humedad y la cantidad de sólidos totales, donde m_H es la muestra humedad, m_s es la muestra seca y M el peso total muestra humedad, la fórmula para su cálculo es:

$$\% \text{ humedad} = \frac{m_H - m_s}{M} * 100 \quad \text{Ec. (5)}$$

$$\% ST = 100 - \% \text{ humedad} \quad \text{Ec. (6)}$$

FASE 3: PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS DE LOS PCS Y PCI

A continuación, se dividió los 196 hogares en tres secciones para obtener tres muestras fusionadas de 65 hogares. El objetivo de realizar esta mezcla es simular como si fueran sacados directamente del relleno sanitario. La diferencia será que las muestras son puras, es decir, no están mezcladas con otros componentes orgánicos o inorgánicos. También se realizará una comparación con las dos

muestras independientes de dos hogares para analizar si existen diferencias significativas entre ellas, o si varían según la dieta de cada familia del sector. El análisis de estas muestras se llevará a cabo en el laboratorio AGRORUM con métodos y técnicas más avanzadas utilizadas en la determinación de los parámetros fisicoquímicos de las RAM.

FASE 4: CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS BIORRESIDUOS ORGÁNICOS (RESTO DE COMIDA) PCI Y PCS

La caracterización energética se encuentra en función del poder calorífico presente en la materia orgánica. El cálculo del poder calorífico superior (PSC) e inferior (PSI) se obtuvo de una muestra representativa homogenizada en composición y tamaño. La muestra seca se procesó en una bomba calorimétrica adiabática, determinándose el PCS utilizando las ecuaciones establecidas por Sakurai (2000):

$$PCS = \frac{8056(\%C) + 33889\left(\%H - \frac{\%O}{8}\right) + 2200\%S + 556\%N}{100} \text{ Ec.(7)}$$

Donde PCS es el poder calorífico superior, el PSC es el poder calorífico inferior (PCI), %H (hidrógeno), %C (carbono), %S (azufre) y %N (nitrógeno). El cálculo PCI donde w es el porcentaje de humedad inferior se aplica:

$$PCI = PCS - \frac{W}{100} * 600 \text{ Ec.(8)}$$

Se trabajó en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad de Guayaquil-Ecuador.

SUPUESTOS DEL ESTUDIO

Para el correcto funcionamiento de un digestor biológico, basado en la tecnología anaerobia, su operación y optimización de producción de biogás depende, en gran medida, de tener el control en tiempo real de los parámetros físicos y químicos del prototipo, tomando como referencia teórica los valores obtenidos de otros estudios (Tchobanoglous *et al.*, 2002). Las hipótesis en cuestión son:

Ho: $\mu = 70$ Ha: $\mu \neq 70$ → para la humedad
 Ho: $\mu = 21.4$ Ha: $\mu \neq 21.4$ → para la materia seca
 Ho: $\mu = 20$ Ha: $\mu \neq 20$ → para la relación C/N. Ho: $\mu = 16$
 Ha: $\mu \neq 16$ → para los sólidos volátiles % SVT. Ho: $\mu = 1,111$
 Ha: $\mu \neq 1,111$ → para poder calorífico PCI. Ho: $\mu = 7$ Ha:
 $\mu \neq 7$ → para potencial de hidrógeno pH.

RESULTADOS

En la tabla 2 constan las principales propiedades de la

RAM comparadas con las obtenidas por Tchobanoglous (2002). Cabe recordar que se considera en este estudio solamente los desechos de restos de comidas (cáscaras de vegetales, frutas y comida mezclada). Con base en el análisis de la RAM, se encontró que la materia orgánica oscila entre 85,2 y 94%; para humedad (%) entre 79,4 y 85,2; materia seca a 105°C entre 14,02 y 19,2%; fósforo (P) entre 0,19 y 0,3%. La relación carbono nitrógeno C/N 19,15 y 30,62 mientras que la (%) SVT contiene entre 13 y 18 frente a 16 de Tchobanoglous (2002) (ver Tabla 2).

Para que la materia orgánica sea óptima y eficaz, el nivel de producción de biogás debe estar determinado por la recuperación energética del sustrato orgánico (restos de alimentos mixtos) mediante la caracterización fisicoquímica de sus componentes y que este tipo de materia orgánica pueda producir biogás y que esta cantidad sea superior al 45%. Para ello se realiza el análisis de contraste de las hipótesis (ver Tablas 3 y 4):

A la luz de los datos de las tablas 3 y 4 y luego del resultado obtenido mediante el contraste de hipótesis realizado, existe evidencia suficiente para poder aceptar la hipótesis nula ($p > 0,05$).

La composición media de la materia orgánica seca es la siguiente: 48,24% C; 42,93% de O; 6,02% de H; 2,45% N. Los datos obtenidos del análisis del material combustible presente en los restos de alimentos, peso en porcentaje (base seca) se muestran en la tabla 5 (ver Tabla 5).

En cuanto a la biodegradabilidad de los restos de alimentos mezclados en función del contenido de lignina (LC), los sólidos volátiles encontrados en la muestra están en el rango de 15,97% s. m. s, los sólidos totales son 33,6 mientras que la lignina está cerca del rango típico de otros 0,35 (ver Tabla 6).

En cuanto a la caracterización energética de la humedad y poder calorífico de los restos de alimento, tenemos nuestros supuestos teóricos, los cuales demostraremos su hipotético contraste según los resultados obtenidos (ver Tabla 7).

DISCUSIÓN

Se puede concluir que las propiedades fisicoquímicas se encuentran dentro de los rangos obtenidos por una dieta diferente a la detectada hace dos décadas en Norteamérica por Tchobanoglous (Tabla 2), a pesar de que estos estudios tuvieron un seguimiento más largo que el nuestro. La producción de biogás tiene un límite que depende básicamente de la naturaleza del sustrato orgánico disponible en el sistema digestor. Es importante señalar que algunos factores sustanciales que gobiernan el proceso de biotecnología anaeróbica requieren un monitoreo cuidadoso de las condiciones ambientales. Entre ella tenemos la materia prima (RAM) que se puede utilizar

Tabla 2. Análisis fisicoquímico de restos de alimentos urbanos (mixtos)

Parámetro	Hogar 1	Hogar 2	Muestra de 65 hogares			Tchobanoglou s (2002)
			1	2	3	
Humedad (%)	85,2	81,1	79,4	80,6	81,2	70-80
pH [UpH]	3,57	4,08	4,05	4,53	4,13	
C/N	30,62	19,15	24,75	22,87	30,16	20-30
N orgánico [% s.m.s]	1,54	2,47	1,89	1,86	1,55	2,6
Sólidos volátiles totales (% svT)	13	18	17,1	15,8	15	16
Materia seca a 105°C [% s.m.f]	14,02	17,9	19,2	16,5	17,60	21,4
Materia orgánica [% s.m.s]	94,5	94,6	93,4	85,20	93,50	70-90
Cond. Elec. a 25°C [dS/m]	1,23	2,66	2,64	4,16	2,76	4 dS/m
Fósforo (P) (ext. ácido) [% s.m.s]	0,191	0,33	0,21	0,29	0,3	4,9
Potasio (K) (ext. ácido) [% s.m.s.]	1,62	0,312	1,03	1,45	2,58	4,18
N amoniacal [% s.m.s.]	0,24	0,35	0,25	0,32	0,30	
N(N) [% s.m.s.]	1,78	2,82	2,14	12,18	1,85	2,6

Tabla 3. Prueba de hipótesis de una cola para sobras de alimentos mixtos

	Humedad	c/n	% svT	pH
Hogar 1	17,9	19,15	18	4,08
Hogar 2	14,02	30,62	13	3,57
\bar{x}	15,96	24,885	15,5	3,825
$\overline{S_x}$	2,7436	8,1105	3,5355	0,3606
$t_{calculado}$	0,071	0,434	0,0056	1,497
Valores z	0,07	0,43	0,01	1,50

Tabla 4. Prueba de hipótesis de una cola para sobras de comida mixtas de 65 hogares

Muestras	Humedad	C/N	%SV T	pH
1	19,2	24,75	17,1	4,05
2	16,05	22,87	15,8	4,53
3	17,6	30,16	15	4,13
\bar{x}	17,77	25,93	15,9	4,24
$\overline{S_x}$	1,3577	3,7848	1,05	0,24173
$t_{calculado}$	0,1994	0,1177	0,25	0,0298
Valores z	0,20	0,12	0,26	0,03
$t_{critico}$	±4,303	Decisión estadística	Se acepta Ho	

Tabla 5. Composición química teórica de restos de comida (mezclados)

Elemento	Análisis elemental (%)	Peso atómico [g/mol]	Proporción átomo - relativo [g/mol]	Relación atómica
C	48,24	12,011	4,016	365
H	6,02	1,04	5,96	542
S	0,36	32,06	0,011	1
N	2,45	14,02	0,175	16
Total	57,07			
O	42,93	16	2,68	244
Composición química		C ₃₆₅ H ₅₄₂ O ₂₄₄ N ₁₆ S		

Tabla 6. Fracción biodegradable de componentes orgánicos a base de lignina

Parámetro	Contenido	Análisis de la muestra en laboratorio AGRORUM actualizado	
		Rango	Típico
Fracción biodegradable de los componentes orgánicos basada en contenido de lignina (CL)	Sólidos volátiles (% sv) base seca	15-18	15,97
	Sólidos totales (% st)		33,6
	Lignina (CL) en % sv		0,35
	Fracción biodegradable (FV)		0,82
Caracterización energética	(sc) kcal/kg	2102-4378	4130
	psi kcal/kg	1706-4099	3731
	Sustancia orgánica seca (oTS)		91,27
	Relación C/N	19,15-30,62	25,52

Tabla 7. Contraste de hipótesis de dos colas para restos de alimentos mixtos de 65 hogares (caracterización de energía PCI, % de humedad)

Muestras	Humedad [%]	PCS [kcal/kg]	PCI [kcal/kg]
1	72,50	3923,08	3488,10
2	75,01	3400,46	2950,40
3	68,76	3903,10	3490,54
\bar{x}	71,42	3742,21	3309,68
$\overline{S_x}$	3,2256	296,135	311,14
$t_{calculado}$	0,37974	2,16981	18,2022
Valores z	0,38	0,22	0,18

en la fermentación metanogénica. En otras palabras, las características bioquímicas de estas reacciones adversas deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico. El contenido de humedad de los restos de alimento es un parámetro determinante en la biomasa, representa la cantidad de agua presente en la muestra en relación con su peso, y su estudio de secado tiene la implicación de la humedad en el poder calorífico del material (Safoora *et al.*, 2019). Es decir, al conside-

rar la biomasa como fuente de energía, su valor calorífico estará directamente relacionado con la cantidad de humedad presente en la muestra (Arroyo-Vineza, 2016; Venturin y Francisquetti, 2017).

Por otro lado, mediante la técnica de análisis químico elemental se determinó el contenido de carbono, nitrógeno y azufre y oxígeno (CHSO) de las muestras seleccionadas en los hogares urbanos marginales de la ciudad de Guayaquil (Tabla 3). A partir de estos resultados podemos

caracterizar la composición química de los residuos sólidos urbanos. Pero en este estudio interesa el sustrato vegetal orgánico y el resto del alimento mezclado; con esta información se obtendrá la mezcla correcta de materiales residuales a utilizar en un sistema con tratamiento anaeróbico (relación C/N). Los sustratos de clase 1 (Tabla 1) se pueden degradar de manera eficiente en digestores discontinuos, es decir, dependiendo de la composición bioquímica de cada materia prima, habrá una dinámica de producción de biogás. Esto está relacionado con la presencia de ciertos nutrientes en el proceso (carbono, nitrógeno, azufre, entre otros elementos), que son necesarios para el desarrollo de las bacterias microbianas responsables de la producción de biogás. Para tales circunstancias, la relación carbono-nitrógeno debería estar en un rango típico entre 20 y 30 partes del primer elemento por cada parte del segundo (Tabla 4) (González *et al.*, 2013). En otras palabras, el aumento de nitrógeno y la producción de metano disminuyen debido a la formación de amoníaco (inhibidor de la fermentación anaeróbica), durante la degradación anaeróbica de urea o proteínas y tóxico para las bacterias metanogénicas. Con base en estos resultados, se puede indicar que los restos de la dieta estadounidense no son tan buenos para la producción de biogás como los alimentos desechados de las familias ecuatorianas. En referencia al sistema alimentario (americano), los residuos alimentarios se pueden mezclar con otros sustratos (lodos, estiércol, etc.) para compensar el equilibrio en la fase metanogénica. Esto se puede hacer porque la degradación de materia orgánica con tecnología anaeróbica tiene una tendencia asintótica con una eliminación en el tiempo infinito, es decir, la generación de biogás por unidad de volumen del reactor máximo por un tiempo de retención correspondiente a la remoción de un sustrato estaría entre 40 y 60% (masa/masa) (Fedailaine *et al.* 2015).

Los resultados de la fracción degradable indican que los sólidos totales (% TVS, % TS) cumplen con los parámetros establecidos para un buen desempeño de la producción de biogás en el biodigestor (Tablas 2-6). Debe recordarse que el porcentaje de sólidos volátiles (% VS) es un factor importante a considerar cuando se alimenta un digestor anaeróbico para que la eficiencia y generación de gas no se vea afectada. Esto se debe al movimiento de bacterias metanogénicas dentro de la carga orgánica que se limita cada vez más a medida que aumenta el contenido de sólidos. Teniendo esto en cuenta, y de acuerdo con los resultados obtenidos a partir de sólidos totales (33,6) y volátiles (15,62), los sustratos de clase 1 pueden degradarse eficientemente en digestores tipo Batch debido a sus características cuantitativas >20 %ST (Tabla 1). A partir de los resultados, es posible calcular el volumen de agua que se debe agregar a la carga orgánica y así dar la proporción adecuada de sólidos totales, por lo que es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales de la materia prima fresca (Varnero, 2011). En definitiva,

la producción de biogás está relacionada con los sólidos volátiles y conociendo los resultados de las muestras se pueden realizar comparaciones entre diferentes cargas orgánicas y tecnologías (Safoora *et al.*, 2019). Una vez obtenidos los valores óptimos que deben cumplir nuestras variables para producir biogás en el interior de un dispositivo biológico a pequeña escala y el tipo de sustrato a utilizar, se puede calcular el potencial de la materia orgánica para degradarse anaeróbicamente y generar biogás (Tabla 6). Además de evaluar el grado de dilución en agua necesaria o comprender si es necesaria o no la codigestión, entre otros. En la tabla 6 se encontró que el valor calorífico de los restos de alimentos mezclados y de las cáscaras de verduras y frutas tiene un valor de 3309,06 (kcal/kg) para el PCI que se encuentra en el rango típico de contenido de energía de 1706-4378 (kcal/kg); mientras que el PCS promedio 3742,21 (kcal/kg) cuya potencia energética oscila entre 2102-4378 (kcal/kg). Con base en los resultados del contenido del nivel energético, se recomienda el método de recuperación de energía a utilizar, en este caso por tratamiento de fermentación metánica que se basa en la tecnología anaerobia. Por tanto, no existen diferencias significativas entre la recuperación energética del sustrato orgánico (restos de alimentos mixtos) realizada por (Tchobanoglous *et al.*, 2002) a través de la caracterización fisicoquímica de sus componentes. En resumen, este tipo de materia orgánica que se desecha en los hogares urbanos ecuatorianos puede producir biogás como posible sustituto del gas GLP doméstico a través del método bioquímico basado en la fermentación metánica.

Basado en la exposición de los resultados obtenidos en este estudio sobre el aprovechamiento energético de cierto tipo de biomasa residual urbana, se propone realizar un estudio basado en la factibilidad de diseñar un nuevo modelo de digestor con tecnología de fermentación metánica para producción de biogás como sustituto del gas doméstico (GLP). De acuerdo con los estudios previos y exploratorios que se obtenga de los hogares de la ciudad de Guayaquil y basados en el análisis de caracterización de los restos de comida domiciliar y de la bibliografía existente sobre biodigestores anaerobios se procede a proponer un modelo a seguir para el diseño del prototipo de dosificador que se adapte a las cocinas de gas. A continuación, se describen las características y fases a proseguir para elaborar el dispositivo anaerobio sustituto del gas doméstico (ver Gráfico 1).

CONCLUSIONES

La biomasa residual que va a los vertederos se puede aprovechar de forma positiva con un tratamiento adecuado para su explotación y producción energética. Estos elementos incluyen factores de bajo costo, como la combinación de sustratos, la adición de grasas, la sepa-

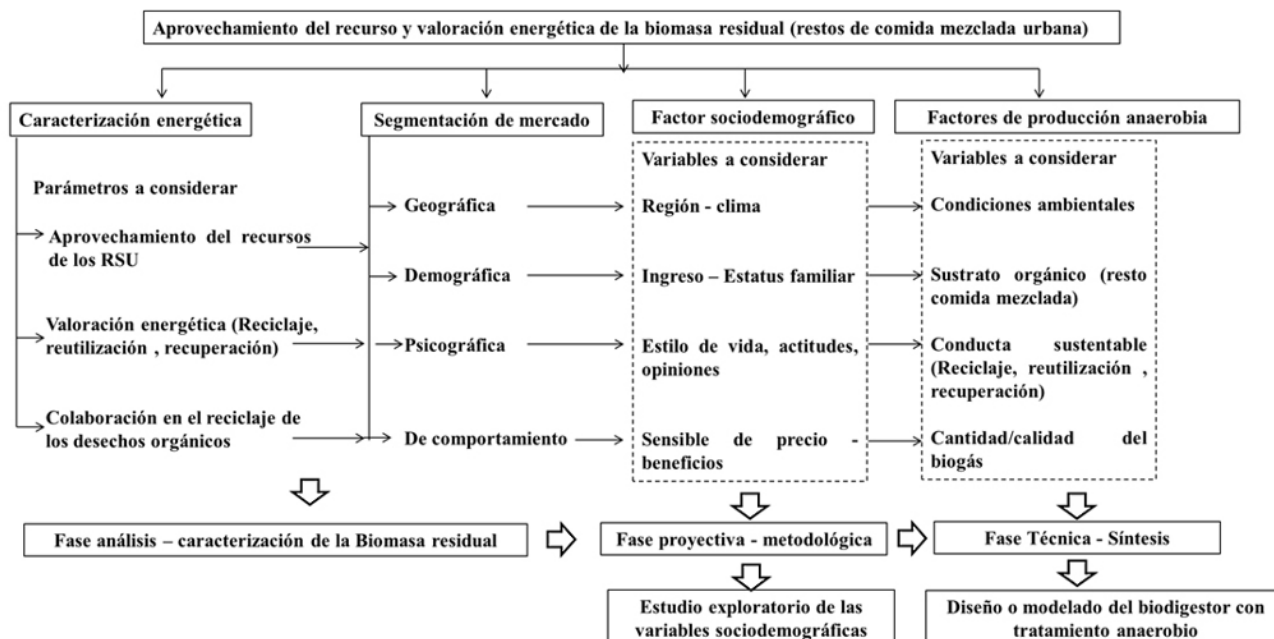


Gráfico 1. Fases de la propuesta de diseño del biodigestor basado en la fermentación metánica

ración de sólidos y la inoculación de los biodigestores con microorganismos metanogénicos. En este estudio se determina que el biogás sería el más recomendado para uso doméstico en sectores urbano-marginales, principalmente en la región de la Costa, donde el consumo es mayor y podría expandirse gradualmente a nivel nacional, ya que uno de sus parámetros a favor es la temperatura con intervalos entre 25°C a 31°C. Además, los análisis energéticos PCS y PCI promedio son de 3742,21 kcal/kg y 3309,68 kcal/kg que muestran un potencial energético apropiado para ser utilizado en proyectos de valorización o generación de combustible con tratamiento de fermentación metánica como una alternativa al gas GLP doméstico. Por otro lado, se genera un impacto positivo en la economía del país al verse reducida la cantidad de gas licuado de petróleo (GLP) subsidiado y la disminución de desechos orgánicos en los rellenos sanitarios de manera paulatina a través de la aceptación de la propuesta de ahorro energético por parte de la ciudadanía y del interés de las autoridades gubernamentales o municipales de turno. Para concluir, el uso de estos métodos, basados en tecnología verde, no afectará en el balance global de CO₂ en la atmósfera o del medio ambiente; el uso de biomasa orgánica o de sus derivados puede considerarse nulo en términos de emisiones netas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las 196 familias que voluntariamente contribuyeron a la clasificación y valoración de los restos alimentarios por un período de 28 días. A los estudiantes voluntarios de la carrera de Ingeniería Industrial que participaron en el control de la valoración de

residuos.

REFERENCIAS

- Agencia de Regulación y Control Hidrocarbúfera. (2016). *Boletín estadístico de Hidrocarburos 2016: actividad hidrocarbúfera*. Ministerio de Hidrocarburos. <https://n9.cl/9yk63>
- Armengol G., Farré O. (2011). Situation and potential for direct energy recovery from waste. <https://n9.cl/9w5yv>
- Arroyo Vinuesa J., y Reina Guzmán W. (2016). Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. *Ingenius: Revista de Ciencia y Tecnología*, (16), 20-29. <https://doi.org/10.17163/ings.n16.2016.03>.
- Atabani, A. E, Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H, Irfan Anjum Badruddin, Hafizuddin Wan Yusoff, W. T. Chong y Keat Teong Lee. (2013). A comparative evaluation of physical and chemical properties of biodiesel synthesized from edible and non-edible oils and study on the effect of biodiesel blending. *Journal Energy*, (58), 296-304. <https://n9.cl/nt95>.
- Atelge M. R., Krisa D., Kumar G., Eskicioglu C., C., Nguyen Unalan S. (2020). Biogas production from organic waste: recent progress and perspectives. *Journal Waste Biomass Valor*, 11(3), 1019-1040. <https://n9.cl/oqerc>
- Caraballo María, García Juana. (2017). Energías renovables y desarrollo económico. Un análisis para España y las grandes economías europeas. *Revista El Trimestre Económico*, 84(3), 571-609. <https://doi.org/10.20430/ete.v84i335.508>
- Carhuanco, León F. (2015). Valorización energética de la

- biomasa residual agrícola de banano y mango en la región de Piura-Perú (tesis de posgrado). Universidad Politécnica de Madrid. <http://oa.upm.es/51182/>.
- EP Petroecuador. (2016). Boletín N.º 157. <https://n9.cl/jv023>.
- Fedailaine, Maamar, Moussi K., Khitous Mohamed, Tirichine N. Abada S. Saber Meyem, Tirichine N. (2015). Modeling of the anaerobic digestion of organic waste for biogas production. *Journal Procedia Computer Science*, 52(1), 730-737 <https://n9.cl/1f1bt>
- Fryn, F. (2019). Qualitative vs. Quantitative research. What is what? *Imotion*. <https://n9.cl/252h0>
- García V., Prieto Ruiz A., Corral J. y Hernández J. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(38), 18-25. <https://n9.cl/j9xjp>.
- González F., Cuadro F., Ruiz A., López F. (2013). Energy-environmental benefits and feasibility of anaerobic codigestion of Iberian pig slaughterhouse and tomato industry wastes in Extremadura, Madrid, Spain. *Bioresource Technology*, 136C,109-116. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.02.03.
- Gould, C., Schlesinger, S., Molina, E., Bejarano L., Valarezo M., A., Darbi J. (2020). Long-standing LPG subsidies, cooking fuel stacking, and personal exposure to air pollution in rural and peri-urban Ecuador. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 30(4), 707-720. <https://n9.cl/hbsgj4>
- Grafi M., Martí Herrero J., Garwood A., Ferrer I. (2014). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: a review. *Journal Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 559-614. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071>.
- Hernández Sampieri R, Fernández C., Baptista P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill. <https://n9.cl/hbsgj4>
- Ibeto C., Chukwuma O., Okoye B., Ofoefule A. (2012). Comparative study of the physicochemical characterization of some oils as potential feedstock for biodiesel production. *Journal International Scholarly Research Notice*, p. 5. <https://doi.org/10.5402/2012/621518>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). (2018). Según las últimas estadísticas de información ambiental: Cada ecuatoriano produce 0,58 kilogramos de residuos sólidos al día. *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*. <http://bit.ly/2dUuKxm>.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). (2019). *Gobiernos autónomos descentralizados (GAD) y Asociación de Municipios Ecuatorianos. Estadísticas de información económico ambiental en los gobiernos municipales autónomos descentralizados*. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. <https://n9.cl/9sacf>.
- Martí J., Piedra M., Cuji P., Ramírez V., Rodríguez L., López D., Cipriano J. (2017). Línea base y demanda potencial técnica de biodigestores en Ecuador: análisis del contexto y tipologías de productores. <https://n9.cl/te6nu>
- Ministerio del Ambiente. (2015). Introducción de biodigestores en sistemas agropecuarios en el Ecuador. Un aporte a la mitigación y adaptación al cambio climático. <https://n9.cl/am4q8>
- Ministerio del Ambiente y Agua. (2020a). Ecuador promueve la generación de bioenergía mediante el uso de residuos orgánicos e industriales. *Boletín* N.º 091. <https://n9.cl/jnq7m>.
- Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador (MAA). (2020b). *Manual de uso de residuos orgánicos urbanos*. Ministerio de Medio Ambiente y Agua del Ecuador. Quito, Ecuador. Accedido febrero de 2020. <https://n9.cl/o8wsx>.
- Niban A., Lars Ditlev Mørck Ottosen, Michael Vedel Wegener Kofoed, Deepak Pant (eds). (2021). *Emerging technologies and biological systems for biogas upgrading*, 493-506. Londres, United Kingdom: Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-012-822808-1.00023-4>
- Pacheco González S. (2016). *Construcción y evaluación de un digestor anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. <https://n9.cl/mcei7j>
- Plan del Programa Nacional de Biodigestores en Ecuador (PNA-BE). (2015). *Hacia un sector biodigestor sostenible en Ecuador: Insumos para un componente biodigestor del PNA-BE*. Universidad Regional Amazónica. Ministerio de Ambiente. <https://n9.cl/vb3m8>.
- Pratima Bajpai (ed). (2019). *Biomass to energy conversion technologies. The Road to Commercialization*. Elsevier Science.
- Ramos Agüero D., Terry A, Soto F y Cabrera J. (2014). Bocashi: abono orgánico elaborado a partir de residuos de la producción de plátanos en Bocas del Toro, Panamá. *Revista Cultivos Tropicales*, 35(2), 90-97. <https://n9.cl/gx3y9y>
- Rivard, F., Abou Harb, G., Meret, P. (eds). (2020). *Transverse information system: new solutions for is and business performance*. WILEY-ISTE. <https://n9.cl/w3pf0>
- Rojo D., Ernst C., Romero C. (2019). *Manual de metodología de estimación de empleo verde en la bioenergía*. Editado por Alejandra Groba. FAO, Buenos Aires.
- Safoora M., Karimi K., Tabatabaei M., Aghbashlo M., Sahoo P.K., L.M. Das, M.K.G. Babu, S.N. Naik. (2007). Biodiesel development from high acid value polanga seed oil and performance evaluation in a CI engine. *Journal Fuel*, 86(3), 448-454. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.025>
- Sakurai K. (2010). *Guía HDT 17: método sencillo del análisis de residuos sólidos*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). <https://n9.cl/8j46>
- Tchobanoglous Georgem, Theisen Hillary, Samuel Vigil (eds). (2002). *Handbook of solid waste management* (pp.1-950). McGraw Hill Handbooks.
- Tello P., Campani D., Sarafian D. (2018). *Gestión integral de residuos sólidos urbanos*. Presidente de la Asociación

-
- Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – AIDIS. <https://n9.cl/0re5s>.
- Varnero Moreno, María Teresa. (2011). *Manual de biogás*. Proyecto CHI/00/G32 Chile: Eliminación de Barreras para Electrificación Rural con Energías Renovables. Santiago Chile: FAO. <https://n9.cl/ncstt>
- Venturin P., Francisquetti R. (2017). Análise do aproveitamento energético do biogás obtido na biodigestão anaeróbia de manipueira em uma farinha de mandioca (tesis de maestría). Universidad Tecnológica Federal de Paraná, Mourão, Brasil. <https://n9.cl/91a31>.
- Zhichao L., K. G. W. Inn & J. J. Filliben. (2001). An alternative statistical approach to the evaluation of interlaboratory comparison data. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 248(1), 163-17. <https://doi.org/10.1023/A:1010615200709>