

Caracterización de residuos de alimentos para su aprovechamiento energético: Propuesta metodológica

Daniel Alfredo Ortiz Torres^a, Ricardo López Zavala^{a*}, Mydory Oyuky Nakasima López^{b*}, Nicolás Velázquez Limón^c, Sukey Sayonara Nakasima López^b

^a Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, daniel.alfredo.ortiz.torres@uabc.edu.mx; rlopez99@uabc.edu.mx, Mexicali, Baja California, México.

^b Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, nakasima.mydory@uabc.edu.mx; snakasima@uabc.edu.mx; Tijuana, Baja California, México.

^c Centro de Estudios de las Energías Renovables, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, nicolas.velazquez@uabc.edu.mx, Mexicali, Baja California, México.

Resumen

La biomasa es una fuente renovable de energía, la cual requiere una evaluación exhaustiva del recurso biomásico para determinar la pertinencia de su aprovechamiento. Sin embargo, a diferencia de otras fuentes renovables, conocer las características de la biomasa se vuelve complejo debido a su gran variabilidad. Por lo que es importante generar la información que describa la naturaleza del recurso biomásico, siendo este uno de los grandes retos que presenta esta fuente renovable de energía. Particularmente, los residuos de alimentos presentan una dificultad mayor para la caracterización debido a su cantidad y composición variable, que dependen de la zona, estación del año, hábitos alimenticios, entre otros. Por lo anterior, en este artículo se abordará una propuesta metodológica para caracterizar residuos de alimentos, partiendo de un adecuado método de muestreo, según sea el caso, con la finalidad de hacer eficiente el análisis, la evaluación del recurso biomásico, así como generar información confiable y fomentar técnicas que puedan ser utilizadas para: 1) dimensionar la tecnología del proceso de digestión anaeróbica, 2) estimar teóricamente el potencial de biogás a partir de la composición fisicoquímica del residuo a tratar, 3) estimar el retorno de inversión del proceso, entre otros. Finalmente, la metodología propuesta es la base para una gestión integral de los residuos orgánicos, específicamente los residuos de alimentos, donde sus actividades como proceso forman parte de una economía circular.

Palabras clave— Biogás, Biomasa, Caracterización, Metodología y Residuos de alimentos.

Abstract

Biomass is a renewable source of energy, which requires a thorough evaluation of the biomass resource to determine the relevance of its use. However, unlike other renewable sources, knowing the characteristics of biomass is complex due to its great variability. Therefore, it is important to generate information describing the nature of the biomass resource, which is one of the great challenges presented by this renewable energy source. Particularly, food waste presents a

greater difficulty for characterization due to its variable quantity and composition, which depend on the area, season of the year, eating habits, among others. Therefore, this article will address a methodological proposal to characterize food waste, starting from an adequate sampling method, as appropriate, in order to make the analysis efficient, the evaluation of the biomass resource, as well as to generate reliable information and promote techniques that can be used to: 1) dimension the technology of the anaerobic digestion process, 2) theoretically estimate the biogas potential from the physicochemical composition of the waste to be treated, 3) estimate the return on investment of the process, among others. Finally, the proposed methodology is the basis for an integrated management of organic waste, where its activities as a process are part of a circular economy.

Keywords— Biogas, Biomass, Characterization, Food Waste and Methodology.

1. INTRODUCCIÓN

El abuso de los bienes que brinda la naturaleza, el no poder brindar energía a todos los sectores de las comunidades, la generación de residuos y los problemas ambientales asociados a todo lo anterior, son algunas de las principales problemáticas a nivel mundial [1]. Aproximadamente, más del 50% de los residuos que se generan en todo el mundo pertenecen a los residuos de alimentos [2], de los cuales 70% de estos son transferidos a rellenos sanitarios [3]. Cuando los rellenos sanitarios no cumplen con las normas de seguridad e higiene, se convierten en focos de infección causantes de daños en la flora y fauna [4], además de generar gases de efecto invernadero, producto de la degradación de la materia orgánica (residuos de alimentos en mayor cantidad). Por lo anterior, la gestión de los residuos se ha convertido en un desafío en las políticas públicas, así como en el ámbito científico; el cual busca desarrollar técnicas sostenibles para el tratamiento de los residuos orgánicos [5].

Una de las alternativas más prometedoras para el tratamiento sostenible de los residuos de alimentos (RA), es el proceso de digestión anaeróbica (DA). Este proceso consiste en la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás (CH₄, CO₂ y trazas de otros gases) como producto principal, así como un bioabono sólido y líquido [6], [7]. El biogás puede ser aprovechado para generar energía eléctrica, térmica o como combustible para autos. Sin embargo, no todos los residuos de alimento (RA) tienen el mismo potencial para producir biogás, por lo que es fundamental conocer las características fisicoquímicas de estos, para poder estimar de manera precisa el potencial de biogás.

La caracterización fisicoquímica de los RA es muy compleja debido a la gran variabilidad que presentan en peso y composición. La falta de metodologías claras y estandarizadas, ha provocado que la caracterización sólo se realice a uno o dos RA específicos, con la finalidad de

simplificar el proceso de obtención de muestras, de la frecuencia de muestreo y de la obtención de parámetros físico-químicos. Sin embargo, si el tamaño de muestra no es representativo, los resultados de la caracterización presentarán incertidumbre, aunque los análisis físico-químicos se hagan con base a las normas. Conduciendo a errores en la estimación de biogás y el diseño de biodigestores, por ello la presentación de la metodología.

1.1 Estudios de caracterización del recurso biomásico

Se han realizado diversos estudios enfocados en la caracterización de los residuos de alimentos y en la estimación de producción de biogás. Sin embargo, los criterios metodológicos para llevar a cabo la caracterización físico-química son establecidos de manera empírica; sobre todo para el tamaño de muestra, la frecuencia del muestreo y el tamaño de muestra representativa. En la siguiente Tabla 1 se presentan algunos estudios recientes sobre la estimación de producción de biogás. Se hizo énfasis en detectar los aspectos metodológicos de caracterización. Se puede observar, que existe carencia de información, principalmente en la frecuencia de muestreo y el tamaño de muestra representativa, como se mencionó anteriormente.

Tabla 1. Análisis de métodos de muestreo y estimación de biogás a partir de residuos de alimentos.

Autor	Residuos/lugar	Método	Tamaño de muestra/frecuencia	Producción de biogás
[8]	LR y RA/Comedor	Prensa de tornillo	-	-
[9]	AR y RA/Cafetería	APHA	-	65.2%CH4
[10]	LX y RA/Cafetería Universitaria	-	20kg/Una vez cada 3 meses	86% y ~ 3 L/d
[11]	EL, EC, EP, PM, PS, RA, YC, EHC y HM/Granjas, Comedor, Municipio	-	2 y 1.5L/30 días	20%-30%
[12]	LR y RA/PTAR y Restaurante	-	555 ml	91%
[13]	LR, RA y RJ/Comedor Universitario y PTAR	Zhang et al. (2015b)	300 ml	314,9 ± 17,1 mL/g de VS
[14]	AR, A y RA/Restaurante	-	-	790 ± 89 mL g VSin - 1 (68 ± 8 L d-1)
[15]	EG/PTAR	-	150ml	-
[16]	FORSU/Relleno Sanitario	Jensen	2-3 kg	-
[17]	LS, EV, RR, LC y	-	50kg	No especifica por ser baja

	LV/Industria de Carne			
[18]	RA y LA/Residencia	-	-	127,05 mLCH4 g-1 VSadded
[19]	FORSU/Relleno Sanitario	APHA	-	3.5L1 d1
[20]	ARP, HC y PCS/No especifica	APHA	-	-
[21]	RC/Instalación de sacrificios y cervecería	-	-	9.5 y 650.9 mLCH4 gVS1
[22]	RA y LARP/Restaurante y Residencia	-	800ml	-
[23]	RSU/PTAR, comercios y panaderías	-	750 ml	3 a 6 veces mejor

Fuente: Generación propia. Nota: RA-Residuos de Alimentos, LR-Lodos Residuales, AR- Aguas Residuales, LX – Lixiviados, ARP-Aguas Residuales de Pintura, HC-Harina de Concha de Caracol, PCS-Lodos de poscoagulación, RSU-Residuos Sólidos Urbanos, EL- Estiércol Lácteo, EC- Estiércol de Cerdo, EP-Estiércol de Pollo, PM-Paja de Maíz, PS-Paja de Soja, YC-Yuca, EHC-Extracción de Hierbas Chinas, HM-Harina de Maíz, PTAR-Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, RJ- Residuos de Jardín, A-Algas, FORSU-Fracción Orgánica Residuos Sólidos Urbanos, EG-Estiércol de Ganado, LARP-Lodo Agua Residuales Porcinas, RC-Residuos de Cervecería, EV-Estiércol de Vaca, RR-Residuos Rúmiales, LC-Lodos de Cerdo, LV-Lodos de Vaca, LA-Lodos de depuradora y LS-Lodos Secundarios.

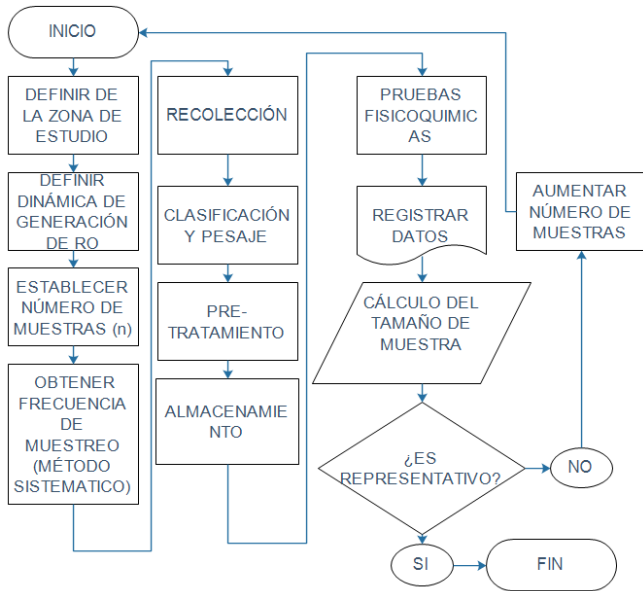
Por lo anterior, en este artículo se presenta una propuesta metodológica basada en procedimientos estadísticos, que permiten la caracterización de residuos de alimentos ya sean de una fuente única o de la mezcla de diferentes fuentes de generación. En esta metodología se propone que todo el procedimiento de muestreo se realice en el sitio de generación de residuos, en lugar del sitio de disposición final; además permite hacer una caracterización físico-química de los RA con el mínimo de incertidumbre, permitiendo que estos residuos que presentan una gran variabilidad, puedan ser tratados y aprovechados para la producción de biogás, y por ende que no sean dispuestos en los rellenos sanitarios ocasionando problemas ambientales, principalmente focos de infección y generación de gases de efecto invernadero, causantes de daños en la flora, fauna y salud pública.

2. METODOLOGÍA PROPUESTA DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS DE ALIMENTOS

Se propone una metodología de caracterización de RA que considera el proceso de muestreo en el sitio de generación. Lo anterior, tiene la ventaja de estudiar un residuo que no se encuentra contaminado, además de simplificar el proceso para realizar la separación, cuantificación y determinación de la composición física del residuo. En la figura 1, se presenta un esquema con la metodología propuesta para la

caracterización de RA y permite tener un panorama general de este proceso. Para la implementación de esta metodología, es fundamental realizar un estudio de diagnóstico basado en encuestas y/o entrevistas, para poder definir la zona de estudio y la dinámica de generación de RA. Este aspecto es crucial para establecer el número de muestras y la frecuencia de muestreo.

Fig. 1. Esquema de metodología propuesta para la caracterización de RA.



2.1 Tipo de muestreo

Existen diferentes métodos estadísticos básicos de muestreo, como lo son el aleatorio simple, estratificado, por conglomerados y el sistemático. Cada método tiene sus virtudes y casos particulares de uso, sin embargo, para este tipo de evaluaciones el más conveniente es el “método sistemático”, ya que a diferencia del aleatorio simple, este brinda una certeza de abarcar todo el universo que se busca analizar y al hablar de una única población ordenada, se puede omitir el método por conglomerados y estratificados. Sin embargo, es posible que se presente el caso en el que se tengan que utilizar cualquiera de los demás métodos, ya que este es definido con base a la zona de estudio, la dinámica de generación de residuos y el objetivo de la investigación [24].

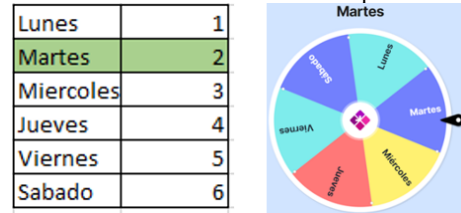
El método sistemático consiste en seleccionar un elemento de arranque (A) de manera aleatoria y de ahí partir de un intervalo de sistemático hasta abarcar casi en su totalidad la población. Para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$K = \frac{N}{n} \quad [1]$$

Donde, K es el salto de muestra en muestra, N la población y n el número de muestra. También se debe considerar A como el arranque del muestreo.

Por ejemplo, para el caso hipotético en donde se desea caracterizar los residuos de alimentos de un restaurante que trabaja de lunes a sábado el valor de A puede ser determinado con un método aleatorio simple, tomando los primeros 6 números de la población a analizar, como se presenta en la figura 2. Se puede observar que para realizar el aleatorio simple se utilizó una ruleta virtual [25]. Con lo anterior, se ha definido el arranque del muestreo en el día martes.

Fig.2. Determinación del valor A de arranque de muestreos.



Para determinar la frecuencia del muestreo se hace uso de la ecuación (1). El número de población es definido en función del estudio diagnóstico basado en entrevistas o encuestas. Para el caso hipotético planteado, considerando los primeros 6 meses del año 2023; el tamaño de población N es de 151 mientras que n es de 24, por lo que se tiene un valor de $K = 6.29 \approx 6$. Es importante mencionar que, la población se definió con el conteo de los días hábiles y la muestra como el número de semanas de los 6 meses. En la Tabla 2 se presenta el arreglo del número de muestreos y la frecuencia de estos, durante el periodo de estudio propuesto.

Tabla 2. Calendario de toma de número de muestras y frecuencia de muestreo.

Año 2023		
# de muestra	Fecha	# de población
1	03 DE ENERO	2
2	10 DE ENERO	8
3	17 DE ENERO	14
4	24 DE ENERO	20
5	31 DE ENERO	26
6	8 DE FEBRERO	32
7	15 DE FEBRERO	38
8	22 DE FEBRERO	44
9	01 DE MARZO	50
10	09 DE MARZO	56
11	16 DE MARZO	62
12	24 DE MARZO	68
13	31 DE MARZO	74
14	7 DE ABRIL	80
15	14 DE ABRIL	86
16	21 DE ABRIL	92
17	28 DE ABRIL	98
18	06 DE MAYO	104
19	13 DE MAYO	110
20	20 DE MAYO	116
21	27 DE MAYO	122
22	03 DE JUNIO	128
23	10 DE JUNIO	134
24	17 DE JUNIO	140
25	24 DE JUNIO	146

La estimación del tamaño de muestra representativa [26] se basa en la siguiente ecuación:

$$n = \frac{(z_{\alpha/2})^2 * s^2}{\delta^2} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \quad [2]$$

Donde, n es el tamaño de muestra representativa, Z es el valor del eje de las abscisas de la función normal estándar, α es el nivel de significancia, s^2 es la varianza, δ^2 es el error de estimación o absoluto y N es el tamaño de la población.

Cabe mencionar que, para este estudio, el cálculo de tamaño de muestra se aplicará una vez que se implemente la metodología propuesta.

2.2 Caracterización del residuo

Después de haber aplicado el método sistemático para determinar el número de muestras y la frecuencia de muestreo; y el método aleatorio simple para el punto inicial de los muestreos; se deben cuantificar, clasificar y analizar fisicoquímicamente los RO. Para esto es necesario llevar a cabo el siguiente procedimiento:

- 1. Recolección sistemática (según frecuencia establecida):** Los residuos serán recolectados de la zona de interés, y las muestras serán depositadas en contenedores de plástico. El tamaño del recipiente de plástico dependerá de la cantidad de RO esperada según el estudio diagnóstico de las entrevistas y encuestas.

NOTA: Sólo si aplica, se debe separar manualmente cualquier residuo inorgánico como bolsas de plástico, empaques, latas, etc.

2. Cuantificación:

- 1. Pesaje:** Pesar en una báscula e identificar el tipo de residuo recolectado (vegetales, frutas, comida cocida, cueros, huesos, pan, arroz, etc.). Este procedimiento se realiza todos los días.
- 2. Pre-tratamiento:** Debido a que los residuos de comida son de gran tamaño, para facilitar su caracterización es necesario realizar un pre-tratamiento mecánico, que consiste en triturarlos para reducir el tamaño de partícula (< 5mm). La trituración de los residuos se hará diariamente, cada tres días o semanalmente; dependiendo de la cantidad de residuos generados en la zona de estudio.
- 3. Almacenamiento:** Una vez triturada la materia orgánica, se debe colocar en un recipiente de plástico hermético y almacenarse a una temperatura menor a 10 °C, esto ayuda a mantener el residuo bajo las mismas condiciones en que fue recolectado, evitando su degradación, ya que se tomarán muestras para la caracterización físico-química del residuo.

NOTA: De todo el residuo sólido orgánico recolectado en la semana, sólo se almacenará una muestra representativa para

los análisis físico-químicos. Esta muestra deberá ser suficiente para poder realizar tres réplicas para los análisis fisicoquímicos.

- 4. Caracterización fisicoquímica:** Realizar análisis físico-químicos a los residuos recolectados, determinando cada uno de los parámetros que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.- Parámetros de análisis físico-químicos de los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales (Nakasima, et al., 2017).

Parámetros	Unidad de medida	Método de análisis
Temperatura	°C	NMX-AA-007-SCFI-2013
pH	-	NMX-AA-25-1984
Densidad	g/L	NOM-021-RECNAT-2000
Humedad	%	NMX-AA-016-1984
Sólidos totales	mg ST/L	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos volátiles totales	mg ST/L	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos fijos totales	mg SFT/L	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos volátiles totales	%	Montes M., 2008
Cenizas	%	Montes M., 2008
Demanda Química de Oxígeno	mg DQO/L	USEPA NMX-AA-030-SCFI-2001 (C) Hach Method 10128 NMX-AA-089/2-SCFI-2010
C/N	-	(N) Hach Method 10072 NMX-AA-024-1984

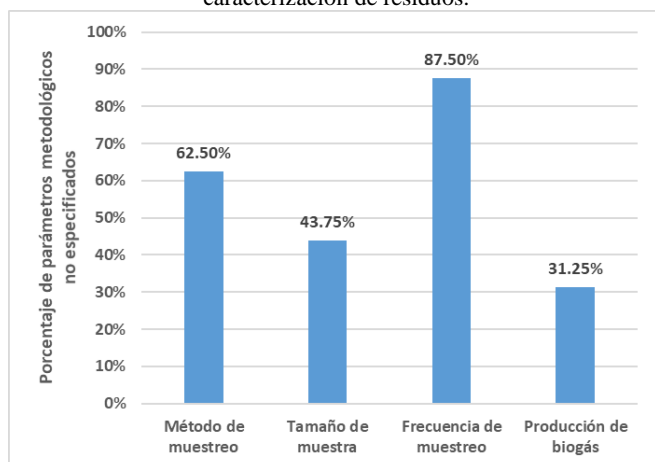
3. RESULTADOS

Con base a la investigación presentada en la Tabla 1, se observa que la información disponible carece de parámetros específicos en cuanto a la determinación del método de muestreo, tamaño y frecuencia de la muestra, así como la generación de biogás. En la figura 3, se observa que la frecuencia de muestreo fue el parámetro que menos se reportó; sólo el 37.5% de los estudios presentaron el método de muestreo, mientras que el 56.4% reportaron el tamaño de muestra; finalmente el 68.75% presentaron la producción de biogás.

Por lo anterior, se observa que no existe un método estandarizado para la caracterización de los RA, provocando un alto nivel de incertidumbre en los resultados reportados para la producción de biogás, ya que estos pueden ser subestimados o sobreestimados. Además de dificultar la comparación entre estudios y su replicabilidad. Por otro lado, la carencia de datos reportados, dificultan el diseño e implementación de tecnologías de digestión anaeróbica. Por lo que es indispensable el desarrollo de metodologías que

cuenten con replicabilidad y criterios claros para establecer los parámetros metodológicos.

Figura 3. Parámetros metodológicos no presentados en estudios de caracterización de residuos.



En este estudio se propuso una metodología que contempla de manera cualitativa los parámetros metodológicos que se mencionan en la figura 3. Cabe mencionar que el método propuesto para la caracterización de residuos de alimentos, se encuentra en fase de implementación; sin embargo, el análisis realizado en esta investigación, sirve como punto de partida para mejorar las metodologías encontradas en la literatura, tomando como base los puntos más importantes antes mencionados.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La metodología propuesta permitirá realizar de manera sistemática la caracterización fisicoquímica de los RA de cualquier fuente de generación, y con el mínimo grado de incertidumbre debido a las siguientes características:

1. Este método se basa en caracterizar los RA en el sitio de generación, evitando la contaminación que se genera en el sitio de disposición final, debido a la descomposición de dicho residuo y por contacto con otros materiales.
2. La metodología propuesta se basa en análisis estadísticos, el cual determina si el tamaño de muestra es representativo en cuanto a cantidad y composición.
3. Esta propuesta metodológica se diseñó considerando la variabilidad que tienen los residuos de alimentos en cuanto a su cantidad y composición fisicoquímica, independientemente de su fuente de generación. Además de considerar los criterios para establecer los parámetros que no suelen reportarse en la literatura.

5. REFERENCIAS

- [1] R. Feiz, M. Johansson, E. Lindkvist, J. Moestedt, S. N. Pålédal, and F. Ometto, 'The biogas yield, climate impact, energy balance, nutrient recovery, and resource cost of biogas production from household food waste—A comparison of multiple cases from Sweden', *J Clean Prod*, vol. 378, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134536.
- [2] L. Xue *et al.*, 'Missing food, missing data? A critical review of global food losses and food waste data', 2017. [Online]. Available: <http://pubs.acs.org>
- [3] S. Kaza, L. C. Yao, P. Bhada-Tata, and F. van Woerden, *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Accessed: Feb. 11, 2023. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10986/30317>
- [4] S. M. H. Beinabaj, H. Heidarian, H. M. Aleii, and A. Hosseinzadeh, 'Concentration of heavy metals in leachate, soil, and plants in Tehran's landfill: Investigation of the effect of landfill age on the intensity of pollution', *Heliyon*, p. e13017, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13017.
- [5] K. Abeliotis, K. Lasaridi, V. Costarelli, and C. Chroni, 'The implications of food waste generation on climate change: The case of Greece', *Sustain Prod Consum*, vol. 3, pp. 8–14, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.spc.2015.06.006.
- [6] M. O. Nakasima-López, N. Velázquez-Limón, and S. Ojeda-Benítez, 'DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL SECTOR RESIDENCIAL MEDIANTE UN PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICO', Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, 2015.
- [7] S. Evangelisti, P. Lettieri, D. Borello, and R. Clift, 'Life cycle assessment of energy from waste via anaerobic digestion: A UK case study', *Waste Management*, vol. 34, no. 1, pp. 226–237, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.wasman.2013.09.013.
- [8] H. Tong, Y. W. Tong, and Y. H. Peng, 'A comparative life cycle assessment on mono- and co-digestion of food waste and sewage sludge', in *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 4166–4171. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.814.
- [9] A. Satayavibul and C. Ratanatamskul, 'A novel integrated single-stage anaerobic co-digestion and oxidation ditch-membrane bioreactor system for food waste management and building wastewater recycling', *J Environ Manage*, vol. 279, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111624.
- [10] S. Saha, A. Hussain, J. Lee, E. Lee, and H.-S. Lee, 'An integrated leachate bed reactor – anaerobic membrane bioreactor system (LBR-AnMBR) for food waste stabilization and biogas recovery', *Chemosphere*, vol. 311, p. 137054, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.137054.
- [11] M. Wang, W. Li, P. Li, S. Yan, and Y. Zhang, 'An alternative parameter to characterize biogas materials: Available carbon-nitrogen ratio', *Waste Management*, vol. 62, pp. 76–83, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.02.025.

- [12] A. Leitão, D. Moni, and C. Maria, 'Anaerobic co-digestion of food waste with sewage sludge from wastewater treatment plant of Sequele, Luanda-Angola', *Environmental Challenges*, vol. 9, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.envc.2022.100635.
- [13] L. Mu, L. Zhang, K. Zhu, J. Ma, M. Ifran, and A. Li, 'Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: Synergistic enhancement on process stability and biogas production', *Science of the Total Environment*, vol. 704, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135429.
- [14] D. Marín *et al.*, 'Anaerobic digestion of food waste coupled with biogas upgrading in an outdoors algal-bacterial photobioreactor at pilot scale', *Fuel*, vol. 324, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124554.
- [15] R. Rajagopal and F. Béline, 'Anaerobic hydrolysis and acidification of organic substrates: Determination of anaerobic hydrolytic potential', *Bioresour Technol*, vol. 102, no. 10, pp. 5653–5658, May 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.02.068.
- [16] J. la Cour Jansen, H. Spliid, T. L. Hansen, Å. Svärd, and T. H. Christensen, 'Assessment of sampling and chemical analysis of source-separated organic household waste', *Waste Management*, vol. 24, no. 6, pp. 541–549, 2004, doi: 10.1016/j.wasman.2004.02.013.
- [17] I. M. Buendía, F. J. Fernández, J. Villaseñor, and L. Rodríguez, 'Biodegradability of meat industry wastes under anaerobic and aerobic conditions', *Water Res*, vol. 42, no. 14, pp. 3767–3774, 2008, doi: 10.1016/j.watres.2008.06.027.
- [18] H. Thakur, A. Dhar, and S. Powar, 'Biogas production from anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in continuously stirred tank reactor', *Results in Engineering*, vol. 16, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100617.
- [19] B. Zhu, R. Zhang, P. Gikas, J. Rapport, B. Jenkins, and X. Li, 'Biogas production from municipal solid wastes using an integrated rotary drum and anaerobic-phased solids digester system', *Bioresour Technol*, vol. 101, no. 16, pp. 6374–6380, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.03.075.
- [20] M. I. Ejimofor, I. G. Ezemagu, and M. C. Menkiti, 'Biogas production using coagulation sludge obtained from paint wastewater decontamination: Characterization and anaerobic digestion kinetics', *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 3, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.crgsc.2020.100024.
- [21] A. Ware and N. Power, 'Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland', *Renew Energy*, vol. 97, pp. 541–549, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.05.068.
- [22] S. F. Chiu, J. Y. Chiu, and W. C. Kuo, 'Biological stoichiometric analysis of nutrition and ammonia toxicity in thermophilic anaerobic co-digestion of organic substrates under different organic loading rates', *Renew Energy*, vol. 57, pp. 323–329, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.01.054.
- [23] R. Wickham, B. Galway, H. Bustamante, and L. D. Nghiem, 'Biomethane potential evaluation of co-digestion of sewage sludge and organic wastes', *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 113, pp. 3–8, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.ibiod.2016.03.018.
- [24] Y. Huan, T. Liang, H. Li, and C. Zhang, 'A systematic method for assessing progress of achieving sustainable development goals: A case study of 15 countries', *Science of the Total Environment*, vol. 752, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141875.
- [25] AppSorteos, 'La Ruleta Aleatoria', Mar. 22, 2023. <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:07bu-TdHlecJ:https://app-sorteos.com/es/apps/la-ruleta-decide&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=mx> (accessed Mar. 21, 2023).
- [26] J. A. García-García, A. Reding-Bernal, and J. C. López-Alvarenga, 'Cálculo del tamaño de la muestra en investigación en educación médica', *Investigación en Educación Médica*, vol. 2, no. 8, pp. 217–224, Oct. 2013, doi: 10.1016/s2007-5057(13)72715-7.