

## Aplicación de una metodología para la caracterización de residuos de alimentos para su aprovechamiento energético

Ing. Daniel Alfredo Ortiz Torres<sup>a</sup>, Dr. Ricardo López Zavala<sup>a\*</sup>, Dra. Mydory Oyuky Nakasima López<sup>b</sup>, Ing. José Raúl Sánchez Ramírez<sup>a</sup>, Dra. Frida Madrigal Estrada<sup>b</sup>, Dra. Sukey Sayonara Nakasima López<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, [daniel.alfredo.ortiz.torres@uabc.edu.mx](mailto:daniel.alfredo.ortiz.torres@uabc.edu.mx); [rlopez99@uabc.edu.mx](mailto:rlopez99@uabc.edu.mx); [raul.sanchez94@uabc.edu.mx](mailto:raul.sanchez94@uabc.edu.mx), Mexicali, Baja California, México.

<sup>b</sup> Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, [nakasima.mydory@uabc.edu.mx](mailto:nakasima.mydory@uabc.edu.mx); [kmadrigal@uabc.edu.mx](mailto:kmadrigal@uabc.edu.mx); [nakasima@uabc.edu.mx](mailto:nakasima@uabc.edu.mx); Tijuana, Baja California, México.

### Resumen

Las energías renovables juegan un papel de suma relevancia en la actualidad, ya que son estas las que nos están conduciendo a alcanzar el concepto de economía circular. En el día a día del ser humano se observa una generación de residuos cada vez mayor, lo cual ha marcado un antes y un después en la relevancia de técnicas que permitan la gestión adecuada de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Por lo antes dicho en este artículo se aplica una metodología que nos permite realizar un análisis fisicoquímico para su posible aprovechamiento en un proceso biológico conocido como digestión anaeróbica para la producción de biogás, en una universidad. Dicha metodología fue aplicada en el centro comunitario de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Campus Mexicali I, por todo un semestre (ciclo 2023-1) enfocándose únicamente en los Residuos de Alimento (RA) generados en la cafetería, donde el tiempo de recolección de muestra fue dictaminado por el método sistemático, para posteriormente ser recolectado en contenedores, dando un total de 130.19 kg. Una vez recolectado el residuo se procedieron a analizar sus parámetros fisicoquímicos siendo algunos; DQO, C:N, STV, STF, ST, entre otros, obteniendo 447,796.86 mg/L, 10.51, 163,406.16 mg/L, 14,912.20 mg/L, 178,318.35 mg/L respectivamente y resultando en una generación de biogás de 2.78 m<sup>3</sup>/día y un potencial de generación de energía eléctrica de 57.54 kW/día.

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

### Abstract

*Renewable energies play a very important role nowadays, since they are the ones that are leading us to achieve the concept of circular economy. In the daily life of human beings we observe an increasing generation of waste, which has marked a before and after in the relevance of techniques that allow the proper management of Municipal Solid Waste (MSW). Therefore, this article applies a methodology that allows us to perform a physicochemical analysis for its possible use in a biological process known as anaerobic digestion for the production of biogas at a university. This methodology was applied in the community center of the*

*Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Campus Mexicali I, for an entire semester (cycle 2023-1) focusing only on the Food Waste (FW) generated in the cafeteria, where the sample collection time was determined by the systematic method, to be later collected in containers, giving a total of 130.19 kg. Once the waste was collected, its physicochemical parameters were analyzed, including COD, C:N, STV, STF, ST, among others, obtaining 447,796.86 mg/L, 10.51, 163,406.16 mg/L, 14,912.20 mg/L, 178,318.35 mg/L respectively, resulting in a biogas generation of 2.78 m<sup>3</sup>/day and an electric power generation potential of 57.54 kW/day.*

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

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los problemas ambientales detectados en el campus Mexicali I de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), se centran principalmente en el manejo de los residuos generados durante las podas, el centro comunitario y los centros del complejo. El último dato disponible en publicaciones científicas, respecto a la generación de este campus, es el estudio realizado en 2008 por [1], el cual reportó que se tuvo una generación de una tonelada de residuos sólidos por día. Por otro lado, se mencionó que, durante los 14 días consecutivos de muestreo, en el centro comunitario de dicho campus se generaron 128.76 kg de Residuo de Alimentos (RA) provenientes de las áreas de tiendas, comedor y cafetería [1].

Los RA son biomasa con alto contenido de humedad que pueden ser aprovechados energéticamente. Uno de los tratamientos que se visualiza como opción viable para la gestión integral de este tipo de residuos, es el proceso de digestión anaeróbica (DA) [2]. Debido a todos los beneficios que otorga, siendo una de ellas la generación de energía térmica y/o eléctrica [3], [4].

El proceso de DA se lleva a cabo en un biodigestor anaeróbico en donde la materia orgánica se coloca en un recipiente completamente sellado, donde el proceso de descomposición de la biomasa lo realizan bacterias anaeróbicas que se desarrollan en la ausencia de oxígeno [5]. De la DA se puede obtener un biogás que sirve como combustible para proporcionar bioenergía y así ayudar a satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad tal como lo indicó [6].

Para poder estimar el potencial de generación de biogás de los RA, es fundamental conocer sus características fisicoquímicas, así como la dinámica de generación; lo que implica realizar un estudio de sus propiedades fisicoquímicas [7]. Desafortunadamente, en la actualidad hay poca información disponible sobre la tasa de generación de RA en campus Mexicali I, así como de su composición y caracterización fisicoquímica.

Por lo anterior, es necesario la realización de estudios que contribuyan a la generación de datos para estimar el potencial

de biogás que tienen los RA. Para esto es fundamental conocer la cantidad de residuo disponible y sus características fisicoquímicas. Conocer estos aspectos es el punto de partida para realizar un estudio que conlleva varios retos. Lo anterior se debe a que dicha caracterización es compleja debido a la gran variabilidad que presentan en peso y composición.

Lo antes mencionado lleva a emplear métodos de muestreo y caracterización, que permitan producir esta información de manera eficiente en cuanto a tiempo y costo se refiere. Los métodos de muestreo en muchas ocasiones presentan falta de claridad en el manejo, muestreo, tamaño de muestra, tipo, lugar y método efectuado, por lo que se hace necesario establecer una metodología replicable que permita su correcto manejo para su aprovechamiento y/o estudio.

En el presente artículo se muestra la metodología para el muestreo y caracterización fisicoquímica de los de RA de la cafetería de la UABC, campus Mexicali 1, con la finalidad de estimar el potencial de generación de biogás de estos residuos durante el periodo escolar 2023-1.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología a aplicar para este estudio fue propuesta en [8], siendo diseñada para casos en que las dinámicas de generación son inciertas tomando de ejemplo un restaurante hipotético. La dinámica de un restaurante puede ser comparable con una cafetería universitaria. Debido a que ambos poseen una población ordenada, se puede establecer un muestreo estadístico para la frecuencia de toma de RA. Por otra parte, esta metodología permite también evaluar si el tamaño de muestra es representativo.

En la siguiente, Fig. 1. se observa un esquema de la metodología realizada para el presente estudio. Por otro lado, los parámetros para la caracterización fisicoquímicos de los RA se presentan en la Tabla 2, así como las normas aplicables para cada parámetro.

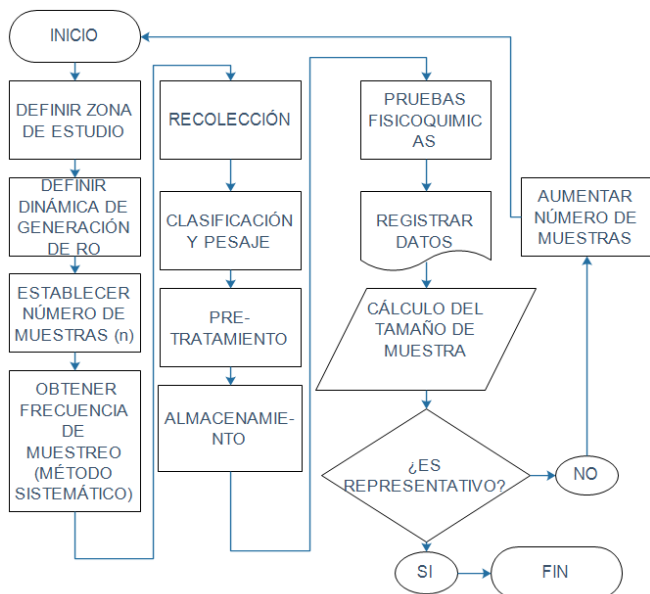


Fig. 1. Esquema de metodología para el muestreo de RA [8].

### 2.1 Cálculo de muestreo

Esta metodología emplea el método sistemático, el cual permite dentro una población ordenada (como lo es una universidad), abarcar de manera proporcional todo un ciclo escolar por sus días de operación. Al no saber la tasa de generación del RA, se estableció utilizar un muestreo sistemático, permitiendo tener un muestreo representativo de todo un ciclo escolar. Esto se debe considerar debido a la variabilidad en cuanto a su generación, composición y características fisicoquímicas; por otra parte, la tasa de generación de RA se ve afectada por diversos factores como día de preparación de alimentos, cambios de menú, estación del año, condiciones relacionadas con el clima (como lluvia que limita la presencia de alumnos), celebraciones/fiestas o eventos universitarios (la Feria del libro, por ejemplo).

Uno de los parámetros a utilizar es el Arranque (A), el cual se obtuvo de manera aleatoria, entre la primera semana (lunes a viernes), como se muestra en la Fig. 2. A este valor se le agrega el valor de K, el cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$K = \frac{N}{n} \quad (1)$$

Donde:

- K = salto de muestra en muestra
- N = población (cantidad de días laborales)
- n = número de muestra
- A = arranque del muestreo

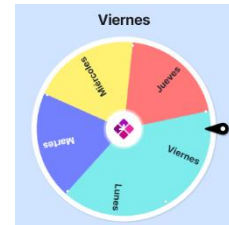


Fig. 2. Determinación del valor A de arranque de muestreos.

Con el fin de determinar los periodos para realizar el muestreo, se empleó la ecuación (1). El número de población es definido, en este caso, por los días hábiles que opera la cafetería de la UABC Campus Mexicali 1. En esta instancia, se consideraron los días hábiles marcados por el calendario oficial de la institución durante el periodo 2023-1; dando un número de población  $N=77$  y  $n=17$  (número de semanas para el periodo 2023-1), obteniendo un valor de  $K = 4.52 \approx 5$ . En la Tabla 2, se presenta el arreglo del número de muestreos y la frecuencia de estos, durante el periodo de estudio.

Cabe mencionar que, al momento de aplicar el método sistemático para la frecuencia de muestreo, salieron 15 semanas. Debido a que dos semanas quedan sin muestreo dado por este método, se decidió aplicar un método aleatorio

simple en las semanas que habían quedado sin muestreo otorgado por el método sistemático. Lo anterior en la Tabla 1.

Tabla 1. Calendario de toma de número de muestras y frecuencia de muestreo.

| Ciclo escolar 2023-1 |               |                |
|----------------------|---------------|----------------|
| # de muestra         | Fecha         | # de población |
| 1                    | 3 DE FEBRERO  | 5              |
| 2                    | 7 DE FEBRERO  | 6              |
| 3                    | 13 DE FEBRERO | 10             |
| 4                    | 20 DE FEBRERO | 15             |
| 5                    | 28 DE FEBRERO | 20             |
| 6                    | 7 DE MARZO    | 25             |
| 7                    | 14 DE MARZO   | 30             |
| 8                    | 23 DE MARZO   | 35             |
| 9                    | 30 DE MARZO   | 40             |
| 10                   | 13 DE ABRIL   | 45             |
| 11                   | 20 DE ABRIL   | 50             |
| 12                   | 27 DE ABRIL   | 55             |
| 13                   | 5 DE MAYO     | 60             |
| 14                   | 12 DE MAYO    | 63             |
| 15                   | 17 DE MAYO    | 65             |
| 16                   | 24 DE MAYO    | 70             |
| 17                   | 31 DE MAYO    | 75             |

**NOTA:** El segundo y catorceavo muestreo no indican los saltos de 5 días. El ajuste mencionado permite tener 1 muestreo por semana, y con ello un muestreo que abarque cada semana de ese ciclo.

La estimación del tamaño de muestra representativa se basa en la siguiente ecuación (El desarrollo de esta ecuación se encuentra en Resultados):

$$n = \frac{N Z^2 \sigma^2}{(N-1) e^2 + Z^2 \sigma^2} \quad (2)$$

Donde:

- n=tamaño de muestra representativa
- Z=valor de la desviación estándar según el valor de confianza
- $\sigma^2$ =varianza
- e=error de la muestra definido por el aplicador
- N=tamaño de la población.

### 3. CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO

Una vez establecido el periodo de muestreo utilizando el método sistemático y el método aleatorio simple; se debe

hacer una cuantificación, clasificación y posteriormente analizar fisicoquímicamente los RA. Para esto es necesario llevar a cabo el siguiente procedimiento:

#### 1. Recolección sistemática del RA (según frecuencia establecida):

El RA recolectado de la cafetería universitaria se llevó a cabo en contenedores de plástico (cubetas). Sólo si aplica, se debe separar manualmente cualquier residuo inorgánico como bolsas de plástico, empaques, latas, etc.

Se realizaron muestreos previos de manera aleatoria, con la finalidad de definir la dinámica de generación de RA y garantizar que estos recipientes tengan la capacidad suficiente para su recolección.

#### 2. Cuantificación:

2.1 Clasificación: Se debe separar cada RA para identificar el tipo de residuo recolectado (vegetales, frutas, comida cocida, cueros, huesos, pan, arroz, etc.), como se muestra en la Fig. 3. a continuación:



Fig.3. Separación por grupos de los RA.

2.2 Pesaje: Una vez clasificado y separado los RA se procede a pesar en una báscula (Fig. 4.). Posteriormente se registró el tipo y peso correspondiente. Este procedimiento se realizó todos los días determinados por el método sistemático y el aleatorio simple en las semanas 2 y 14 aplicado en la Tabla 1.



Fig.4. Pesaje de papa en báscula.

**3. Pre-tratamiento:** Para poder analizar el RA, se realizó un pre-tratamiento mecánico para así disminuir el tamaño del RA, aproximadamente < 5mm. En este estudio se contó con un molino de trituración mostrado en la Fig. 5.

El pre-tratamiento, preferentemente, debe realizarse el mismo día de la toma de muestras para evitar que cambien las propiedades fisicoquímicas debido a la actividad microbiana.



Fig.5. Molino triturador de RA.

**4. Homogeneización:** Una vez pre-tratado el RA, se realizó una homogeneización robusta, para este caso se empleó de manera manual con una duración de 10 a 15 minutos (Fig. 6.).



Fig.6. Homogeneización manual del RA ya pre-tratado.

**5. Almacenamiento:** Una vez triturado el RA, se debe colocar en un recipiente de plástico hermético y almacenarse a una temperatura entre 4°C-10 °C, esto para mantener el residuo bajo las mismas condiciones en que fue recolectado, evitando su degradación.

De todo el residuo sólido orgánico recolectado en la semana, sólo se almacenará una muestra representativa para los análisis fisicoquímicos; esta muestra deberá ser

suficiente para poder realizar tres réplicas para los análisis fisicoquímicos.

De no ser analizado al día siguiente, el RA deberá ser congelado (0°C) y se deberá descongelar durante 24 horas, una vez pasado este periodo de tiempo, se debe colocar en una campana de extracción (evitando el contacto con la luz del sol para evitar degradación) y se le debe dejar alcanzar temperatura ambiente. Si se va a analizar al día posterior, únicamente se almacena a 4°C y se deja alcanzar temperatura ambiente para su análisis.



Fig.7. Almacenamiento de RA en congelador para preservar propiedades fisicoquímicas.

**6. Caracterización fisicoquímica:** Se realizó el análisis físico-químico a los residuos recolectados, determinando cada uno de los parámetros que se muestran en la Tabla 2. Para el análisis de Carbono Total, Nitrógeno Total y Demanda Química de Oxígeno (DQO) se utilizó un reactor DRB 200 (Fig. 8.) y para el secado de muestras, un horno marca Arsa a 103°C (Fig. 9.).



Fig. 8. Reactor Hach a 150° C.



Fig. 9. Secado de muestras de RA

Tabla 2.- Parámetros de análisis de los residuos sólidos orgánicos y aguas residuales [7].

| 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 | (C) Hach Method 8000  |
| C/N                        | -        | (C) Hach Method 10128<br>NMX-AA-089/2-SCFI-2010<br><br>(N) Hach Method 10072<br>NMX-AA-024-1984 |

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1 Tamaño de muestra representativa

Aplicando la ecuación (2) para el cálculo de tamaño de muestra representativa (n) se obtiene una población de 77 (N) de todos los días hábiles en el ciclo 2023-1. Se tiene una desviación estándar obtenida de las tablas de distribución normal para 95% de confianza de 1.96 (Z), un valor de varianza recomendada cuando se desconoce el tamaño de muestra representativa 0.25 ( $\sigma^2$ ) y se establece un error de 0.05 (e) definido por el aplicador.

$$n = \frac{77 \cdot 1.96^2 \cdot 0.5^2}{(77-1) \cdot 0.05^2 + 1.96^2 \cdot 0.5^2} = 76.11$$

La ecuación del tamaño de muestra (n) indica que se debe realizar un muestreo de 76 muestras durante los 77 días que son el total de la población. Esto indica que se tendría que estar haciendo un muestreo diario, sin embargo, lo que se buscan en este estudio es establecer cuáles son los parámetros representativos fisicoquímicamente, por lo que realizar un muestreo todos los días no es recomendable dado el tiempo de los análisis y el costo de los reactivos. Es debido a esto que se decidió por buscar un cierto porcentaje entre esos días que abarquen al menos todas las semanas del ciclo escolar, ya que esto es lo alcanzable para la realización de los estudios fisicoquímicos. La cantidad de costos en reactivos, además de la capacidad de almacenamiento con la que se contó, no permitió el almacenamiento en grandes cantidades y tampoco por periodos largos, por lo que se optó por realizarse una vez a la semana.

Despejando la ecuación (2) para obtener e se obtiene:

$$e = \sqrt{\frac{N Z^2 \sigma^2}{n} - Z^2 \sigma^2} \quad (3)$$

Sustituyendo valores se obtiene:

$$e = \sqrt{\frac{77 \cdot 1.96^2 \cdot 0.5^2}{17} - 1.96^2 \cdot 0.5^2} = 0.2111$$

$$e = 21.11\%$$

Considerando el párrafo anterior, se abarcó el 22.07% del total de la población, de lo que se obtuvo un error de 21.11%, aparentemente este error puede considerarse alto dentro de la estadística, sin embargo, considerando la inconstancia que hay con la generación de RA, sumado a que el enfoque del presente artículo no es el cálculo de generación de RA como tal, sino conocer la composición fisicoquímica del RA a través del periodo escolar, este es aceptable. Si únicamente se enfocará en cuanto se genera de RA, si es viable la recolección diaria del residuo para este caso, ya que este puede ser realizado diariamente sin la necesidad de almacenamiento, gastos de reactivos ni largos periodos de análisis fisicoquímicos.

##### 4.2 Composición de los residuos de alimentos

Durante este ciclo escolar se recolectó 130.19 kg en total de RA en los 17 días muestreados, en la Fig. 8. observamos los porcentajes de los RA residuales presentes en la cafetería de la UABC Campus Mexicali 1.

Se puede observar que los grupos de “cereales y tubérculos” y “verduras” representan prácticamente el 70% del total de los residuos muestreados. Esto es importante, ya que al ser los predominantes, son lo que más inciden en los parámetros fisicoquímicos de los RA y por ende en la producción de biogás.

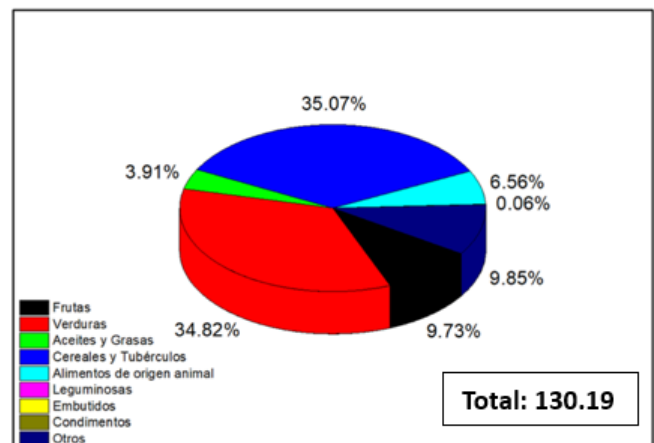


Fig.8. Clasificación del RA muestreado con base el Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes (SMAE) [9].

**NOTA:** Hay grupos que fueron nombrados por parte del aplicador debido a que no estaban en el SMAE, tales como Embutidos, Condimentos y Otros (siendo alimentos que no se pueden identificar a simple vista o suponen una separación imposible o compleja).

Por otro lado, en la Tabla 4 se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica de los RA. Estos parámetros son de relevancia para el proceso de DA, ya que nos permiten estimar el potencial de biogás y/o diseñar/elegir la tecnología apta para su gestión eficiente. Se observa que se tiene una densidad promedio de 1048.89 g/L, no igual, pero no tan lejana a los 1000 g/L que tiene el agua, cuestión que favorece a la DA, en su etapa de hidrólisis y al momento del cálculo de relación del sustrato [10]. Por otro lado, se obtiene un porcentaje favorable de humedad, siendo de 82.36%, lo que indica menor utilización de agua en la preparación del sustrato. Para los Sólidos Volátiles (SV%), obtenemos un porcentaje favorable siendo de 91.57%, indicando la posible cantidad de materia que es candidata a convertirse en biogás. Otra manera de interpretar este parámetro es con la Demanda Química de Oxígeno (DQO) la cual indica el material orgánico que se puede oxidar químicamente, es decir que puede ser degradado y convertido en biogás. El DQO promedio fue de 447,796.88 mg/L siendo mayor a lo reportado en otros estudios que caracterizaron fisicoquímicamente RA del sector residencial como en [7], reportando un DQO de 330,540 mg/L, esto se puede deber a la abundancia de frutas y verduras (fresa y papa) que hay en la cafetería del Campus Mexicali I.

Se cuenta con un pH y una relación Carbono-Nitrógeno (C:N) no favorable, ya que para el pH este se debe encontrar entre 6.5-7.5 y en C:N el ideal es 20. Sin embargo, el valor de pH al ser ácido se puede ajustar con una sustancia alcalina [11] y al tener una baja relación de C:N, su tiempo de retención hidráulica será mayor, pero esto no significa que estos RA no sean viables para la generación de biogás.

Por otra parte, estos parámetros fisicoquímicos y la cantidad de RA promedio recolectada, son datos fundamentales para poder diseñar el tipo de biodigestor a utilizar para el tratamiento de estos residuos [12].

### 4.3 Estimación del potencial de biogás de los RA

La tabla 5, muestra el potencial de biogás, metano y energético, con base a las ecuaciones propuestas por [7].

Para potencial de biogás  
 $PB = CMOVR \times Fbiogás$  (4)

Para potencial de metano:  
 $PM = PB \times fcmetano$  (5)

Para producción de energía:  
 $PE = PM \times \rho metano \times CEmetano$  (6)

En donde: *CMOVR* es Cantidad de materia orgánica volátil del residuo; *Fbiogás* corresponde al factor de biogás encontrado en la literatura y tiene un valor de 0.37 m<sup>3</sup>/kg SV [7]; *fcmetano* siendo el factor de metano que se encuentra en un rango de 0.6-0.7; *CE metano* es el contenido energético de metano y tiene un valor de 50.1 kJ/g.

Tabla 4.- Resultados obtenidos de los métodos mencionados en Tabla 2.

| SEMANA      | Densidad (g/L) | pH          | Residuo Sólidos Orgánicos |              |             |              |                  | C:N              |                 |                 |
|-------------|----------------|-------------|---------------------------|--------------|-------------|--------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
|             |                |             | Humedad (%)               | MOS (%)      | Cenizas (%) | SV (%)       | ST(mg/L)         |                  | STV(mg/L)       | STF(mg/L)       |
| 1           | 1046.26        | 5           | 82.72                     | 17.28        | 8.10        | 91.90        | 177239.33        | 162871.33        | 14368.00        | N/R             |
| 2           | 1053.11        | 4           | 82.55                     | 17.45        | 7.26        | 92.74        | 179160.00        | 166161.33        | 12998.67        | 9.93            |
| 3           | 1040.23        | 4           | 80.68                     | 19.32        | 8.02        | 91.98        | 199228.00        | 183248.00        | 15980.00        | 3.33            |
| 4           | 1056.72        | 4           | 83.85                     | 16.15        | 8.39        | 91.61        | 165180.67        | 151320.00        | 13860.67        | 16.21           |
| 5           | 1046.97        | 4           | 82.89                     | 17.11        | 7.64        | 92.36        | 171015.33        | 157946.00        | 13069.33        | 3.16            |
| 6           | 1024.37        | 4           | 79.86                     | 20.14        | 7.52        | 92.48        | 196706.00        | 182011.33        | 14694.67        | 6.96            |
| 7           | 1051.64        | 4           | 83.19                     | 16.81        | 8.72        | 91.28        | 171871.33        | 156880.00        | 14991.33        | 9.18            |
| 8           | 1034.51        | 4           | 86.34                     | 13.66        | 11.11       | 88.89        | 134408.00        | 119471.33        | 14936.67        | 7.61            |
| 9           | 1047.19        | 4           | 82.64                     | 17.36        | 8.26        | 91.74        | 177951.33        | 163256.67        | 14694.67        | N/R             |
| 10          | 1049.18        | 4           | 83.92                     | 16.08        | 9.24        | 90.76        | 161962.00        | 146993.33        | 14968.67        | 9.88            |
| 11          | 1051.26        | 4           | 79.56                     | 20.44        | 8.41        | 91.59        | 202838.67        | 185780.00        | 17058.67        | 10.09           |
| 12          | 1062.31        | 4           | 81.92                     | 18.08        | 9.35        | 90.65        | 182918.00        | 165822.00        | 17096.00        | 12.15           |
| 13          | 1054.58        | 4           | 81.83                     | 18.17        | 9.88        | 90.12        | 184802.67        | 166522.00        | 18280.67        | 22.27           |
| 14          | 1073.09        | 4           | 77.00                     | 23.00        | 7.83        | 92.17        | 239732.00        | 220968.67        | 18763.33        | 15.33           |
| 15          | 1044.17        | 4           | 85.05                     | 14.95        | 7.28        | 92.72        | 148173.33        | 137382.67        | 10790.67        | N/R             |
| 16          | 1050.01        | 4           | 84.86                     | 15.14        | 9.37        | 90.63        | 147499.33        | 133669.33        | 13830.00        | N/R             |
| 17          | 1045.56        | 4           | 81.25                     | 18.75        | 6.88        | 93.12        | 190726.00        | 177600.67        | 13125.33        | N/R             |
| <b>PROM</b> | <b>1048.89</b> | <b>4.06</b> | <b>82.36</b>              | <b>17.64</b> | <b>8.43</b> | <b>91.57</b> | <b>178318.35</b> | <b>163406.16</b> | <b>14912.20</b> | <b>10.50872</b> |

Tabla 5.- Cálculo de potencial de biogás, metano y energético

| Semana | SV (%) | RA (Kg/día) | PB (m <sup>3</sup> /día) | PM (m <sup>3</sup> /día) | PE (kWh/día) |
|--------|--------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| 1      | 91.90  | 1.3855      | 0.4711                   | 0.3062                   | 9.7356       |
| 2      | 92.74  | 5.7548      | 1.9748                   | 1.2836                   | 40.8104      |
| 3      | 91.98  | 10.8455     | 3.6910                   | 2.3992                   | 76.2775      |
| 4      | 91.61  | 10.65174    | 3.6104                   | 2.3468                   | 74.6118      |
| 5      | 92.36  | 16.0851     | 5.4967                   | 3.5728                   | 113.5925     |
| 6      | 92.48  | 14.5922     | 4.9929                   | 3.2454                   | 103.1827     |

|             |              |               |               |               |                |
|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| 7           | 91.28        | 10.4793       | 3.5391        | 2.3004        | 73.1383        |
| 8           | 88.89        | 3.8064        | 1.2519        | 0.8137        | 25.8709        |
| 9           | 91.74        | 7.2068        | 2.4463        | 1.5901        | 50.5547        |
| 10          | 90.76        | 7.3194        | 2.4579        | 1.5976        | 50.7939        |
| 11          | 91.59        | 12.9846       | 4.4003        | 2.8602        | 90.9352        |
| 12          | 90.65        | 7.4644        | 2.5037        | 1.6274        | 51.7409        |
| 13          | 90.12        | 14.2707       | 4.7584        | 3.0930        | 98.3358        |
| 14          | 92.17        | 5.0037        | 1.7064        | 1.1092        | 35.2641        |
| 15          | 92.72        | 2.3402        | 0.8028        | 0.5218        | 16.5907        |
| 16          | 90.63        | 6.9665        | 2.3361        | 1.5185        | 48.2777        |
| 17          | 93.12        | 2.6046        | 0.8974        | 0.5833        | 18.5447        |
| <b>PROM</b> | <b>91.57</b> | <b>8.2213</b> | <b>2.7845</b> | <b>1.8100</b> | <b>57.5446</b> |

Anteriormente, se mencionó que entre mayor sean los SV del residuo a tratar, mayor será la producción de biogás; sin embargo, la generación de biogás también depende de la cantidad de RA. Por ejemplo, en la Tabla 5, se observa que el Potencial de Biogás (PB) es mayor para la semana tres que para la semana dos.

Con una generación promedio diaria de 8.22 kg de RA se puede esperar una generación de biogás de 2.78 m<sup>3</sup>/día, lo cual es un parámetro determinante para la evaluación de factibilidad del tratamiento de DA para los RA del centro comunitario de la UABC, Campus Mexicali I. Con esta cantidad de biogás y considerando su calidad del 65% (valor teórico recomendado en [13]), el potencial eléctrico promedio es de 57.5 kWh/día. El total de biogás que se pudo haber generado durante el periodo escolar 2023-1 es de 215.6 m<sup>3</sup> y si se utiliza para la generación de energía eléctrica, el potencial eléctrico estimado durante todo este semestre es de 4,430.93 kWh.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró emplear una metodología diseñada para la caracterización de un residuo con varios retos, tales como su alta variabilidad en composición, volumen, tiempo de recolección y análisis. Con base a métodos estadísticos se brindó una secuencia de trabajo sistematizada, abarcando así una muestra en diferentes días de cada semana de todo el ciclo escolar 2023-1, de tal manera que, se tendrían presentes casi todos los escenarios posibles que puede haber en una cafetería universitaria en todo un ciclo escolar, por ejemplo, diferente día de preparación de alimentos, cambios de menú, estación del año, celebraciones/fiestas, cuestiones climatológicas (lluvia), causas naturales (temblores) o eventos universitarios (la Feria del libro, por ejemplo).

La parte social juega un rol muy importante en la concientización del manejo de los residuos. Se tuvieron que realizar muestreos previos al estudio en cuestión para la determinación de la dinámica de generación, en dichos muestreos por parte de los usuarios, hubo inconvenientes como; separar los RA del material inorgánico y disponerlo de manera habitual, de tal manera que no hubo recolección. Son estas malas prácticas las que pueden llevar a ajustes en el muestreo [14]. Es por eso que es muy importante realizar muestreos preliminares para capacitar a los usuarios involucrados en el estudio, y que estos NO sepan el día que

se va a muestrear para evitar alteración en la muestra, por ejemplo, guardar el residuo generado y mezclarlo con un día no correspondiente (guardar el residuo del lunes para ser entregado junto con la muestra del martes).

Una de las ventajas de trabajar con los RA en el sitio de origen son: una disminución de dificultad en su clasificación, ya que casi siempre el RA muestreado es fresco, no tiene un olor desagradable y, casi siempre, es sencillo identificar qué tipo es con solo observarlo.

Con la información desarrollada en este estudio, se puede ver que existe potencial de biogás con los RA de 2.7845(m<sup>3</sup>/día) en la cafetería de la UABC, Campus Mexicali I y un PE de 57.54 (kWh/día) lo que es equivalente a 15 paneles solares de 665 W. Sin embargo, deben realizarse más estudios de caracterización para incrementar el tamaño de muestra representativa y conocer las dinámicas de generación de RA que se tienen durante todo el año. Lo anterior permitirá hacer un correcto diseño de la tecnología a implementar, particularmente para este sitio de estudio. Con el análisis realizado en este proyecto, se podría optar por utilizar un biodigestor tipo CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) o de UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) tal como el propuesto en [7] que trabaja con generaciones de RA en grandes y bajos volúmenes. Por otro lado, el biogás generado puede utilizarse en las instalaciones de la UABC de la siguiente manera: sustituto de gas LP en el centro comunitario, laboratorios, para el calentamiento de la alberca olímpica de la UABC, para activar procesos de aire acondicionado termosolar por absorción, entre otras.

Finalmente, se recomienda buscar procesos de co-digestión anaeróbica para aumentar el rendimiento del potencial de biogás de los RA. Una propuesta en este sentido es la co-digestión de los RA y aguas residuales de la UABC de Mexicali Campus I; sin embargo, esto implica realizar más estudios.

## 6 AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CONAHCYT por el apoyo durante esta investigación a través de la beca de posgrado, así como al Instituto de Ingeniería y Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la UABC, que proporcionaron y facilitaron los medios para llevar a cabo esta investigación dentro del proyecto interno de UABC con clave 111/3394, titulado “Metodología para caracterizar residuos de alimentos y aguas residuales de la UABC, Campus Mexicali-I”.

## 7 REFERENCIAS

- [1] C. Armijo de Vega, S. Ojeda Benítez, and M. E. Ramírez Barreto, ‘Solid waste characterization and recycling potential for a university campus’, Waste Management, vol. 28, no. SUPPL. 1, 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2008.03.022.
- [2] Talan, A., Tiwari, B., Yadav, B., Tyagi, R. D., Wong, J. W. C., & Drogui, P. (2021). Food waste valorization: Energy production using novel integrated systems. In Bioresource

- Technology (Vol. 322). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124538>.
- [3] H. Long, X. Li, H. Wang, and J. Jia, 'Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26. Elsevier Ltd, pp. 344–352, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2013.05.035.
- [4] A. Ghimire et al., 'Bio-hythane production from microalgae biomass: Key challenges and potential opportunities for algal bio-refineries', *Bioresour Technol*, vol. 241, pp. 525–536, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.05.156.
- [5] Alves, I. R. F. S., Mahler, C. F., Oliveira, L. B., Reis, M. M., & Bassin, J. P. (2022). Investigating the effect of crude glycerol from biodiesel industry on the anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in ternary mixtures. *Energy*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122818>
- [6] Lovrenčec L (2010) Highlights of socio-economic impacts from biogas in 28 target regions RA Sinergija
- [7] M. Nakasima-López, P. Taboada-González, Q. Aguilar-Virgen, and N. Velázquez-Limón, 'Adaptación de Inóculos Durante el Arranque de la Digestión Anaerobia con Residuos Sólidos Orgánicos', *Informacion Tecnologica*, vol. 28, no. 1, pp. 199–208, Feb. 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000100020.
- [8] D. Alfredo et al., 'Número Especial de la Revista Aristas: Investigación Básica y Aplicada'.
- [9] Pérez Lizaur AB y cols, SMAE, Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes.4 ed.
- [10] Aponte, P., Ervey, A., Pardo, E., Jairo, J., Distrital, U., & José De Caldas, F. (n.d.). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SUPERVISIÓN, MONITOREO Y CONTROL DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y TIEMPO DE PROCESO EN UN SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAERÓBIA DE BIOMASA (CONTENIDO RUMINAL BOVINO) A ESCALA DE LABORATORIO.
- [11] Científico, A., Alexis Parra-Orobio, B., Torres-Lozada, P., Fernando Marmolejo-Rebellón, L., Marcela Cárdenas-Cleves, L., Vásquez-Franco, C., Alexander Torres-López, W., & Abdón Ordóñez-Andrade, J. (2014). *INFLUENCIA DEL pH SOBRE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE BIORRESIDUOS DE ORIGEN MUNICIPAL INFLUENCE OF pH ON ANAEROBIC DIGESTION OF MUNICIPAL BIO-WASTES* (Vol. 17, Issue 2).
- [12] Wang, M., Li, W., Li, P., Yan, S., & Zhang, Y. (2017). An alternative parameter to characterize biogas materials: Available carbon-nitrogen ratio. *Waste Management*, 62, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.025>
- [13] Tchobanoglous G., Burton F., Stensel H., 2004. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. Metcalf and Eddy, fourth ed. McGraw Hill, New York.
- [14] R. Mrosso, et al., Characterization of kitchen and municipal organic waste for biogas production: Effect of parameters, doi:10.1016/j.heliyon.2023.e16360.