

Evaluación del aprovechamiento de residuos de restaurante de la Universidad EAFIT mediante digestión anaerobia.

Manuela Echeverri Isaza^a, Manuela Palacio Vergara^a.

Oscar Hernán Vasco Echeverri^b

^a Estudiante de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín Colombia

^b Profesor de Ingeniería química, Asesor del Proyecto de Grado, Grupo de transmisión y distribución de energía eléctrica, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia

Resumen

El presente trabajo consistió en evaluar el aprovechamiento de los residuos orgánicos de restaurante (ROR) de la Universidad EAFIT mediante digestión anaerobia (DA) para obtener energía a partir de metano (CH_4). Se identificaron los tres restaurantes que generaban el 67% de los ROR en la Universidad, determinándose el contenido de sólidos totales (%ST) y volátiles (%SV), carbono orgánico total (%COT), humedad (%H) y nitrógeno (%N). Los resultados fueron analizados empleando la herramienta Statgraphics Centurion. La DA se evaluó mediante el ensayo de potencial bioquímico de metanización (PBM) llevado a cabo a escala de laboratorio en biodigestores tipo batch hasta que la producción de biogás fuera casi nula, y siguiendo el diseño de experimentos factorial 2×3 (2 días de recolección y 3 restaurantes). Cada ensayo se realizó bajo condiciones de temperatura y agitación de 34°C y 150 rpm respectivamente. Se utilizó como inóculo lodo activado anaerobio proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) San Fernando de Empresas Públicas de Medellín (EPM) sede Itagüí. Además, factores como el %ST y la relación inóculo-sustrato (I/S) se ajustaron en valores fijos para todas las mezclas evaluadas en el PBM con valores de 8% y 1 respectivamente. La producción de metano (CH_4) se cuantificó volumétricamente por medio de un eudiómetro cada 24 horas. Los restaurantes seleccionados como fuente de la biomasa a estudiar fueron denominados en este trabajo como A, B y C. Se evaluó la variabilidad en la producción de CH_4 por restaurante entre ambos días de recolección y entre los restaurantes, encontrando que no existe diferencia estadísticamente significativa, dando como resultado un porcentaje de remoción de los sustratos de 82% y una producción de $22.34 \text{ NmLCH}_4/\text{gSV}_{\text{elim}}$. Lo anterior permitió diseñar un biodigestor anaerobio para tratar los ROR generados en los restaurantes seleccionados, cuyo costo total aproximado es de \$7.345.529 COP y cuya operación durante el primer año deja un saldo de \$27.213.287 COP, según los resultados obtenidos en el flujo de caja.

1. Introducción

La generación de residuos sólidos orgánicos (RSO) a nivel mundial sigue una tendencia creciente debido al aumento poblacional, cambio en las dietas, patrones de consumo, ingresos per cápita en cada país, la creación o ampliación de la industria, la agricultura y ganadería intensiva, entre otros. La disposición de los residuos sólidos (RS) generados en la Universidad EAFIT empezó a ser parte de los intereses de la institución en el año 2011, con la formulación del plan de manejo integral de residuos sólidos (PMIRS), conformado por una serie de estrategias que buscan prevenir y/o minimizar la generación de RS, así como también educar a la comunidad universitaria en la separación adecuada en la fuente en canecas de diferente color [1] para mejorar las condiciones de trabajo del personal encargado de realizar la separación manual del material contenido en estas

y obtener materiales recuperados de mejor calidad [2]. Las empresas involucradas en el PMIRS son: Recuperar SAS encargada de la recolección de los subproductos reciclados, Emvarias (Grupo EPM) para la recolección de los residuos no reciclables que se disponen en el relleno sanitario “La pradera”, Ecologista que recupera los residuos biológicos y la empresa GDA que se encarga de tratar los ROR.

Una de las opciones estudiadas para el tratamiento de los RSO es la DA, tecnología que Acosta y Obraya definen como “una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como “biogás” y a una suspensión acuosa o “lodo” que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica” [3] con contenidos importantes de nutrientes [4]. Este tratamiento ha sido implementado en sistemas de digestión húmeda, semi-seca o seca con porcentajes de ST inferiores al 10%, entre el 10 y 20% y superiores al 20% respectivamente [5]. El sustrato utilizado como fuente del material a tratar es cualquier biomasa que tenga un alto contenido en humedad [3]. Un estudio realizado en la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) de la ciudad de Medellín, empleó ROR para ser tratados mediante DA [5]. Por otro lado, la Universidad de Málaga (UMA) evaluó la digestión y co-digestión anaerobia empleando residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuración o lodos activados resultantes del tratamiento de aguas residuales [6]. El biogás, puede emplearse en diversas aplicaciones como: fuente de energía térmica (cocción de alimentos, calentamiento de agua para duchas, luminarias, etc.), para la combustión en calderas de vapor o para ser conducido a un tanque de almacenamiento y luego llevado a unos motogeneradores para producir energía eléctrica empleada en atender requerimientos energéticos de las plantas productoras de biogás [3]. Por otro lado, el biosol, subproducto generado en el proceso de DA, puede utilizarse como abono orgánico para su posterior aplicación en suelos [7]. Lo anterior hace de esta alternativa una forma de contribución al desarrollo local sostenible en el largo plazo [8] ya que busca reincorporar a su ciclo productivo diferentes residuos potencialmente aprovechables a través de su reciclaje permitiendo enmarcar la DA como un modelo de economía circular [9].

Existen factores experimentales tales como las características fisicoquímicas del sustrato (%ST, %SV, COT, pH, alcalinidad, AGV's, tamaño de partícula), relación C/N e I/S y método seleccionado para cuantificar la producción de CH₄ en el ensayo PBM, además de factores operacionales como el pre-tratamiento del sustrato, diseño del biodigestor y control del mismo (temperatura, agitación, TRH y las condiciones establecidas para la carga orgánica inicial del biodigestor), las cuales condicionan no solo la composición del biogás sino también el desarrollo óptimo del proceso de DA [5] [10] [11]. Simulaciones usando el ADM1 [12] [13] han demostrado sobre un caso base en estado estacionario, que cambiar el valor de las diferentes concentraciones de entrada en el proceso de DA afecta la producción de biogás [14]. Recientemente, 70 artículos fueron analizados estadísticamente, concluyendo que la alimentación al proceso de digestión requiere pre-tratamientos correctivos dependiendo de sus características iniciales, las cuales varían dependiendo de la temporada, fuente y origen, con el fin de evitar inestabilidades en el proceso [15]. Se han estudiado diferentes métodos de pre-tratamiento biológico (pre-aireación, micro-aireación y adición de agentes degradadores), químico (ozonización y adición de ácido y base) y físico (reducción de tamaño, acondicionamiento de temperatura y ultrasonido) que permiten mejorar la cinética de biodegradación, optimizando la cantidad de gas producido [16].

En la universidad EAFIT, el semillero SIAM actualmente opera un dispositivo piloto que permite degradar algunos RS por medio del compostaje, también se ha realizado la simulación de un gasificador para producir gas de síntesis, ambas iniciativas con el fin de aprovechar los residuos generados en la universidad. Otros estudiantes han realizado proyectos de grado enfocados en diseñar un sistema de transformación de materia orgánica para acelerar el proceso de compostaje, así como el diseño conceptual de un sistema de DA. Sin embargo, la principal disposición de los RS orgánicos generados en la institución se realiza con un tercero (GDA), el cual se encarga de su disposición final. Este trabajo, enfocado en la evaluación de los RS orgánicos de restaurante (ROR) mediante la técnica de la DA, permitirá estudiar la caracterización del sustrato, potencial de producción de metano y diseño del dispositivo para tratar los residuos generados actualmente en los restaurantes de EAFIT, siendo una alternativa a considerar a futuro por el personal encargado de la gestión ambiental.

2. Materiales y métodos

2.1. Sustrato e inóculo utilizados

Los restaurantes que operan actualmente en la universidad EAFIT se clasificaron en dos grupos: el primero contenía los restaurantes que no producían alimentos al interior de su cocina, mientras que el segundo grupo, fueron los restaurantes que producían los alimentos al interior de su cocina, generando cantidades apreciables de ROR y además presentaban alta concurrencia. Los restaurantes que se encontraban en el primer grupo fueron descartados, mientras que los restaurantes ubicados en el segundo grupo fueron analizados en términos de la cantidad de ROR generados diariamente y mensualmente a través de la información de gestión de residuos de EAFIT suministrada por el departamento de ambiental de la Universidad, la cual también permitió realizar un análisis cuantitativo y cualitativo acerca de los diferentes tipos de RS que se generaron al interior de Campus en el año 2017. El análisis permitió seleccionar los restaurantes cuya producción de ROR fue significativa. Asimismo, se llevó a cabo una inspección visual en cada uno de los restaurantes durante una semana, para analizar cambios del material orgánico entre semana, y finalmente, se seleccionaron los ROR a caracterizar antes de iniciar el proceso de DA a través del PBM.

La recolección de los ROR se llevó a cabo in-situ, en bolsas plásticas de color beige, los días martes y jueves, durante una semana elegida al azar. Las bolsas fueron llevadas al laboratorio para ser pesadas empleando una balanza electrónica portátil (NA-317) y posteriormente se abrieron para realizar una inspección visual de los ROR recolectados y aplicar la técnica del cuarteo, que consistió en dividir en cuatro cuadrantes los ROR recolectados, y repetir nuevamente el mismo proceso con cada cuadrante hasta obtener tres muestras primarias por restaurante para cada día de recolección [17] (Figura 1). Durante el procedimiento, fueron eliminados materiales inorgánicos como vidrio, polímeros, metal entre otros. Las muestras primarias fueron trituradas usando un molino para granos (Universal Corona 0716). En ocasiones fue necesario disminuir previamente el tamaño de residuos largos (cáscaras) o gruesos (carnes), empleando un bisturí. El tamaño de partícula fue determinado con tamices, dando como resultado un rango entre 2 y 4.75 mm (Figura 2). Después los ROR fueron almacenados en bolsas con cierre hermético a -6°C en un congelador (Haceb Modelo N220L SE) para su posterior caracterización fisicoquímica en un tiempo máximo de 15 días después de la fecha de recolección. Cada muestra primaria se caracterizó por triplicado y los resultados fueron analizados empleando la herramienta Statgraphics centurión 8 para comprobar si existe diferencia estadísticamente representativa en el %ST a fin de mezclar las muestras primeras y obtener una única muestra de cada restaurante por día de recolección.



Figura 1. Composición de los ROR de los restaurantes seleccionados.

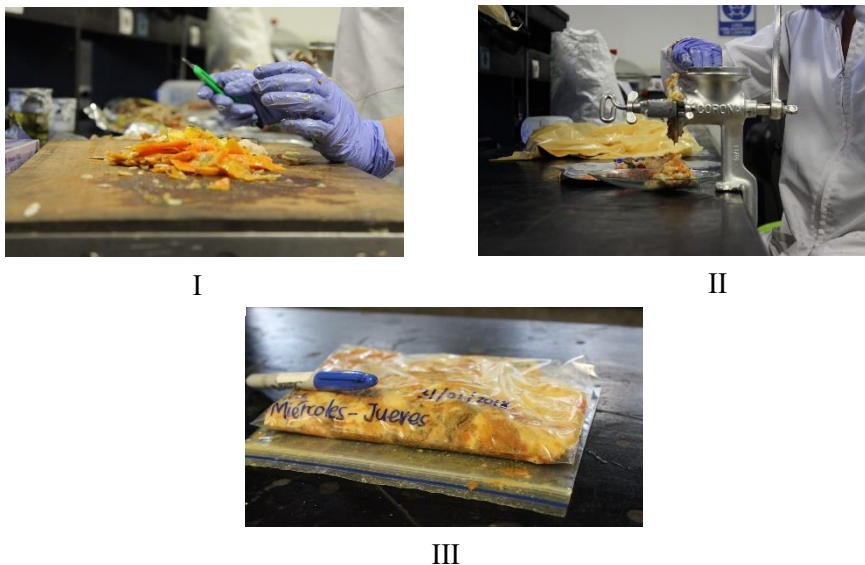


Figura 2. Acondicionamiento de los ROR
 I- Trituración inicial; II- Trituración final; III- Material almacenado en bolsas herméticas después de la reducción de tamaño

Se obtuvo lodo anaerobio de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) San Fernando de la empresa EPM ubicada en el municipio de Itagüí, directamente de la salida de los intercambiadores de calor. El lodo fue almacenado en un recipiente plástico a 4°C por un período máximo de 5 días. Para la caracterización del sustrato y del inóculo se determinó: % de humedad (H), % sólidos totales (ST), % sólidos volátiles (SV) y carbono orgánico total (%COT), según los procedimientos descritos en los anexos 1 y 2. Además, para el sustrato se determinó el nitrógeno total (%N) y potencial de hidrógeno (pH). El primero fue medido en un laboratorio externo certificado por el método basado en la norma ISO 17025 y el segundo se midió según el procedimiento descrito en el anexo 3.

2.2. Ensayo del Potencial Bioquímico de Metanización - PBM

El PBM de los ROR de la Universidad EAFIT se llevó a cabo a escala de laboratorio, en 18 biodigestores plásticos de 50 ml (tubos falcon), los cuales se usaron al 60% de su capacidad, fueron sellados con cinta de teflón industrial y soportados en una gradilla como se muestra en la Figura 3. La prueba se realizó durante varios días como lo describe Olaya y Gonzáles [18]. Los ensayos experimentales fueron controlados en una incubadora Heidolph Promax 2020, a temperatura mesofílica (35°C) y agitación continua de 150 rpm [5] [19] [20] teniendo en cuenta que se cubrió con un material oscuro para evitar crecimiento de micro algas al interior de los tubos como se muestra en la Figura 4. También, se realizaron pruebas de fugas a los tubos utilizando un compresor SFM (Modelo UB-30).

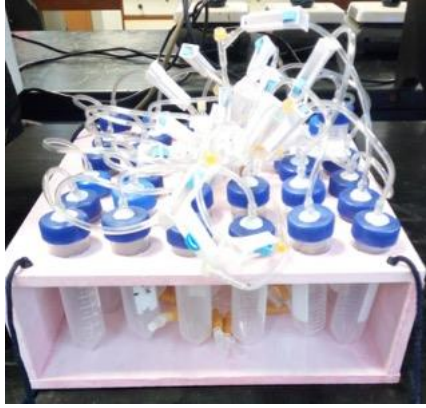


Figura 3. Montaje para el ensayo PBM



Figura 4. Incubadora Heidolph Promax 2020

Cada biodigestor fue alimentado con proporciones diferentes de sustrato, inóculo y agua (H₂O) para mantener un valor de %ST igual al 8% y una relación $SV_{inóculo}/SV_{sustrato}$ de 1, acorde a Cárdenas et. al [21]. Para calcular los gramos de inóculo, sustrato húmedo y H₂O a mezclar se emplearon las ecuaciones 1, 2 y 3 respectivamente y considerando una capacidad de trabajo de 30 g.

$$Inóculo [g] = \frac{\frac{SV_{inóculo}}{SV_{sustrato}} * \%ST * capacidad\ de\ trabajo [g] * Prom.\%SV\ sustrato\ húmedo}{Prom.\%SV\ inóculo\ húmedo} \quad Ecuación\ 1$$

$$Sustrato\ húmedo [g] = \frac{\%ST * capacidad\ de\ trabajo [g] - inóculo [g] * Prom.\%ST\ inóculo}{Prom.\%ST\ sustrato\ húmedo} \quad Ecuación\ 2$$

$$Agua [g] = Capacidad\ de\ trabajo [g] - inóculo [g] - Sustrato\ húmedo [g] \quad Ecuación\ 3$$

El volumen de CH₄ producido en el PBM se midió volumétricamente empleando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 4 M, con pH superior a 12 unidades para garantizar la reacción con el dióxido de carbono (CO₂) [21] y cuantificar únicamente el CH₄. La manguera conectada en la tapa del biodigestor permitió la salida del biogás y su posterior ingreso al eudiómetro con la solución básica como se muestra en la Figura 5. El pH inicial se ajustó a 7.6 en todos los recipientes, utilizando un pHmetro (Metrohm 827 pH lab) y una solución de NaOH 1M y HCl 0.1M a fin de llevar a cabo un PBM adecuado ya que el valor óptimo del pH en condiciones mesofílicas se sitúa entre 7.2 y 7.6 [5].

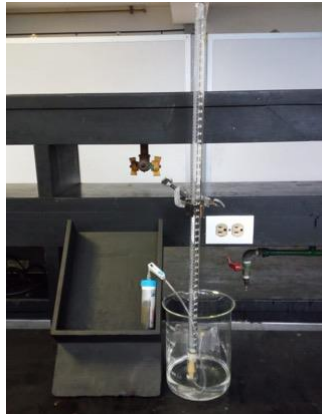


Figura 5. Montaje para la medición del biogás generado por el método volumétrico.

Adicionalmente se continuó ajustando el pH durante los primeros 5 días para aquellos que presentaron variaciones de pH por debajo de 7.1 [18]. Cada prueba fue realizada por triplicado [21], con el fin de promediar el resultado entre las que presentaran la menor desviación estándar para el mismo día de recolección tal y como lo propone el ensayo PBM [21]. El volumen de biogás generado se registró en ml cada 24 horas, reutilizando la solución desplazada en las demás mediciones y se halló su equivalente a condiciones estándar de 1 bar y 273.15K utilizando la ecuación de estado de los gases ideales presentada en la ecuación 4:

$$P_o * V_o * T_1 = P_1 * V_1 * T_o \quad \text{Ecuación 4 [22]}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_o = 0.85326 \text{ bar} \\ T_o = 299.15\text{K} \\ V_o = \frac{\text{mlCH}_4}{\text{gSVelim}} \end{array} \right. \longrightarrow \text{Condiciones del ensayo}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 1 \text{ bar} \\ T_1 = 273.15\text{K} \end{array} \right. \longrightarrow \text{Condiciones estándar}$$

$$V_1 [\text{NmlCH}_4/\text{gSVelim}] = \frac{\frac{\text{mlCH}_4}{\text{gSVelim}} * P_o * T_1}{P_1 * T_o}$$

2.3. Diseño del biodigestor para el aprovechamiento de ROR en la Universidad EAFIT

El diseño del biodigestor se planteó para tratar los ROR generados por los restaurantes A, B y C entre los días lunes y sábado. Para el diseño del biodigestor se tuvieron en cuenta una cámara de fermentación (cf) donde se lleva a cabo el proceso de DA cuya base tiene una pequeña curvatura para evitar acumulación de los lodos digeridos en las esquinas y una cúpula acoplada a una tubería que transporta el gas generado hacia el lugar donde se realiza su combustión. El biodigestor anaerobio opera en forma semicontinua, se alimenta diariamente con una mezcla de ROR y H₂O. El gas generado debe pasar por un post-tratamiento fisicoquímico para la remoción de diferentes compuestos [23] como el CO₂, monóxido de carbono (CO) y sulfuro de hidrógeno (H₂S) [24], permitiendo la obtención del componente de interés (CH₄).

El biodigestor se diseña con un valor de ST del 8%. Ajustando el %ST de los ROR a este valor, se obtiene la cantidad de H₂O necesaria para la carga del biodigestor. Lo anterior se lleva a cabo despejando el H₂O [kg] de la ecuación 5.

$$8\%ST = \frac{RORrequeridos[kg] * ST_{ROR}[\%]}{H_2Orequerida[kg] + RORrequeridos[kg]} \quad \text{Ecuación 5}$$

Una vez se obtienen los kg/día de H₂O y ROR para un 8% de ST, se calcula la carga total del biodigestor:

$$\text{Carga total [kg/día]} = ROR \text{ requeridos[kg]} + H_2O \text{ requerida[kg]} \quad \text{Ecuación 6}$$

El volumen efectivo del biodigestor se obtiene convirtiendo la carga total a unidades volumétricas con la densidad ponderada de ROR y H₂O de la siguiente manera:

$$\rho \text{ ponderada} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \rho_{H_2O} \left[\frac{kg}{m^3} \right] * X_{H_2O} + \rho_{ROR} \left[\frac{kg}{m^3} \right] * X_{ROR} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\text{Volume efectivo [m}^3\text{]} = \frac{\text{Carga total [kg]}}{\rho \text{ ponderada} \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \quad \text{Ecuación 8}$$

Considerando un factor de seguridad del 20%, se calcula la capacidad total de la cámara de fermentación (CTcf) empleando la ecuación 9.

$$CTcf [m^3] = (Factor\ de\ seguridad * Volumen\ efectivo [m^3]) + Volumen\ efectivo [m^3] \quad Ecuación\ 9$$

Teniendo en cuenta una relación altura/diámetro (hcf/Dcf) de 0.67, se calcula el diámetro de la cámara de fermentación (Dcf) y su altura (hcf), partiendo de las ecuaciones para un sólido cilíndrico.

$$Dcf[m] = \sqrt[3]{\frac{4 * \frac{hcf}{Dcf} * CTcf[m^3]}{\pi}} \quad Ecuación\ 10$$

$$hcf [m] = \frac{Dcf [m]}{\frac{hcf}{Dcf}} \quad Ecuación\ 11$$

Asumiendo un espesor de pared (e) igual a 0.2 m se calcula el diámetro externo de la cámara de fermentación (DEcf) seguido del volumen total externo de la cámara de fermentación (VTcf). Esto se hace a fin de garantizar el vaciado del material de construcción de la cf únicamente en el volumen correspondiente a dicho espesor.

$$DTcf[m] = Dcf [m] + 2 * e \quad Ecuación\ 12$$

$$VTcf[m^3] = \left(\frac{DTcf[m]}{2}\right)^2 * \pi * hcf [m] \quad Ecuación\ 13$$

El diseño de la cúpula se realiza teniendo en cuenta la generación promedio de CH₄ acumulada entre los restaurantes A, B y C como resultado del ensayo PBM, escalado a los ROR requeridos para alimentar el biodigestor diariamente. Además, según en el rendimiento de los ROR y el TRH obtenidos mediante el ensayo PBM, se calculan los SV que se espera sean eliminados, es decir, convertidos a CH₄ para finalmente calcular la generación total de CH₄ (G) en el biodigestor que posibilita encontrar la capacidad total de la cúpula (CTcu). Los cálculos se realizan en el orden a continuación:

$$SV_{iniciales\ en\ los\ ROR\ requeridos} [kg] = \frac{ROR\ requeridos [kg] * X}{Y} \quad Ecuación\ 14$$

Donde

X [kg] = Promedio de los kg de SV iniciales entre los restaurantes A, B y C evaluados en el ensayo PBM

Y [kg] = Promedio de los kg de ROR alimentados entre los restaurantes A, B y C a los biodigestores evaluados en el ensayo PBM

$$SV_{esperados\ a\ eliminar} [kg\ SV\ elim/día] = \frac{ROR\ requeridos [kg\ ROR/día] * \%SV_{elim\ PBM} \left[\frac{kg\ SV\ elim, PBM}{kg\ ROR} \right]}{100\%} \quad Ecuación\ 15$$

$$G [m^3/día] = SV_{esperados\ a\ eliminar} [kg\ SV\ elim/día] * M \quad Ecuación\ 16$$

Donde

G [m³] = Generación diaria de CH₄ en términos de los SV que se espera se conviertan a CH₄ para los ROR que ingresan al biodigestor.

M [m³CH₄ * SV_{elim}⁻¹] = promedio de la producción diaria de CH₄ obtenida en el ensayo PBM entre los restaurantes A, B y C.

Cabe mencionar que el CH₄ producido diariamente se transporta por una tubería acoplada en la parte superior de la cúpula, hasta el lugar donde se realizará su combustión. Es por esto que la cúpula no se diseña para almacenar CH₄. Sin embargo, en caso de que su consumo no se realice diariamente como se esperaría, la cúpula podrá contener como máximo el volumen de CH₄ producido en 2 días más un 30% adicional de factor de seguridad. Se sugiere la instalación de una antorcha con el fin de despresurizar el biodigestor en caso de ser necesario. Ya que la cúpula debe acoplarse a la cf, sus radios son iguales. Esta pieza fue diseñada considerando su geometría como la de un paraboloides elíptico. Las ecuaciones se implementan en el orden a continuación.

$$CTcu [m^3] = G [m^3/día] * 2 [día] * 1.3 \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\text{Altura interna de la cúpula} = hcu \text{ interna } [m] = \frac{2 * CTcu [m^3]}{(r[m])^2 * \pi} \quad \text{Ecuación 18}$$

Un operador ingresa los ROR a un triturador Modelo TR200G marca TRAPP [25] que posteriormente ingresarán a través de la tolva del mismo hacia la cámara de alimentación (ca) a la cual el mismo operador ingresa la cantidad de H₂O necesaria para la carga diaria del biodigestor. La mezcla de ROR y H₂O contenida en la ca es conducida a la cf a través de una tubería de PVC sanitaria marca PAVCO. Para el cálculo del diámetro (D) de la tubería se determinó que el volumen total debía ser evacuado en 2 horas, teniendo así el caudal necesario (Q). La velocidad (V) se tomó considerando que el flujo era viscoso (como caso más extremo) obteniendo un valor de 0.1 m/s [26]. Con estos dos datos se halla el diámetro de la tubería considerando una geometría cilíndrica y empleando la siguiente ecuación:

$$D [in] = \sqrt{\frac{Q [\frac{m^3}{h}] * 4}{V[\frac{m}{h}] * \pi}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Una vez se obtiene el diámetro se redondea al siguiente número y se selecciona la tubería para dicho diámetro del catálogo que presenta la marca PAVCO y costearla según la longitud de la tubería requerida [26].

La figura geométrica de la ca consiste en dos figuras tridimensionales: Un prisma cuadrado cuyo volumen interno $V_{p \text{ interno}}$ es el 90% del volumen de la capacidad total de la ca (CTca) y una pirámide cuyo volumen interno $V_{t \text{ interno}}$ es el 10% del volumen de CTca. Además se considera un factor de seguridad del 15% adicional a la carga diaria de la mezcla de ROR y H₂O para dimensionar la CTca y un espesor de pared de 0.2 m para calcular el volumen externo tanto de la pirámide $V_{t \text{ externo}}$ como del prisma $V_{p \text{ externo}}$. Las dimensiones de la ca según las especificaciones antes mencionadas se calculan siguiendo el orden de las ecuaciones a 20 - 30

En el caso del prisma, el área de la base externa es 2 veces $l_{p \text{ externo}}$. Para calcular la longitud interna de los lados superficiales del prisma, $l_{p \text{ interno}}$, se asumirá que la longitud equivale a la mitad de la altura del prisma h_p .

$$CTca [m^3] = \frac{\text{Carga total } [kg] * (1 + 0.15)}{\rho \text{ ponderada } [\frac{kg}{m^3}]} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$V_{p \text{ interno}} [m^3] = CTca [m^3] * 0.9 \quad \text{Ecuación 21}$$

Despejando, se tiene que

$$l_{p \text{ interno}} [m] = \sqrt[3]{2 * V_p [m^3]} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$l_{p \text{ externo}} [m] = l_p [m] + 2 * \text{espesor} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$h_{p\text{ externa}} [m] = \frac{l_p [m]}{2} + \text{espesor} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$V_{p\text{ externo}} [m] = (l_{p\text{ externo}} [m] * h_{p\text{ externa}} [m])^2 \quad \text{Ecuación 25}$$

En el caso de la pirámide, el área de la base interna de la pirámide ($A_{bt\text{ interna}}$) es igual al área de la base interna del prisma $A_{bp\text{ interna}}$

$$A_{bt\text{ interna}} [m^2] = A_{bp\text{ interna}} = l_{p\text{ interno}} [m] * l_{p\text{ interno}} [m] \quad \text{Ecuación 26}$$

$$V_{t\text{ interno}} [m^3] = CTca [m^3] * 0.1 \quad \text{Ecuación 27}$$

$$h_{t\text{ interno}} [m] = \frac{3 * V_{t\text{ interno}} [m^3]}{A_{bt\text{ interna}} [m^2]} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$A_{bt\text{ externa}} [m^2] = (l_{p\text{ interno}} [m] + \text{espesor}) * (l_{p\text{ interno}} [m] + \text{espesor}) \quad \text{Ecuación 29}$$

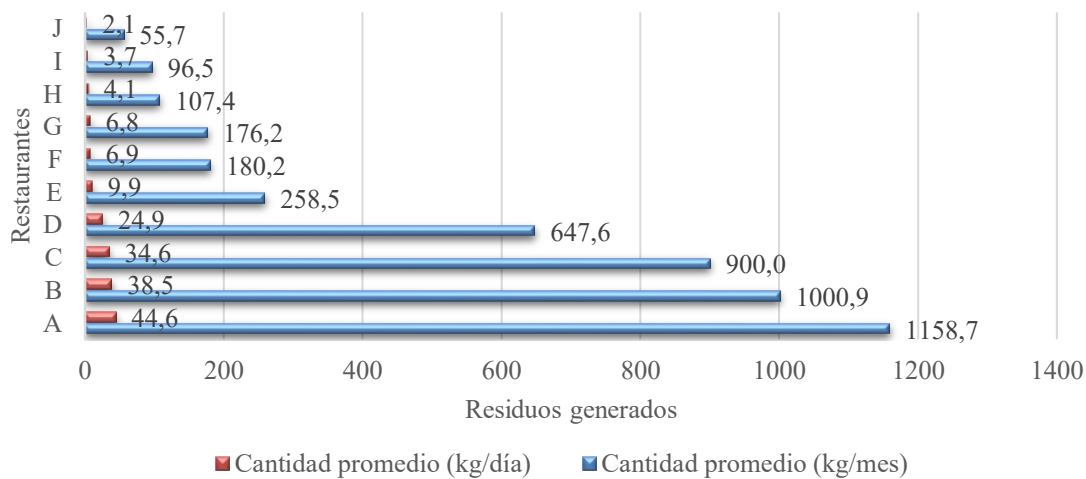
$$V_{t\text{ externo}} [m^3] = \frac{1}{3} * A_{bt\text{ externa}} [m^2] * (h_{t\text{ interno}} [m] + \text{espesor}) \quad \text{Ecuación 30}$$

Cabe mencionar que se calculó el costo total aproximado del diseño del biodigestor planteado anteriormente. Los costos incluyen el costo total aproximado de la cf, ca y la cúpula. La cf y la ca están enterradas en un porcentaje de 50% y 20% respectivamente y construidas en concreto de 21Mpa al igual que la cúpula. Para tal fin se calculó el volumen de excavación de la ca y cf seguido del volumen de llenado de concreto correspondiente al espesor de ambas piezas. Los costos asociados a la obra se consultaron con un Ingeniero Civil independiente de la ciudad de Medellín y se encuentran en las Tablas (12-15) del apartado resultados y análisis las cuales incluyen tanto el costo aproximado de obra de la cf, ca y cúpula como la tubería de alimentación previamente especificada, la bomba empleada para evacuar los lodos digeridos y la mano de obra (MDO).

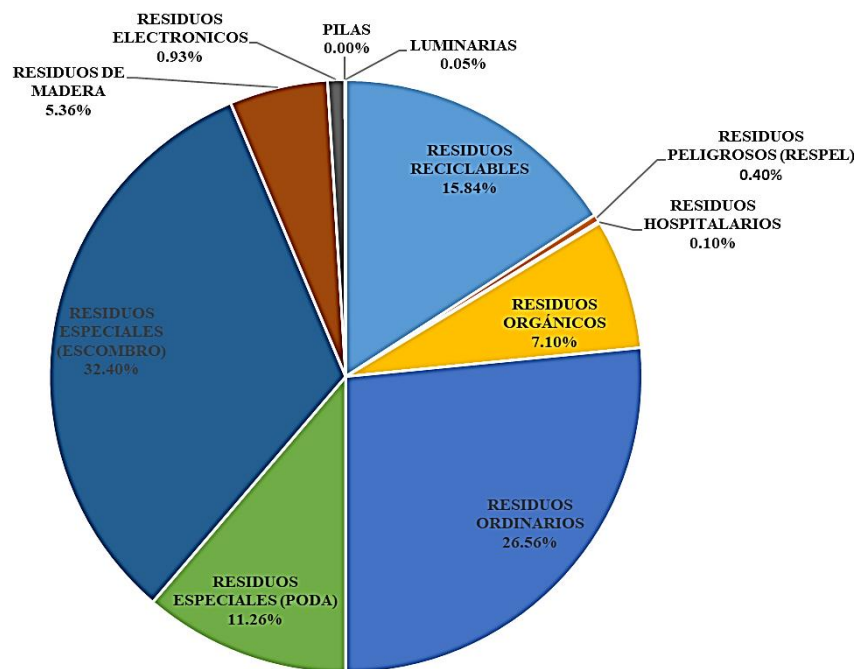
3. Resultados y análisis

3.1. Generación y caracterización físico-química de los ROR

La Universidad EAFIT, sede Poblado, al sur de Medellín, cuenta con 22 establecimientos, entre restaurantes y cafeterías que ofrecen a toda la comunidad universitaria servicios de alimentación. Sin embargo, 12 de ellos no producen alimentos al interior de su cocina, por lo tanto, como se mencionó anteriormente estos restaurantes fueron descartados como fuente del sustrato a evaluar. Por el contrario, para los 10 restantes se encontró que la mayor cantidad de ROR proviene de los restaurantes A, B y C con una generación, entre los meses de febrero, marzo y abril de 2018, de 34.6, 38.5 y 44.6 kg/día respectivamente, lo que equivale al 67% del total generado en el campus (Gráfica 1), lo que permite seleccionar dichos restaurantes como fuente del sustrato a evaluar en el proceso de DA. Esta cantidad es representativa en contraste con un estudio realizado en la UPB de la ciudad de Medellín, donde reportan que la cantidad de ROR generados de cada restaurante se encuentra entre 8,68 y 9,78 kg/día [5]. Adicionalmente, en la Gráfica 2 se puede observar que la generación de RSO corresponde al 7.1% del total de RS generados en el campus durante el año 2017 (893.372 kg), demostrando que a pesar de no ser el residuo de mayor generación su disposición cuesta dinero y tiene un impacto ambiental asociado al ser trasladado a un relleno sanitario, por lo cual requiere manejo adecuado por parte de la institución en términos ambientales, económicos y sociales.



Gráfica 1. Residuos orgánicos generados en 10 restaurantes de la Universidad EAFIT durante los meses de febrero, marzo y abril de 2018. Fuente: Elaboración propia basada en los datos proporcionados por el departamento ambiental de la universidad EAFIT.



Gráfica 2. Generación de RS en la Universidad EAFIT, año 2017. Elaboración propia basada en los datos proporcionados por el departamento ambiental de la universidad EAFIT.

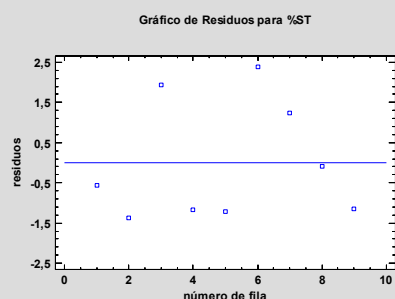
La técnica de cuarteo permitió un análisis cualitativo de la composición de los ROR recolectados para los restaurantes A, B y C ambos días de recolección. Los resultados evidenciaron una gran variedad de alimentos ricos en carbohidratos, lípidos y proteínas necesarios para una buena producción de CH₄ [27] siendo el restaurante C el de mayor variedad de alimentos. La composición de los ROR encontrada se presenta en los anexos.

Tabla 1. Resultados de la prueba de Shapiro-Wilk para el supuesto de normalidad.

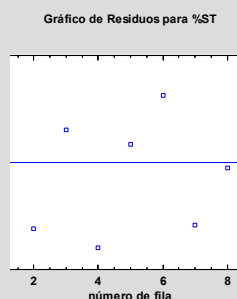
Resultados de prueba	Día 1			Día 2		
	A	B	C	A	B	C
Estadístico W	0.83995	0.89815	0.90089	0,92431	0.91015	0.91128
Valor-P	0.05739	0.23731	0.25283	0,53546	0.42049	0.42829

Tabla 2. Resultados de la prueba de igualdad de Levene para el supuesto de igualdad de varianza.

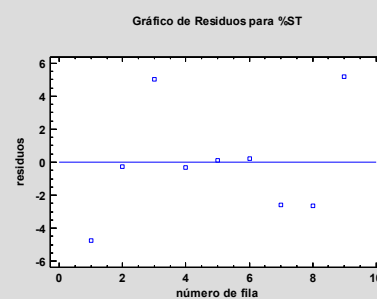
Resultados de Levene	Día 1			Día 2		
	A	B	C	A	B	C
Prueba	0.960749	0.15891	3.27312	0,96075	0.60269	1.08938
Valor-P	0.434541	0.85655	0.10937	0,43454	0.48090	0.35553



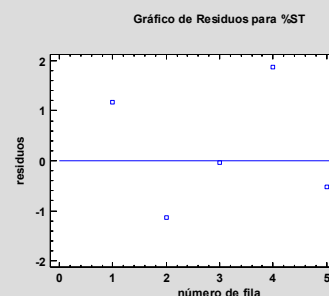
I



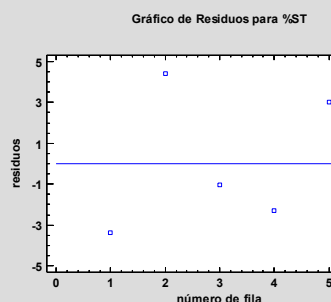
II



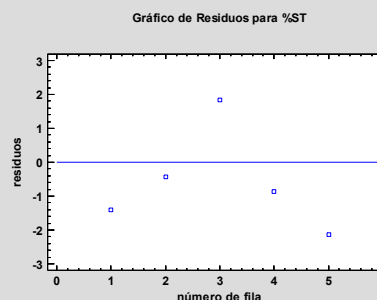
III



IV



V



VI

Gráfica 3. Gráficos de residuales para las muestras primarias de los restaurantes A, B y C por día de recolección

I, III, V - Residuales restaurante A, B y C día 1; II, IV, VI- Residuales restaurante A, B y C día 2

La hipótesis nula (H_0) planteada para el análisis de varianza ANOVA llevado a cabo con la herramienta Statgraphics Centurion 8®, consistió en verificar si las muestras primarias para cada restaurante presentan un efecto significativo en el contenido de ST. Los resultados arrojaron que el valor-P de la razón-F fueron mayores que el valor de significancia (0.05) seleccionado en el análisis, con valores de 0.59, 0.91 y 0.31 para los restaurantes A, B, C respectivamente en el día 1 de recolección, y valores de 0.54, 0.90, 0.94 para los restaurantes A, B, C respectivamente en el día 2 de recolección. Los resultados antes mencionados se verificaron con los supuestos del ANOVA: normalidad, independencia e igualdad de la varianza. Los resultados presentados en la Tabla 1

muestran valores que permitieron determinar con un 95% de confianza, que los residuales del %ST de las muestras primarias de cada restaurante pueden modelarse con una distribución normal al ser el valor-P de la prueba Shapiro-Wilk mayor a 0.05. En la Gráfica 3 se puede observar que los residuales al no seguir un patrón específico, validan el supuesto de independencia. Por último, los resultados de igualdad de varianza presentados en la Tabla 2 muestran que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar (DE), ya que el valor-P de Levene fue mayor a 0.05 para todos los casos. Debido a que no existe diferencia estadísticamente significativa en el %ST para las muestras primarias de cada restaurante es posible promediar los resultados de la caracterización: %H, %SV, %COT, %N y relación C/N encontrados en la caracterización de dichas muestras que derivaron del procedimiento para determinar el %ST. Asimismo fue posible mezclar las muestras primarias para garantizar una muestra representativa para cada restaurante por día de recolección como fuente del sustrato a evaluar en las pruebas de digestibilidad. La caracterización de los ROR provenientes de los restaurantes A, B y C por día de recolección se presentan en la Tabla 3. Adicionalmente, en la última columna de la Tabla 3 se realizó una comparación entre los resultados de la caracterización de los ROR de la Universidad EAFIT y los obtenidos en estudio llevado a cabo por el investigador Nolber Trujillo Osorio quién evaluó el aprovechamiento de los ROR de los restaurantes de la UPB mediante DA para la producción de Biogás.

Tabla 3. Caracterización de los ROR recolectados en el día 1 para los restaurantes A, B y C de EAFIT, y comparación con UPB.

	EAFIT						UPB
	Día 1			Día 2			
	A	B	C	A	B	C	
Capacidad de trabajo [g]	30	30	30	30	30	30	---
pH inicial	4.99	5.39	4.93	5.35	5.58	4.86	4.82 - 5.2
Prom. %ST	13.71	18.39	23.72	15.48	17.27	21.34	13.32 - 17.26
Prom. %SV	12.83	17.32	22.75	14.17	15.95	20.05	14.65 - 19.11
Prom. %H	86.29	81.61	76.28	84.52	82.73	78.66	80.89 - 85.35
Prom. %COT	51.74	52.2	53.16	50.85	51.44	52.21	39.28 - 43.74
Prom. %N	2.09	2.68	4.12	1.84	3.3	5.09	2.42 - 2.92
Relación C/N	24.72	19.5	12.9	27.58	15.59	10.25	13.9 - 16.63

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 3 se puede observar que los residuos de la universidad EAFIT se caracterizan por tener un pH ácido y un porcentaje de humedad alto, por lo cual es recomendado tratarlos por DA en comparación con otras alternativas como el compostaje. El restaurante C presentó mayor contenido de carbono, SV y ST con valores de 53.16%, 22.75% y 23.72% para el día 1 y de 52.21%, 20.05% y 21.34% para el día 2. El restaurante A obtuvo la mayor relación C/N en ambos casos, con valores de 24.72 y 27.58 respectivamente. En todos los casos se evidencia un %ST superior al 10%, los cuales fueron ajustados a fin de trabajar una DA húmeda en el ensayo PBM ya que esta, según Trujillo “acelera los procesos de transferencia de masa y energía en un sistema líquido con homogeneización continua los cuales estimulan un óptimo metabolismo biológico y facilita la liberación del biogás porque las burbujas formadas se separan de las células bacterianas y de los sólidos suspendidos sin dificultades y con alta eficiencia” (p. 26) [5]. Asimismo, se trabajó un valor de ST igual al 8% y una relación I/S de 1, constantes para todas las pruebas, lo cual se logró al adicionar proporciones diferentes de ROR, H₂O e inóculo a todos los biodigestores evaluados según los cálculos realizados con las ecuaciones 1, 2 y 3. La carga inicial de los biodigestores se presenta en la Tabla 4. En cuanto a la relación C/N se ha establecido que la proporción óptima se encuentra entre 20 y 35 [6]. Sin embargo, no se emplearon co-sustratos para ajustar dicha relación ya que solo se evaluó la DA de los ROR de la Universidad EAFIT.

Por otro lado, se puede observar que, en comparación con los resultados obtenidos en la UPB, los ROR de la Universidad EAFIT contienen un porcentaje de ST, SV, H, COT, N y una relación C/N superior a los ROR de la UPB sin embargo, no alcanzan la relación óptima C/N antes mencionada y debido a que los ROR presentan un pH ácido es necesario estabilizarlo para evitar la muerte de los grupos bacterianos responsables de la producción de CH₄ en la etapa metanogénica.

Tabla 4. Carga inicial de los biodigestores experimentales del ensayo PBM

Ensayo	Composición de la carga inicial					
	g inóculo	g sustrato húmedo	g H ₂ O	gSV	C/N	I/S
Blanco (Inóculo)	30	0	0	0.62	-	-
A1	14.84	11.24	3.91	1.44	24.72	1
A2	16.39	9.38	4.23	1.33	27.58	1
B1	20.04	6.75	3.21	1.17	19.5	1
B2	18.45	7.72	3.83	1.23	15.59	1
C1	26.32	3.70	0.00	0.84	12.9	1
C2	23.20	4.96	1.84	0.99	10.25	1

El lodo anaerobio procedente de la PTAR fue utilizado como inóculo en este estudio debido a que es necesaria la carga microbiana para que el proceso de metanización inicie [28]. Por otro lado, Parra et. al añade que “una baja cantidad de inóculo no estabilizado, puede contribuir a la formación de biogás y por lo tanto distorsiona los resultados, si esta es relativamente alta comparada con la producción de biogás generada por el sustrato de interés. Igualmente esta baja cantidad de inóculo podría sobrecargar el reactor generando una acidificación del medio” [28] lo que podría ocasionar inhibición del sistema y por ende la muerte de las diferentes poblaciones bacterianas que intervienen en el proceso de DA. Así, la relación I/S seleccionada para determinar la carga inicial en cada biodigestor experimental permite obtener cantidades de inóculo superiores a las cantidades de sustrato para todos los casos tal y como se puede observar en la Tabla 4 asegurando altas concentraciones de inóculo y bajas concentraciones de sustrato a fin de evitar los inconvenientes mencionados anteriormente. Los biodigestores A1, B1 y C1 fueron cargados con el sustrato resultante de mezclar las muestras primarias de los ROR provenientes de los restaurantes A, B y C respectivamente el día 1 de recolección. Adicionalmente, los biodigestores A2, B2 y C2 fueron cargados con el sustrato que resultó luego de mezclar las muestras primarias de los ROR provenientes de los restaurantes A, B y C respectivamente el día 2 de recolección. Por último, se preparó un biodigestor únicamente con lodo anaerobio para evaluar su efecto en la DA y restarlo de la producción diaria para conocer la producción real de CH₄ correspondiente al sustrato. Los biodigestores A1, B1, C1, A2, B2 y C2 se evaluaron por triplicado y el Blanco por duplicado.

3.2. Seguimiento de las pruebas de digestibilidad llevadas a cabo a través del PBM

La degradación de los ROR se evaluó a partir de la producción de metano en función de los gSV destruidos, se realiza de tal forma ya que no todos los SV presentes en el sustrato inicial se van a degradar para convertirse en CH₄ [3]. Los resultados para la producción diaria de metano (expresada en ml) se presentan en la Tabla 5. Los biodigestores A1, A2, B1, B2, C1, C2 y blanco corresponden a los promedios de las réplicas que presentaron menor desviación estándar cumpliendo así con lo propuesto en el ensayo PBM [21]. Teniendo en cuenta que los resultados para A1, A2, B1, B2, C1 y C2 corresponden a la producción de CH₄ incluyendo el aporte del lodo.

Tabla 5. Volumen de metano producido en cada biodigestor experimental

t (días)	Biodigestores (ml CH ₄)						
	A1	A2	B1	B2	C1	C2	Blanco
1	1.40	0.20	0.80	0.20	0.80	1.20	0.20
2	1.80	0.60	0.20	0.70	0.80	2.40	0.40
3	2.00	0.60	0.20	1.80	0.00	2.40	0.00
4	1.90	2.30	0.80	1.40	2.00	2.40	0.20
5	2.20	2.40	1.20	2.40	3.00	2.10	1.20
6	1.80	2.20	1.40	1.55	2.80	1.40	1.20
7	2.00	2.00	3.00	1.20	2.90	0.20	0.50
8	2.20	2.80	3.20	2.20	0.20	0.20	0.00
9	3.10	2.80	2.70	1.80	0.40	0.40	0.10

t (días)	Biodigestores (ml CH ₄)						
	A1	A2	B1	B2	C1	C2	Blanco
10	1.80	2.70	2.60	1.93	1.13	1.50	0.20
11	1.60	2.60	1.80	1.90	1.07	2.33	1.20
12	2.20	2.60	2.70	2.10	1.40	2.40	1.50
13	2.40	2.00	1.80	1.40	1.40	2.60	1.00
14	3.00	1.80	3.60	2.40	2.80	2.70	2.40
15	2.60	1.80	3.90	2.40	3.00	2.60	1.00

Con el propósito de observar la variación en la producción de metano entre A1 – A2, B1- B2 y C1 – C2 se realizó un análisis de varianza ANOVA, cuyos resultados se presentan en las Tablas 6, 7 y 8 respectivamente.

Tabla 6. Análisis de varianza ANOVA para la producción de metano del restaurante A entre días.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	de Grados libertad	de Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.833	1	0.833	0.405	0.496	4.196
Dentro de los grupos	57.641	28	2.059			
Total	58.475	29				

Tabla 7. Análisis de varianza ANOVA para la producción de metano del restaurante B entre días.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados libertad	de Promedio de los cuadrados	de F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.0003	1	0.0003	0.0001	0.991	4.196
Dentro de los grupos	68.683	28	2.453			
Total	68.683	29				

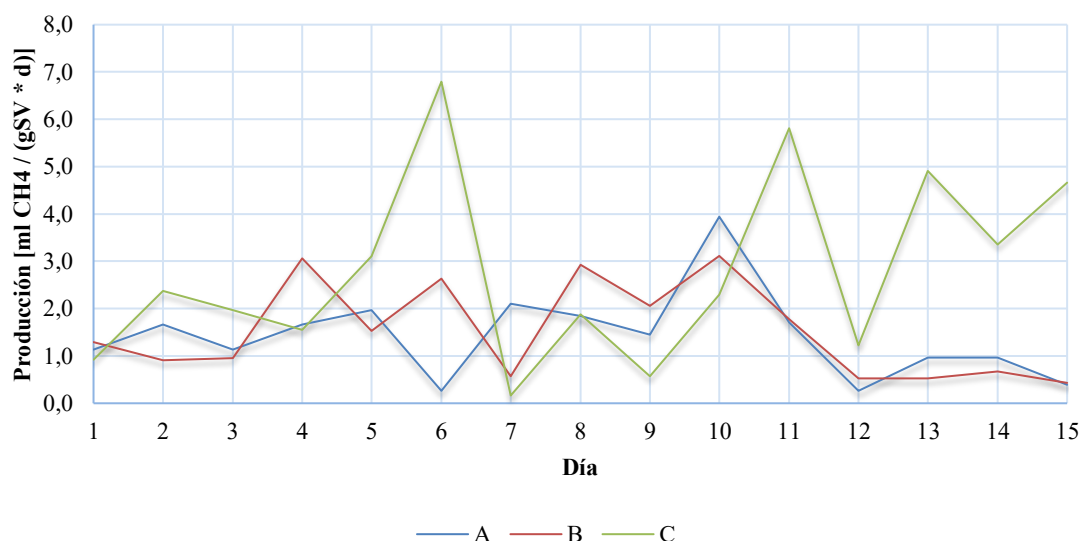
Tabla 8. Análisis de varianza ANOVA para la producción de metano del restaurante C entre días

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	de Grados libertad	de Promedio de los cuadrados	de F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	9.611	1	9.611	1.978	0.171	4.196
Dentro de los grupos	136.048	28	4.859			
Total	145.658	29				

Para todos los casos, se acepta la hipótesis nula que plantea igualdad de medias en los grupos A1-A2 (Tabla 6), B1-B2 (Tabla 7) y C1-C2 (Tabla 8) para los diferentes días de recolección, al ser el valor-P mayor al nivel

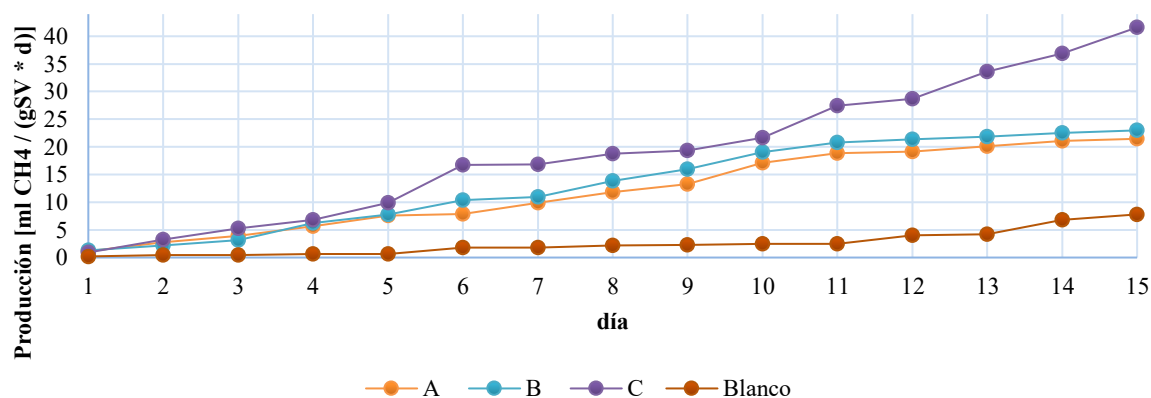
de significancia (0.05) con valores de 0.49, 0.99 y 0.17 respectivamente. Además, las tres pruebas arrojan valores de F inferiores al valor crítico calculado, lo que confirma con un nivel de confianza del 95%, que los factores restaurante y día de recolección estudiados no tienen un efecto estadísticamente significativo en la producción de CH₄ del biodigestor que sería instalado en la Universidad EAFIT, permitiendo promediar los valores presentados en la Tabla 5 para analizar la producción diaria de CH₄ restando el aporte del lodo (Gráfica 4) y la producción acumulada de CH₄ para los restaurantes A, B y C incluyendo el blanco (Gráfica 5).

Gráfica 4. Producción diaria de CH₄ en términos de los gSV eliminados restando previamente el aporte del blanco.



La variabilidad en la producción de CH₄ mostrada en la Gráfica 4, puede estar asociada a la adaptación de las diferentes poblaciones bacterianas a los cambios de pH, ya que durante los primeros 5 días este fue ajustado a 7.6 unidades, debido a que esta variable tiende a bajar por la competencia por nutrientes debido a que todas las etapas de la biodigestión están sucediendo al mismo tiempo, afectando el rendimiento de CH₄ durante los primeros días. Comportamientos similares se han encontrado en otros estudios que han evaluado la DA empleando la fracción orgánica de RS domiciliarios (FORSD) [29].

Gráfica 5. Producción acumulada de CH₄ en términos de los gSV eliminados restando previamente el aporte del blanco



En la Gráfica 5 se puede observar un incremento en la producción de CH₄ para todos los restaurantes, encontrando la mayor producción para el restaurante C con un valor de 43,4 mlCH₄/gSVelim a los 15 días de haber iniciado la digestión, seguido del restaurante B y A con valores de 22.97 y 21.58 mlCH₄/gSVelim respectivamente. Por otro lado, se puede observar, según la tendencia de cada ensayo en la Gráfica 4, que finalizado el ensayo los restaurantes A y B empezaron a disminuir su producción de CH₄ llegando a un nivel casi constante, caso contrario a lo que ocurrió con el restaurante C, demostrando que no disminuye su producción al finalizar el ensayo. Sin embargo, el tiempo final se dice será el TRH de 15 días para evidenciar la producción máxima de CH₄ en los tres restaurantes, aunque dicho tiempo podría ser mayor y por lo tanto se recomienda repetir este ensayo en futuros trabajos.

La mezcla entre ROR y lodo anaerobio acelera la multiplicación y desarrollo de bacterias encargadas de degradar el material orgánico presente en el sustrato de los tres restaurantes, por esto la producción de CH₄ inicia en el día 1 tal y como lo presenta la gráfica antes mencionada. Además, se puede observar que la producción de CH₄ del lodo ocurre más lentamente y en menor cantidad debido al bajo contenido en materia orgánica y a la poca biodegradabilidad de la misma [5]. Con el fin de analizar la variación entre la producción acumulada de CH₄ por restaurante se realizó un análisis de varianza ANOVA. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Análisis de varianza ANOVA para la producción de metano entre los restaurantes A, B y C

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	de Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	de F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	426.84	2	213.42	2.351	0,108	3.21
Dentro de los grupos	3813,26	42	90.79			
Total	4240.10	44				

Los resultados presentados en la Tabla 9 demuestran que no hay diferencia estadísticamente significativa en la producción de CH₄ entre restaurantes al ser el valor-P igual a 0.108, superior al nivel de significancia de 0.05 y el valor F igual a 2.351, inferior al valor crítico calculado de 3.21. Sin embargo, para permitir la comparación con otros estudios el volumen de CH₄ acumulado se presenta a condiciones estándar (CE) de 1 bar y 273.15 K empleando el procedimiento descrito en el apartado de materiales y métodos. Los resultados se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Producción acumulada de CH₄ por gramos de SV presente en el sustrato húmedo a condiciones estándar de 1 bar y 273.15K para los restaurantes A, B y C con su respectivo %SV destruidos.

Restaurante	gSVelim	mlCH ₄ /gSVelim	NmlCH ₄ /gSVelim	%Remoción	%Rendimiento de producción de CH ₄
A	1.14	21.46	16.72	82%	21%
B	1.04	22.99	17.91	87%	23%
C	0.61	41.60	32.41	68%	42%

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 10 se puede decir que para una relación I/S de 1, un %ST de 8%, un tamaño de partícula entre 2 y 4.75 mm y una capacidad de 30g (equivalente a 30 ml aproximadamente), se obtuvo un porcentaje de remoción del sustrato de los restaurantes A, B y C del 82, 87 y 68 y un rendimiento de producción de CH₄ de 21%, 23% y 42% respectivamente, que equivale a una producción de CH₄ a CE acumulada de 16.72, 17.91 y 32.41 NmlCH₄/gSVelim respectivamente, siendo el restaurante C el de mayor producción, seguido del restaurante B y A. Teniendo en cuenta que no existe diferencia

estadísticamente representativa en la producción de CH_4 entre restaurantes tal y como se demostró mediante el análisis de varianza ANOVA (Tabla 9) es posible decir que los ROR de la universidad EAFIT evaluados mediante DA a través del ensayo PBM tienen un potencial de generación de CH_4 a CE igual a 22.35 $\text{NmlCH}_4/\text{gSV}_{\text{elim}}$. Un estudio llevado a cabo en la Universidad del Valle para el tratamiento de biorresiduos de origen municipal obtuvo valores de PBM superiores a 102 $\text{NmlCH}_4/\text{gSV}$ con relaciones de inóculo-sustrato menores a 1 [28], otro estudio realizado en la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) de Manizales evaluó el aprovechamiento de los RSO generados en la ciudad de Palmira obteniendo un PBM de CH_4 de 710 $\text{NmlCH}_4/\text{gSV}$ a los 60 días de iniciar las pruebas de digestibilidad [22]. Lo anterior permite concluir que la variación entre los resultados se debe a que dichos estudios realizaron las pruebas de digestibilidad adicionando co-sustratos para elevar el contenido de carbono antes de iniciar la DA aumentando la relación C/N y por ende eleva la producción de CH_4 , además factores como el tamaño de partícula, relación I/S, %ST, %SV, pH, capacidad disponible y condiciones del proceso como temperatura, tiempo de agitación y TRH influyen en el rendimiento y porcentaje de remoción del MO biodegradable del sustrato.

3.3. Diseño del biodigestor

Partiendo de los ROR disponibles entre los restaurantes A, B y C, el TRH obtenido en el ensayo PBM y la producción acumulada de CH_4 se aplicaron las ecuaciones 5 – 30 enunciadas en la metodología. Se realizó el diseño del biodigestor mono etapa, dado que todas las reacciones hidrolíticas, ácido-acetogénicas y metanogénicas tendrán lugar simultáneamente en la cámara. El diseño se desarrolla para un proceso húmedo con un 8% de ST. Se propone construir el biodigestor anaerobio de EAFIT parcialmente enterrado, ubicando bajo tierra el 50% de su longitud total.

La cúpula o campana fija para almacenar el biogás es de tipo doble pared construida en hormigón-acero [24] y estará ubicada sobre la cf, en la cual se llevará a cabo el proceso de DA. La cf estará enterrada a una profundidad de 1.22 m, con un diámetro de 1.99 m y una capacidad de 4.75 m^3 . Se adicionarán 0.05 m más en la excavación, para realizar un solado (piso en concreto) sobre el cual se vaciará concreto de 21 Mpa para rellenar el volumen correspondiente al espesor de la cámara cuyo valor es de 0.2 m. El concreto permite que la cámara quede aislada del suelo, evitando la corrosión causada por la mezcla de ROR y H_2O . El fondo de la cámara tendrá una forma ligeramente cónica, para asegurar la salida de los lodos digeridos [23], con una inclinación de 3.6° con respecto a la horizontal. Cabe mencionar que por cada metro cúbico de concreto se debe adicionar 30 kg de acero según recomendaciones del Ingeniero Civil con el cual se consultaron los factores asociados a la construcción de la cf y ca.

La cf será alimentada diariamente con 269.46 kg de mezcla (44% ROR, 56% H_2O) que ingresará en primera instancia, a una ca (Figura 6) cuya longitud total es de 0.99 m, de los cuales están bajo tierra 0.46 m con espesor de 0.2 m, para el cual al igual que la cf, también se excavará en tierra adicionando 0.05 m más para realizar el solado y posteriormente vaciar el concreto de 21 Mpa para rellenar el volumen equivalente su espesor. El tanque de alimentación tendrá una capacidad de 0.30 m^3 , una vez la mezcla ingresa es conducida por una tubería de PVC cuyo diámetro es de 1. ½ in, inclinada 19° con respecto a la horizontal. La descarga de la materia se realiza a los 0.2 m por encima del fondo de la cf.

La extracción de los lodos y el desplazamiento de los mismos se llevará a cabo empleando una bomba sumergida Modelo MC15/50 de la empresa Pedrollo S.P.A [30] que permitirá evacuar el material en 30 minutos a través de una tubería de PVC y 0.2 m de diámetro [23], conectada a la descarga de la bomba a 1.22 m por encima del fondo de la cf hasta donde se ubicará la válvula de salida de los lodos. El tiempo que tarda la bomba en evacuar el material, se obtiene al dividir la carga total de ROR y H_2O (0.32 m^3/h) que se alimentará a la ca diariamente entre el caudal de la bomba (720 l/min), el cual se obtiene como resultado de relacionar la altura que debe recorrer el material (1.22 m) sumando 2 m de más debido al recorrido horizontal de la tubería hasta la válvula de descarga, con la curva de referencia de la bomba previamente seleccionada la cual se encuentra en los anexos. Debido a que la alimentación al biodigestor se hace diariamente ocasionará una mezcla de lodos frescos y lodos digeridos; estos últimos son los que se acumulan en el fondo del biodigestor para ser evacuados diariamente donde el volumen a extraer será equivalente al volumen a alimentar al biodigestor (0.32 m^3/h). Es importante puntualizar que el diseño y el funcionamiento del biodigestor anaerobio en estado estacionario se

debe llevar a cabo un proceso de inicialización, que consiste en cargarlo con lodos anaerobios o excremento de cerdo como el inóculo inicial en un 20-40% y H_2O , posteriormente se va adicionando diariamente al TRH determinado los ROR y monitoreando el pH, la alcalinidad, AGV's y NH_3 . Una vez las variables anteriores se estabilicen, el biodigestor está listo para operar.

El diseño del biodigestor tendrá un sistema de agitación y calentamiento por inducción. El sistema de agitación, estará favorecido siempre y cuando la relación diámetro/altura sea inferior a 1 [31] la cual, según los resultados presentados en la Tabla 11, se cumple al obtener un valor de 0.67. Además, este sistema será mecánico ya que este tipo de agitación es la más conveniente por su bajo consumo energético [32], estará conformado por cuatro agitadores de hélice de entrada lateral, los cuales tendrán los mismos parámetros de diseño y estarán sumergidos y ubicados en diferentes puntos del biodigestor. El agitador fue seleccionado teniendo en cuenta que el volumen total del biodigestor (4.75 m^3), de esta manera se seleccionó el agitador sumergible modelo OPTIMIX 2G 40-220 (Propeller Agitators with Submersible Motors) de la marca SUMA [33] sugerido por (Perry, Robert H; Green, Don W) en la sección 18-14 [34] según volumen del biodigestor considerado anteriormente. Cada motor consumirá una potencia de 5 hp. Los materiales de construcción tanto del motor como de los cables, están cuidadosamente seleccionados por el proveedor SUMA con el fin de ser resistentes a la corrosión. La hoja de especificaciones del agitador seleccionado se encuentra en los anexos. Por otro lado, el sistema de calentamiento será por inducción y estará constituido por una espiral bordeando la pared de la cámara de fermentación desde la base hasta el nivel del piso con una distancia entre espiral y espiral de 0.4 m. La propuesta del sistema de control para dicho equipo se encuentra planteada en los anexos, en el cual se pueden encontrar las funciones de transferencia que describen el comportamiento del sistema, así como también sus consideraciones. Además, se sugiere realizar una etapa de inicialización que consiste en cargar el biodigestor con un 20-40% de inóculo y H_2O para monitorear las siguientes variables: pH, la alcalinidad, AGV's y NH_3 .

En caso de que la producción de biogás sea mayor a la esperada, la cúpula podrá despresurizarse con una antorcha referencia Picolino de la marca HAASE Energie technik (Alemania), la cual realiza la combustión abierta con llama visible [35]. La hoja de especificaciones se encuentra en los anexos.

La ubicación del biodigestor será al interior del Campus Universitario [36] y se propone el espacio señalado en la Figura 7, el cual corresponde al lugar donde actualmente se almacenan los residuos de construcción y chatarra y se encuentra ubicado en el centro del costado oriental, junto a la avenida Las Vegas cuyas. Se propone este espacio debido a su cercanía con los restaurantes A y B, que serán 2 de los 3 restaurantes que proveerán los ROR para alimentar el biodigestor. Adicionalmente, si el contenido de CH_4 del biogás se emplea como fuente calórica en las cocinas de estos restaurantes para suplir parte de su demanda energética total, el biogás deberá conducirse por tuberías para gas y, por lo tanto, este factor también será importante a la hora de costear la instalación de la red, así como la caída de presión producto de la instalación del sistema de post-tratamiento. El espacio antes propuesto puede variar conforme varía el plan estratégico de desarrollo institucional el cual se modifica según las necesidades de la universidad y con estas se derivan los cambios en la infraestructura alterando en última instancia el espacio propuesto. A fin de visualizar el plano completo del cual se extrajo el fragmento presentado en la Figura 7, se puede remitir a los anexos.

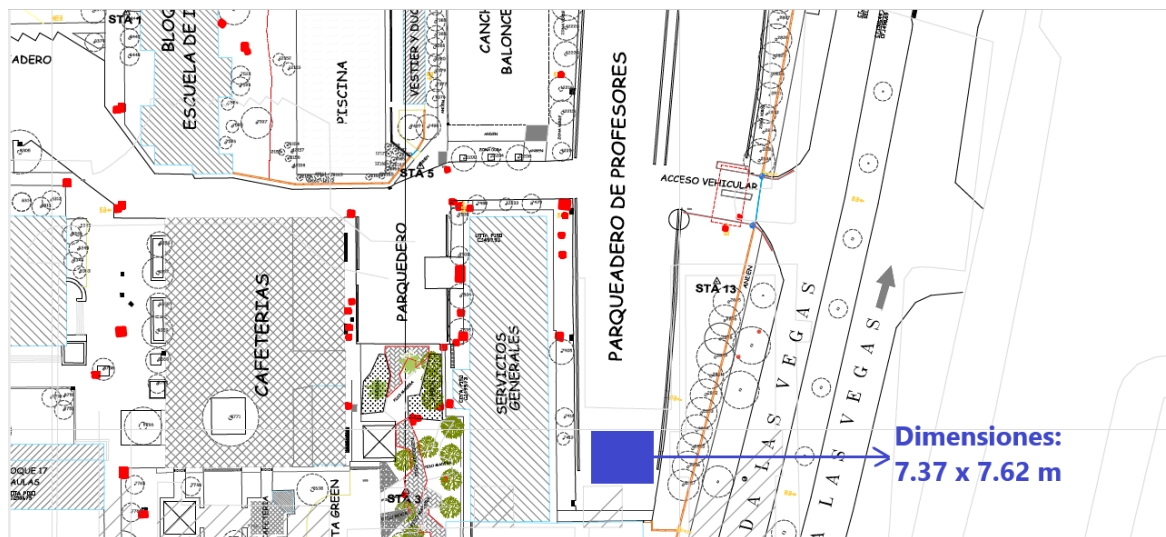


Figura 7. Plano general de la Universidad EAFIT y posible ubicación del DA. Fuente: Departamento de planta física de la Universidad EAFIT.

Las características y dimensiones del diseño se presentan en la Tabla 11 y en la Figura 6 se ilustran las partes constructivas del biodigestor. Adicionalmente, se calcularon los costos en pesos colombianos de la obra para la cf (Tabla 12), la ca (Tabla 13) y la cúpula (Tabla 14), teniendo en cuenta el material de construcción (concreto y acero para su soporte) y la excavación necesaria para instalar el biodigestor. Adicionalmente, se costearon algunos de los equipos necesarios para la funcionalidad del biodigestor, tal y como se presenta en la Tabla 15. Así el costo total aproximado del biodigestor es de \$7.345.529 COP.

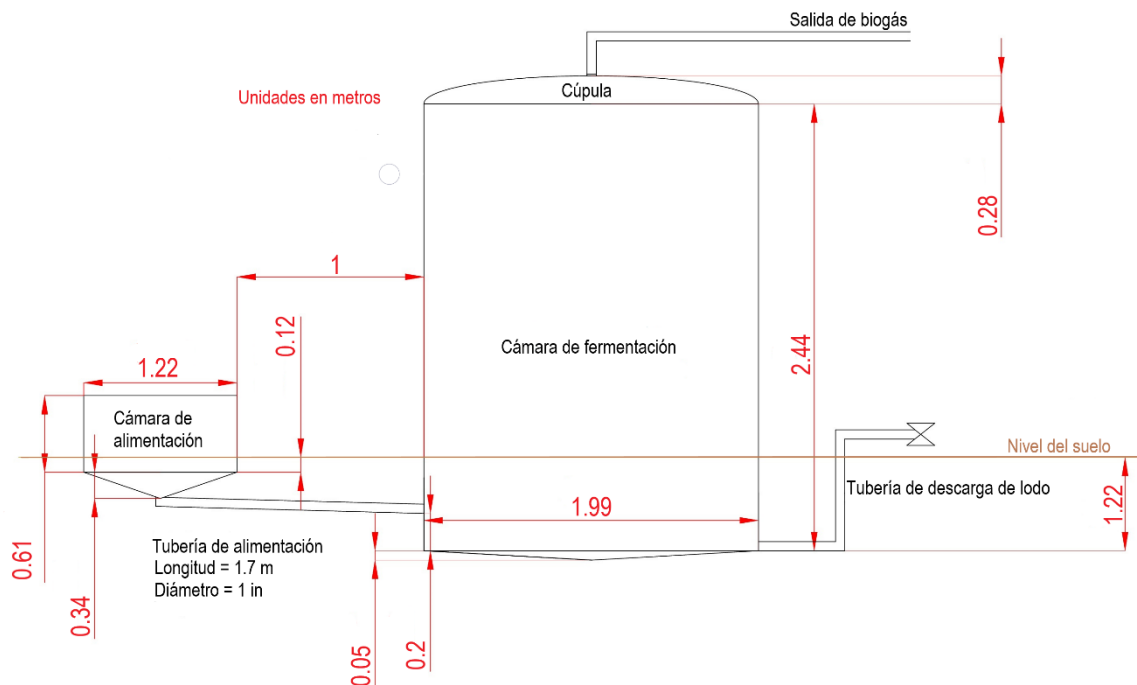


Figura 6. Partes constructivas del biodigestor

Tabla 11. Características de funcionamiento y dimensiones del diseño propuesto (biodigestor y ca)

Características de funcionamiento		
Carga diaria	Sustrato [kg]	117.68
	H2O [l]	151.76
Producción diaria de CH ₄ (G)	0.03	m ³
Tiempo de retención (TRH)	15	días
Tiempo medio de inicialización	2	semanas
Temperatura de trabajo	34	°C
Temperatura ambiente	17	°C
Dimensiones		
Parámetros ca		
Capacidad (CTca)	0.30	m ³
Longitud prisma (l_p interna)	0.82	m
Profundidad prisma (h_p externa)	0.61	m
Altura pirámide (h_t interna)	0.14	m
Inclinación pirámide	29	grados
Espesor	0.2	m
Volumen de concreto	0.62	m ³
Parámetros de cf		
Capacidad (CTcf)	4.75	m ³
Relación hcf/Dcf	0.67	-
Diámetro interno (Dcf)	1.59	m
Altura (hcf)	2.39	m
Espesor	0.20	m
Diámetro externo (DEcf)	1.99	m
Volumen de concreto	2.69	m ³
Fondo adicional de cf		
Altura	0.05	m ³
Ángulo de inclinación	3.6	grados
Parámetros de la cúpula		
CTcu	0.06	m ³
Altura (h_{cu} interna)	0.08	m
Espesor	0.2	m
Volumen de concreto	0.36	m ³
Características de la bomba		
Modelo	MCm 15/50	-
Caudal	800	l/min
Tiempo para evacuar los lodos	30	min

Tabla 12. Costos de la obra para la cf

Datos de entrada	
Vol de excavación [m3]	4.93
Factor de excavación (f)	0.3
Vol de excavación total [m3]	4.93
Vol de concreto [m3]	2.69
Acero requerido [kg]	81

Costos directos	
Excavación en tierra [\$]	98.651
Disposición de material excavado [\$]	30.000
Concreto [\$]	1.880.410
Solado [\$]	20.000
Acero [\$]	322.356
Total costos directos [\$]	2.351.417
Costos indirectos	
AIU [%]	20
Total costos indirectos [\$]	470.283
Costo total aproximado [\$]	
	2.821.701

Tabla 13. Costos de la obra para la ca

Datos de entrada	
Vol de excavación [m3]	0.2
Factor de excavación (f)	0.3
Vol de excavación total [m3]	0.26
Vol de concreto [m3]	0.62
Acero requerido [kg]	18.5
Costos directos	
Excavación en tierra [\$]	5.174
Disposición de material excavado [\$]	30.000
Concreto [\$]	432.037
Solado [\$]	20.000
Acero [\$]	74.064
Total costos directos [\$]	561.275
Costos indirectos	
AIU [%]	20
Total costos indirectos [\$]	112.255
Costo total aproximado [\$]	
	673.530

Tabla 14. Costos de la obra para la cúpula

Datos de entrada	
Vol de concreto [m3]	0.36
Acero requerido [kg]	10.7
Costos directos	
Concreto [\$]	250.300
Acero [\$]	42.908

Total costos directos [\$]	293.209
Costos indirectos	
AIU [%]	20
Total costos indirectos [\$]	58.642
Costo total aproximado [\$]	351.851

Tabla 15. Costo MDO, tubería de alimentación y bomba para los lodos digeridos

Descripción	Costo total
Bomba Modelo MC15/50 [\$]	3.000.000
MDO [\$]	483.434
Tubería alimentación [\$]	15.013

El costo total del biodigestor se consideró como la inversión en activos del proyecto, teniendo en cuenta 5 años de depreciación. Se consideró la financiación total como resultado del aporte de contado por parte de los socios (recursos propios), teniendo en cuenta que la universidad EAFIT pagará el proyecto y por tanto no sería necesario recurrir a créditos (riesgo compartido con entidades bancarias). En el cálculo de los gastos corrientes se tuvieron en cuenta los consumos energéticos necesarios para la operación mensual de los siguientes equipos, para una tarifa de 400\$/kWh: Bomba para la descarga de lodos (0.5 minutos de encendido/día), agitador (6h de encendido/día) y triturador (0.5h de encendido/día), adicionalmente se tuvo en cuenta el consumo mensual de H₂O para una tarifa de 3.535,31 \$/m³, así como la mano de obra. Se omitió el consumo de energía del sistema de calentamiento por inducción y los costos de mantenimiento. Teniendo en cuenta lo anterior se calcula el flujo de caja y se obtiene un gasto total mensual de \$546.419, con una variación anual del 3.6%. También se tuvo en cuenta que el operario encargado de la operación del biodigestor cobrará el S.M.L.V que para el presente año es de \$781.242. Los productos que generarán valor a partir del aprovechamiento de los ROR de la Universidad EAFIT mediante digestión anaerobia son el CH₄ y el biosol producidos mensualmente. También, se tiene en cuenta el ingreso debido al tratamiento de los ROR al interior de la Universidad y no mediante terceros. Lo anterior arroja un saldo neto de \$27.213.287, lo cual significa que la inversión en la construcción se recupera durante el primer año. Los resultados se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Flujo de caja para el primer año de operación del biodigestor

Presupuesto [\$ COP]	2019 (primer año)
Total ingresos	63.060.324
Margen bruto	63.060.324
<i>Gastos de personal</i>	18.749.808
<i>Gastos corrientes</i>	6.557.028
Resultado operativo - EBITDA	37.753.488
<i>Amortizaciones - depreciaciones</i>	1.469.106
B.A.I.I. - EBIT	36.284.382
<i>Gastos financieros (intereses)</i>	0
Resultado bruto - bai	36.284.382
<i>Impuesto sociedades 25.0%</i>	9.071.096
Resultado neto	27.213.287

4. Conclusiones

- Según la caracterización realizada en la Universidad EAFIT, el 67% de los ROR generados en el campus provienen de los restaurantes A, B y C, los cuales proveerán el sustrato de alimentación al biodigestor.
- El valor-P fue mayor al valor de significancia en el ANOVA realizado para cada caso, demostrando que los factores evaluados en este proyecto (día de recolección y restaurante de origen) no causan diferencias significativas en la producción de CH₄.
- Las pruebas de digestibilidad realizadas durante 15 días presentaron un 82% de eliminación de MO biodegradable y un 29% de rendimiento, equivalente a 22.34 NmlCH₄/gSVelim. de producción promedio de CH₄.
- El biodigestor diseñado tendrá la capacidad de aprovechar el 67% de los ROR generados en la Universidad EAFIT. Tendrá un costo aproximado de \$7.345.529 COP, cuya operación durante el primer año deja un saldo de \$27.213.287 COP, según los resultados obtenidos en el flujo de caja.

Recomendaciones

- Evaluar la co-digestión de los ROR provenientes de los restaurantes A, B y C de la Universidad EAFIT con mezclas de materiales en las proporciones adecuadas que permitan aumentar la relación C/N y bajo las mismas especificaciones de temperatura y agitación, especificadas para el ensayo PBM de este estudio, de tal manera que sea posible comparar la producción de CH₄ teniendo en cuenta que el TRH puede determinarse mediante el estudio de la cinética de degradación del MO biodegradable presente en los ROR de la Universidad EAFIT.
- Se recomienda garantizar condiciones anaerobias en el ensayo PBM, lo cual se puede lograr con una atmósfera inerte e implementando un sistema de control en los reactores que permita regular el pH mediante un actuador y no manualmente como se realizó. Lo anterior aumentará el rendimiento de producción de CH₄ y evitará inhibición por acidez en el sistema.
- Realizar una caracterización al biosol obtenido para su posible aplicación en los jardines de la Universidad EAFIT analizando los posibles tratamientos o acondicionamientos necesarios en dicho producto.
- Realizar la valorización energética del biogás producido con los ROR de la Universidad EAFIT para su posterior aprovechamiento en las cocinas de los restaurantes que contribuyen a la generación del 67% de los ROR de la Universidad. Esto permitiría conocer el poder calorífico real de los residuos.
- Se sugiere verificar con un análisis de estática que el espesor de pared de 0.2 m de los equipos construidos en concreto sea suficiente para soportar la presión del fluido almacenado.
- Realizar un estudio de pre factibilidad para la instalación del biodigestor en la universidad EAFIT una vez optimizadas las condiciones de operación del mismo (temperatura, tiempo de agitación, TRH, tiempo de trituración, relación C/N e I/S) y estandarizado el procedimiento para realizar el ensayo PBM para re-calcular el diseño del biodigestor teniendo en cuenta la producción real de CH₄ cuantificado por cromatografía de gases. El estudio incluiría el análisis financiero detallado con variables como la TIR, VPN y el tiempo de recuperación de la inversión.

5. Tabla de Anexos o Apéndices

Tabla 16. Documentos adicionales incluidos con el proyecto de grado.

Nombre	Desarrollo	Tipo de archivo	Enlace de google drive
Resultados de laboratorio para el nitrógeno total.	Terceros	Carpeta	https://drive.google.com/open?id=1-JAb4QnSlAOH56uBERUW-IsJufGf-wnB
Control y automatización del biodigestor	Propio	Word	https://drive.google.com/open?id=1L9Q2eYpeFq-g_3pvd9EZmTcHaOIIvXzI
Determinación de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV).	Propio	Word	https://drive.google.com/open?id=1INmIFxBGqwec7kR50zik1sMvAA0wQm2H
Determinación del potencial de hidrógeno pH.	Propio	Word	https://drive.google.com/open?id=144rjgTUY-GPPfDX_G-VYG7yae57mJhvF
Determinación del carbono orgánico total (COT).	Propio	Word	https://drive.google.com/open?id=1SIKBgdEKCVCOCxhIv7eSrKnsQXpOZYX7
Composición de los ROR de los restaurantes A, B y C	Propio	Word	https://drive.google.com/file/d/1bbs9WGTfs_dPFRlg0xMExckMn8RbsAP/view?usp=sharing
Plano General de la Universidad EAFIT	Universidad EAFIT	pdf	https://drive.google.com/open?id=1CuAK2K3ICBM0BC7T0RzTLO-kQ7gH_FIx
Bomba sumergible Modelo MC15-50	Pedrollo Spa	pdf	https://drive.google.com/open?id=1sqvSqpx51OLhPpD5Pb00LGZJehWCDpn
Agitador Modelo OPTIMIX 2G 40-220	Propeller Agitators with Submersible Motors	pdf	https://drive.google.com/open?id=1Swh-JVYHRwkwqOrJBaULSQZ8gilNXL2A
Antorcha picolino Fackelanlagen	HAASE Energie technik	pdf	https://drive.google.com/open?id=1X3zyGJDdPnfmZKI6HmisCLO-jvKyM7Nh

Nombre	Desarrollo	Tipo de archivo	Enlace de google drive
Tuberías PAVCO lista de precios 2017	PAVCO	pdf	https://drive.google.com/open?id=1KTgeFic_xXptGkyGEbrRknapRy4j8eZp

Referencias

- [1] EAFIT, "Gestión Ambiental de la Universidad - Institucional," 2016. [Online]. Available: <http://www.eafit.edu.co/institucional/sostenibilidad-ambiental/gestion-ambiental/Paginas/gestion-ambiental.aspx>.
- [2] J. M. Briganti Fernández, A. del C. Díaz Álvarez, and I. S. Vergara Serpa, "Lineamientos para la separación en la fuente de los residuos sólidos producidos por el sector residencial (Estratos 4, 5 y 6) de la ciudad de Cartagena de Indias D. T y C.," 2003.
- [3] Y. L. Acosta and M. C. Obraya Abreau, "La Digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos. Parte I," 2005.
- [4] S. Verma and N. . Themelis, "Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes," Columbia University, 2002.
- [5] N. Trujillo Osorio and Ó. H. Vasco Echeverri, "Digestión anaerobia de residuos orgánicos de restaurantes para la producción de biogás," Universidad Pontificia Bolivariana, 2014.
- [6] B. Arhoun, "Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora," Universidad de Málaga, 2017.
- [7] M. K. Suarez Marengo and L. V. Quiroga Quiroz, "Obtención de abono orgánico líquido a partir de la digestión anaeróbica de la planta Acuática invasora "eichhornia crassipes" (Taruya) a través de un biodigestor," Oct. 2016.
- [8] J. V. Sánchez Rodríguez, A. E. Hernández Vega, and A. Pavón Hernández, "Uso y mantenimiento de biodigestores de cúpula fija, una forma de contribuir al desarrollo local sostenible," pp. 1–21.
- [9] J. M. Santos Calderon, J. M. Mendoza Daza, J. D. López Murcia, M. E. Sierra Botero, and A. Lozano Fonseca, "Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios: Informe Nacional de Aprovechamiento 2016," vol. 1, p. 72, 2016.
- [10] M. A. Mir, A. Hussain, and C. Verma, "Design considerations and operational performance of anaerobic digester: A review," *Cogent Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–20, 2016.
- [11] C. Sánchez Reyes, M. E. Patiño Iglesias, J. L. Alcántara Flores, Y. Reyes Ortega, M. A. Pérez Cruz, and E. Ortiz Muñoz, "Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 32, no. 2, pp. 191–198, May 2016.
- [12] M. A. Ortiz Cabrera and F. X. Ripoll, "Desarrollo de un simulador numérico basado en ADM1 de un reactor anaerobio ASBR," Universidad Politécnica de Catalunya, 2015.
- [13] U. Jeppsson, "Investigation of Anaerobic Digestion Alternatives for Henriksdal's WWTP," *Dept. Ind. Electr. Eng. Autom.*, 2007.
- [14] L. A. Morales, Á. D. Rodríguez, and H. E. Rojas, "Assessment of the input substrate characteristics included in the anaerobic digestion model No.1," *Ingeniería*, vol. 22, no. 2, pp. 269–282, 2017.
- [15] H. Fisgativa, A. Tremier, and P. Dabert, "Characterizing the variability of food waste quality: A need for efficient valorisation through anaerobic digestion," *Waste Manag.*, vol. 50, pp. 264–274, 2016.
- [16] A. Cesaro and V. Belgiorno, "Pretreatment methods to improve anaerobic biodegradability of organic municipal solid waste fractions," *Chem. Eng. J.*, vol. 240, pp. 24–37, 2014.
- [17] IDEAM, Upme, Departamento administrativo de ciencia tecnología e innovación, and Universidad Industrial de Santander, "Protocolo para el muestreo de la biomasa residual (Anexo C del atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia)," no. 978-958-8504-59-9, pp. 143–149, 2009.
- [18] Y. Olaya Arboleda and L. Octavio Gónzales Salcedo, "Fundamentos para el diseño de biodigestores," p. 31, 2009.
- [19] L. C. Corrales, D. M. Romero Antolinez, J. A. Macías Bohórquez, and A. M. Vargas Corredor,

- “Bacterias anaerobias : Procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta,” *Nova*, vol. 13 (23), pp. 0–2, 2015.
- [20] J. Fernández Rodríguez, “Optimización de la digestión anaerobia seca de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura,” 2010.
- [21] L. M. Cárdenas Cleves, B. A. Parra Orobio, P. Torres Lozada, and C. H. Vásquez Franco, “Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos,” vol. 29, no. 1, pp. 95–108, 2016.
- [22] Cendales Ladino, “Producción de biogás mediante la co-digestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 49, pp. 385–390, 2011.
- [23] L. Alberto, E. Villegas-Garc, B. Riveros Olivares, C. N. del A. CONAGUA, S. de M. A. y Recursos, and G. L. Noyola A., Morgan J., “Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento, pretratamiento y tratamiento primario. Comisión nacional del agua,” *Publicaciones Estadísticas y Geográficas. SINA*, vol. 130, no. November, p. 92, 2016.
- [24] Consejo superior de investigaciones científicas, “Diseño y construcción de un tanque de almacenamiento de GNL en Huelva, España,” vol. 40, no. 400, p. 581, 1989.
- [25] Trapp, “Triturador de ramas, troncos y residuos orgánicos.”
- [26] INTECH GmbH, “Cálculos y selección de tuberías. Diámetro óptimo de tubería.” 1997.
- [27] Ministerio de energía de Chile, Programa de Naciones Unidas para el desarrollo, and Global Environment Facility, *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.
- [28] B. A. Parra Orobio, P. Torres-Lozada, L. F. Marmolejo Rebellón, L. M. Cárdenas Cleves, C. Vásquez Franco, W. A. Torres López, and J. A. Ordóñez Andrade, “Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal,” *Rev. U.D.C.A Actual. Divulg. Científica*, vol. 17 N.2, no. 0123-4226, pp. 553–562, 2014.
- [29] P. Bres, M. Beily, J. O ’farrel, and D. Crespo, “Co-Digestión de la fracción orgánica de residuos sólidos domiciliarios con aserrín en reactores anaeróbicos semicontinuos,” 2011.
- [30] Pedrollo S.p.A., “MC /50-70 Electrobomba sumergible de drenaje.” [Online]. Available: <https://www.pedrollo.com.co/es/mc-50-70-electrobomba-sumergible-de-drenaje/256>. [Accessed: 19-Nov-2018].
- [31] J. Sánchez Rubal, “Optimización de la agitación de un digestor anaerobio mediante mecánica de fluidos computacional,” p. 161, 2016.
- [32] L. E. García, M. F. Mejía, R. A. Murcia, and R. E. Prieto, “Diseño de un biodigestor de flujo inducido con el uso de corrientes térmicas,” pp. 31–36, 2011.
- [33] SUMA, “Propeller Agitators with Submersible Motors.”
- [34] R. H. Perry and D. W. Green, *Perry’s chemical engineers’ handbook*, 8th ed. University of Kansas: McGraw-Hill/Interamericana editores S.A, 2008.
- [35] Haase Energietechnik, “Antorcha tipo picolino,” vol. 2008, 2009.
- [36] Servicios generales EAFIT, “Plano general de la Universidad EAFIT.” 2018.