



The Biologist (Lima)



ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

CASSAVA FIBER BIOGAS WITH DIFFERENT INOCULA AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF THE BIODIGESTED SUBSTRATES

BIOGÁS DE FIBRAS DE LA YUCA CON DIFERENTES INÓCULOS Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS SUBSTRATOS BIODIGERIDOS

Ivan Pallo-Chango¹; Freddy Zambrano-Gavilanes^{2*} & Wilmer Ponce-Saltos³

¹Instituto de Posgrado, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

²Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad Técnica de Manabí (UTM), Portoviejo, Manabí, Ecuador.

³Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, INIAP Estación Experimental Portoviejo, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

* Corresponding author: freddyzg_86@hotmail.com

Ivan Pallo-Chango: <https://orcid.org/0000-0002-9308-7496>

Freddy Zambrano-Gavilanes: <https://orcid.org/0000-0003-0004-9122>

Wilmer Ponce-Saltos: <https://orcid.org/0000-0002-4250-5184>

ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate the biogas production from cassava fibers (*Manihot esculenta* Crantz) with different inocula and chemical characterization of the biodigested substrates. The treatments were distributed as follows: T₁. Cassava peel + water, T₂. Cassava + water central cylinder, T₃. Cassava peel + central cylinder + water, T₄. Cassava peel + Bovine manure biodigestion inoculum, T₅. Cassava central cylinder + Bovine manure biodigestion inoculum, T₆. Peel + cassava central cylinder + Bovine manure biodigestion inoculum, T₇. Cassava peel + Physic nut seed cake biodigestion inoculum, T₈. Cassava central cylinder + Physic nut seed cake biodigestion inoculum, T₉. Cassava peel + central cylinder + Physic nut seed cake biodigestion inoculum, T₁₀. Cassava peel + pig manure biodigestion inoculum, T₁₁. Cassava central cylinder + pig manure biodigestion inoculum, T₁₂. Peel + cassava central cylinder + pig manure biodigestion inoculum. The production of biogas was determined daily. In addition, the measurement of CH₄ and CO₂ was carried out with the Orsat method. Physical and chemical parameters of the biodigested substrates were analyzed. The biodigestion of the central cylinder of the cassava or of the bark using as inoculants the biodigestion of pine nut cake or bovine manure produces 71.67% of CH₄. Biodigested substrates contain macro and micronutrients with potential use in agriculture.

Keywords: anaerobic digestion – animal manure – biofertilizer – *Manihot esculenta* – methane

doi:10.24039/rtb20211921125

RESUMEN

La presente investigación tuvo por objetivo evaluar la producción de biogás a partir de fibras de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) con diferentes inóculos y caracterización química de los substratos biodigeridos. Los tratamientos fueron distribuidos de la siguiente manera: T₁. Corteza de yuca + agua, T₂. Cilindro central de yuca + agua, T₃. Corteza + Cilindro central de yuca + agua, T₄. Corteza de yuca + Inóculo de Biodigestión de estiércol bovino, T₅. Cilindro central de yuca + Inóculo de Biodigestión de estiércol bovino, T₆. Corteza + Cilindro central de yuca + Inóculo de Biodigestión de estiércol bovino, T₇. Corteza de yuca + Inóculo de biodigestión de torta de piñón, T₈. Cilindro central de yuca + Inóculo de biodigestión de torta de piñón, T₉. Corteza + Cilindro central de yuca + Inóculo de biodigestión de torta de piñón, T₁₀. Corteza de yuca + Inóculo de biodigestión de estiércol porcino, T₁₁. Cilindro central de yuca + Inóculo de biodigestión de estiércol porcino, T₁₂. Corteza + Cilindro central de yuca + Inóculo de biodigestión de estiércol porcino. Fue determinada la producción de biogás diariamente, y además se efectuó la medición del CH₄ y CO₂ con el método Orsat. Se analizaron parámetros físico y químico de los sustratos biodigeridos. La biodigestión del cilindro central de la yuca o de la corteza usando como inoculantes la biodigestión de torta de piñón o estiércol bovino producen 71,67 % de CH₄. Los substratos biodigeridos contienen macro y micronutrientes con potencial uso en la agricultura.

Palabras clave: digestión anaeróbica – estiércol animal – biofertilizante – *Manihot esculenta* – metano

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el uso de combustibles fósiles ha ido creciendo de una manera significativa, provocando emisión de gases que han sido causantes directos de lo que hoy llamamos el calentamiento global (Soeder, 2021). Los problemas que se presentan a raíz de este fenómeno han traído el interés para la búsqueda de alternativas en cuanto a biocombustibles que ayuden a la conservación del medio ambiente, siendo la generación de biogás una opción de bajo costo de producción muy importante para países generadores de fuentes de biomasa (Gavilanes *et al.*, 2017).

Según Andrade *et al.* (2020) la digestión anaerobia para la producción de biogás se efectúa mediante una serie de métodos bioquímicos, estando en un medio libre de oxígeno, en donde la desintegración y el procesamiento de estabilización del material orgánico biodegradable se logra a través de la acción que viene combinada por múltiples grupos de microorganismos.

El biogás, es un gas combustible que su composición varía según el tipo de materia prima y de la condición del digestor. En general está

compuesto de 50 a 75% de metano (CH₄), de 25 a 50 % de dióxido de carbono (CO₂) en conjunto con otros componentes como vapor de agua (H₂O), sulfato de hidrógeno (H₂S) y amoníaco (NH₃) (Surendra *et al.*, 2014).

Los inóculos generalmente utilizados en el proceso de la biodigestión anaeróbica son lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales o algunos materiales de origen animal, como el estiércol de ganado, entre otros. El tratamiento anaeróbico de desechos orgánicos sólidos con una alta concentración de sólidos se lleva a cabo en reactores anaeróbicos discontinuos, con un sustrato que contiene en promedio 20% (porcentaje en peso) de sólidos totales; en general, se puede aplicar para bioestabilizar varios tipos de residuos, principalmente de forma conjugada, en algunos casos aumentando la densidad bacteriana y en otros ajustando la relación C/N (Leite & Povinelli, 1999; Wang *et al.*, 2020).

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz), es muy cultivada a nivel mundial, con una producción alrededor de 277,81 millones de t de raíces frescas, siendo los principales cinco países dedicados a la producción Nigeria, Tailandia, República Democrática del Congo, Brasil e Indonesia (Odoemelam *et al.*, 2020).

La yuca es catalogada como el tubérculo más importante dentro de este grupo de plantas de gran interés económico. Su principal valor económico está en su órgano de reserva o almacenamiento de energía, sus raíces tienen un valor nutritivo de gran importancia en la alimentación humana y animal, en lagunas zonas rurales, su follaje es aprovechado para la alimentación de animales, mientras que en África se lo utiliza como verdura fresca para el consumo humano (Cock & Connor, 2021).

Durante el procesamiento de la raíz de yuca, ya sea para almidón o industrialización en fresco se generan gran cantidad de residuos entre esos hojas, tallos, cortezas y efluentes líquidos, que si son liberados a la atmósfera por su alta concentración de ácido cianhídrico (HCN), resultante de la hidrólisis de los glucósidos cianogénicos presentes en la yuca y nutrientes pueden generar fuertes impactos ambientales (Peres *et al.*, 2019). Una alternativa para evitar esta contaminación es mediante la biodigestión anaeróbica, en el cual se aprovecha el biogás en la generación de energía y los afluentes para abono orgánico (biol) por su contenido de macro y micronutrientes, dando así un buen destino a estos residuos (Alrefai *et al.*, 2020).

La presente investigación tuvo por objetivo evaluar la producción de biogás a partir de fibras de la yuca (corteza y fibra central) con diferentes inóculos (biodigestión de estiércol bovino, porcino y de torta de piñón) y caracterización química de los substratos biodigeridos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Local de experimento

Para el desarrollo de este experimento se utilizaron las instalaciones del laboratorio de Biocombustibles del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) Portoviejo, Manabí, Ecuador.

Fibras de la yuca

Las fibras de yuca (corteza y cilindro central) fueron obtenidas de la asociación Autónoma Agropecuaria “Virgen de Monserrat”, en la Provincia de Los Ríos, cantón Valencia “Sector 6

de agosto-Segunda Banquera”, siendo utilizada la Variedad de yuca “La Sabrosa”. Las fibras fueron secadas naturalmente al sol según la metodología empleada por Aristizábal *et al.* (2007) y molidas con un molino de martillos eléctrico estacionario tipo Thomas Willey de 4 hp con una criba de 2 mm.

Inóculos

Para lograr alcanzar un buen funcionamiento estable y un proceso con alta producción de metano, es de vital importancia crear y mantener un ambiente que sea beneficioso para la actividad de un consorcio bacteriano que sea adecuado, como los inóculos que provienen del aislamiento de bacterias o de los lodos de efluentes de la biodigestión anaeróbica. Se utilizaron tres tipos de inóculos, a partir de la biodigestión: estiércol bovino, porcino y de torta de piñón. Las cantidades del inóculo fueron equivalentes al 10% del volumen total de las mezclas afirmado en estudios realizados por Raheman & Mondal (2012).

Biodigestión anaerobia

Se emplearon los protocolos de Azevedo (2010) y Gavilanes *et al.* (2017) quienes utilizaron microbios digestores hechos con frascos de vidrio inyectable de tipo penicilina con un volumen de 50 mL, donde se colocaron los tratamientos, para luego quedar herméticamente cerrados con tapa de goma y sellados con un anillo metálico.

Para medir y almacenar el volumen de biogás, se utilizaron gasómetros con jeringas de 60 mL que fueron conectados a una manguera y aguja.

Los micro biodigestores fueron alimentados con diferentes mezclas conteniendo el 20% de sólidos totales de las fibras de la yuca (yuca, corteza y fibra central) y un 10% de inóculo del volumen total de las mezclas. Los tratamientos fueron distribuidos de la siguiente manera: T₁. Corteza de la yuca + agua, T₂. Cilindro central de la yuca + agua, T₃. Corteza + Cilindro central de la yuca + agua, T₄. Corteza de la yuca + Inóculo de la Biodigestión de estiércol bovino, T₅. Cilindro central de la yuca + Inóculo de la Biodigestión de estiércol bovino, T₆. Corteza + Cilindro central de la yuca + Inóculo de la Biodigestión de estiércol bovino, T₇. Corteza de la yuca + Inóculo de la biodigestión de torta de piñón, T₈. Cilindro central de la yuca + Inóculo de la biodigestión de torta de piñón, T₉. Corteza + Cilindro central de la yuca + Inóculo de la

biodigestión de torta de piñón, T₁₀. Corteza de la yuca + Inóculo de la biodigestión de estiércol porcino, T₁₁. Cilindro central de la yuca + Inóculo de la biodigestión de estiércol porcino, T₁₂. Corteza

+ Cilindro central de la yuca + Inóculo de la biodigestión de estiércol porcino. Las mezclas de cada uno de los tratamientos con sus volúmenes se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1. Mezcla de los tratamientos.

Tratamientos	Corteza g	Cilindro g	Agua g	Peso Total g	Vol. cm ³	Inóculos	Vol. Inoc. cm ³	Vol. total cm ³
1	6,43	-	23,57	30,00	29,00	agua	2,90	32,90
2	-	6,52	23,48	30,00	29,00	agua	2,90	32,90
3	3,22	3,26	23,52	30,00	29,00	agua	2,90	32,90
4	6,43	-	23,57	30,00	29,00	estiércol bovino	2,90	32,90
5	-	6,52	23,48	30,00	29,00	estiércol bovino	2,90	32,90
6	3,22	3,26	23,52	30,00	29,00	estiércol bovino	2,90	32,90
7	6,43	-	23,57	30,00	29,00	torta de piñón	2,90	32,90
8	-	6,52	23,48	30,00	29,00	torta de piñón	2,90	32,90
9	3,22	3,26	23,52	30,00	29,00	torta de piñón	2,90	32,90
10	6,43	-	23,57	30,00	29,00	estiércol porcino	2,90	32,90
11	-	6,52	23,48	30,00	29,00	estiércol porcino	2,90	32,90
12	3,22	3,26	23,52	30,00	29,00	estiércol porcino	2,90	32,90

Luego de que se alimentaron los biodigestores, fueron sellados herméticamente con la tapa de goma y anillo metálico utilizando un alicata sellador.

Cuando los biodigestores estuvieron listos, fueron conectados a gasómetros para luego pasar a una estufa incubadora sin luminosidad a 30° C de temperatura. El proceso de biodigestión se efectuó durante 32 días. La producción de biogás en los gasómetros fue evaluada diariamente a través del desplazamiento del embolo de la jeringa, hasta terminar la actividad metanogénica.

Para la determinación del gas metano obtenido a los 32 días, se procedió a realizar la adaptación del método Orsat en Kit desarrollado por Kunz & Oliveira (2009), que consiste en un lavado del biogás en solución alcalina (16% de hidróxido de potasio en agua destilada). El Kit está compuesto por una jeringa de vidrio que es conectada por medio de un soporte que tiene otra jeringa plástica que contenía solución alcalina. Esta solución de NaOH entra en reacción con el CO₂, absorbiéndolo en solución como carbonato y bicarbonato. La diferencia que presenta entre los volúmenes

iniciales y finales se ha utilizado para estimar la concentración de CO₂ y metano.

Análisis de los parámetros físico y químico de los sustratos biodigeridos

Fueron realizados los siguientes análisis a los sustratos antes y después de la biodigestión anaeróbica:

-pH

Las mezclas usadas para la biodigestión fibras de la yuca, agua e inóculo fueron analizadas con pH-metro, antes y después de la biodigestión anaeróbica.

-Determinación de sólidos totales, fijos y volátiles

Los sólidos totales (ST) se refieren al material residual que queda en el recipiente después del secado de la muestra. El análisis de sólidos totales (ST) se determinó de acuerdo con la metodología del método gravimétrico (ABNT, 1989).

Los sólidos fijos son una porción del residuo total, filtrable o no filtrable, que permanece después de la calcinación a (550 ± 50) °C durante 1 h. Esto fue

realizado de acuerdo con el método gravimétrico (ABNT, 1989).

Los sólidos volátiles son una porción del residuo total, filtrable o no filtrable, que se pierde al calentar la muestra a $(550 \pm 50)^\circ\text{C}$ durante 1 h. Se realizó de acuerdo con el método gravimétrico (ABNT, 1989).

-Macro y micronutrientes

Los análisis de los macro y micronutrientes se realizaron después de la biodigestión anaeróbica. La determinación de los contenidos nutricionales se la realizó usando método Kjeldhal para Nitrógeno (N) y de cenizas para el análisis de Boro (B). Los métodos de digestión húmeda Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre (S), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Hierro (Fe) y Manganeso (Mn); según las metodologías utilizadas en el laboratorio del Departamento Nacional de Manejo de Suelos, Tejidos y Aguas de la Estación Experimental Tropical Pichilingue del INIAP (Henríquez *et al.*, 1998).

Análisis estadístico

Los datos recopilados se sometieron a análisis de varianza (ANOVA). Si la prueba F fue significativa, las medias se separaron usando la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5%. Los análisis estadísticos se realizaron con el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2017). Los efectos de los tratamientos sobre el biogás acumulado se evaluaron mediante análisis de regresión utilizando el software SIGMA PLOT® 14.0.

Aspectos éticos: El presente trabajo no presenta ningún conflicto ético.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El pH de las muestras antes y después de la digestión anaeróbica se encuentra en la tabla 2. Entre los tratamientos no se encontraron diferencias significativas, a pesar de eso se muestra que antes de la digestión los tratamientos demostraban un pH ligeramente ácido, luego de la digestión anaeróbica el pH se incrementó, destacando el T₁₂ con mayor aumento de 1,79 en su pH.

En estudio de Mañunga *et al.* (2019) examinaron producciones de biogas a partir de aguas residuales de la industria de la yuca, quienes mencionaron que trabajaron con pH inicial de los substratos entre 5,7; 5,4 y 5,0 valores semejantes a los encontrados en la presente investigación, lo que corrobora que es posible generar biogas entre esos pH. Además, es necesario mencionar que según la norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes del Ecuador, cualquier descarga de efluentes debe ser de 5 a 9 de pH, siendo que después de la biodigestión en nuestro caso se tuvieron valores entre 5 y 6,22 (TULSMA, 2017).

En estudio efectuado durante 30 días variando el pH en la biodigestión de aguas residuales de yuca y estiércol como inoculante, determinaron que el pH óptimo fue de 7, con mayor generación de biogás (Prasetyo *et al.*, 2017). Cerón-Vivas *et al.* (2019) mencionan que a valores de pH por debajo de 7,0 unidades, el rendimiento del metano podría inhibirse, probablemente porque la alcalinidad no es suficiente para amortiguar la producción de ácidos grasos volátiles, inhibiendo la actividad de los metanógenos. Posiblemente bajos contenidos de CH₄ en la presente investigación (Figura 2) se deban a este factor.

Los análisis de sólidos totales, volátiles y fijos de las fibras de yuca, obtenidos antes después de la digestión anaeróbica y sus respectivas reducciones después de la digestión anaerobia son encontrados en la tabla 3. El análisis de los diferentes sólidos permite garantizar que el proceso de la biodigestión se ejecute adecuadamente. Mayor reducción de sólidos totales (Red. ST) fue encontrado en el tratamiento 2 (Cilindro central de la yuca + agua) con 8,02 % (Tabla 3).

Analizando los sólidos volátiles, más reducción con 46,72% se obtuvo en el tratamiento Corteza + Cilindro central de la yuca + agua, en el mismo tratamiento se verificó mejor eficiencia en el proceso para los sólidos fijos (Tabla 3). Así mismo, se observó que, en todos los tratamientos, hubo reducciones en el porcentaje de sólidos totales, fijos y volátiles después de la digestión anaeróbica de las diferentes fibras de yuca estudiadas, lo que indica una reducción en la tasa de carga orgánica.

Los sólidos volátiles son uno de los principales parámetros a evaluar, ya que se aproximan a la

Tabla 2. pH de los tratamientos de la biodigestión anaeróbica de fibras de yuca.

Tratamientos	pH A	pH D	Incremento de pH
T ₁	5,67 a	6,22 a	0,55
T ₂	4,25 a	5,60 a	1,35
T ₃	4,60 a	5,50 a	0,90
T ₄	3,82 a	5,10 a	1,28
T ₅	4,73 a	5,60 a	0,87
T ₆	4,08 a	5,15 a	1,07
T ₇	3,79 a	5,00 a	1,21
T ₈	4,23 a	5,60 a	1,37
T ₉	4,99 a	5,70 a	0,71
T ₁₀	4,02 a	5,30 a	1,28
T ₁₁	4,71 a	5,80 a	1,09
T ₁₂	4,01 a	5,80 a	1,79
C.V.	2,54	3,65	-
<i>p</i>	0,12 ns	0,15 ns	-

A: Antes de la biodigestión anaeróbica. B: Después de la biodigestión anaeróbica.

Coefficiente de Variación (CV). Probabilidad estadística (*p*). No significativo (ns) ($p \leq 0.05$)

test F. Medias con letras en común no difieren estadísticamente con el test de Tukey 5%.

cantidad potencial de degradación del material crudo, siendo que aproximadamente el 70% de los volátiles encontrados de los residuos de la yuca están compuestos de compuestos biodegradables conocidos (Suzuki *et al.*, 2012).

Las concentraciones de macro y micronutrientes de los diferentes tratamientos obtenidos después de la

digestión anaerobia se presentan en la Tabla 4. El T₉ (Corteza + Cilindro central de la yuca + Inóculo de la biodigestión de torta de piñón) demostró obtener mayor contenido nutricional en N y K. Diferencias significativas fueron encontradas estudiando el Ca, con mayores respuestas para T₁₀ siendo diferentes únicamente de T₂, T₅ y T₈. En el Mg se destacó T₈ y T₉, diferenciándose de T₁, T₃, T₄, T₅, T₆ y T₇.

Tabla 3. Sólidos totales, fijos y volátiles de la biodigestión anaeróbica de fibras de yuca.

Tratamientos	STA	STD	Red. ST	SVA	SVD	Red. SV	SFA	SFD	Red. SF
T ₁	19,93 a	17,42 a	2,51	93,63 a	78,49 a	15,14	6,37 b	21,51 c	15,14
T ₂	19,74 a	11,72 b	8,02	92,57 a	72,66 a	19,90	7,43 b	27,34 b	19,90
T ₃	19,40 a	17,28 a	2,12	93,22 a	46,49 a	46,72	6,78 b	53,51 a	46,72
T ₄	19,66 a	14,91 a	4,75	92,75 a	73,36 a	19,39	7,25 b	26,64 b	19,39
T ₅	19,52 a	16,29 a	3,23	92,99 a	78,04 a	14,95	7,01 b	21,96 c	14,95
T ₆	19,96 a	16,80 a	3,16	93,42 a	74,75 a	18,67	6,58 b	25,25 b	18,67
T ₇	19,95 a	14,12 ab	5,83	89,48 ab	78,33 a	11,15	10,52 ab	21,67 c	11,15
T ₈	19,50 a	15,86 ab	3,65	87,59 b	75,69 a	11,90	12,41 a	24,31 b	11,90
T ₉	19,74 a	14,35 ab	5,39	93,08 a	74,05 a	19,02	6,92 b	25,95 b	19,02
T ₁₀	19,96 a	15,04 ab	4,92	93,06 a	78,88 a	14,18	6,94 b	21,12 c	14,18
T ₁₁	19,93 a	15,82 ab	4,11	90,72 ab	72,54 a	18,18	9,28 ab	27,46 b	18,18
T ₁₂	19,55 a	16,26 a	3,29	93,76 a	71,85 a	21,91	6,24 b	28,15 b	21,91
CV	1,92	6,91	-	1,29	16,80	-	15,26	0,28	-
<i>p</i>	0,79 ns	0,001**	-	0,005**	0,49 ns	-	0,005**	0,04*	-

Sólidos totales antes de la digestión anaeróbica (STA), Sólidos totales después de la digestión anaeróbica (STD), Reducción de los Sólidos totales (Red. ST), Sólidos volátiles antes de la digestión anaeróbica (SVA), Sólidos volátiles después de la digestión anaeróbica (SVD), Reducción de los sólidos volátiles (Red. SV), Sólidos fijos antes de la digestión anaeróbica (SFA), Sólidos fijos después de la digestión anaeróbica (SFD), Reducción de sólidos fijos (Red. SF). Coeficiente de Variación (CV). Probabilidad estadística (*p*). No significativo (ns), significativo (*), altamente significativo (**) ($p \leq 0,05$) test F. Medias con letras en común no difieren estadísticamente con el test de Tukey 5%.

Analizando la concentración de B, fue encontrado mayores efectos en el T₁₁ (44 ppm), siendo diferente de los demás tratamientos. En el contenido de Zn, los tratamientos T₁₀ y T₁₂ presentaron más contenido, diferenciándose de los demás tratamientos. Estudiando el Cu y Mn, en los tratamientos en que fue usado el estiércol porcino como inoculante (T₁₀, T₁₁ y T₁₂) se encontró mayores contenidos, siendo estos diferentes de los demás tratamientos estudiados. En el T₇ se muestra un efecto superior con 209,00 ppm de Fe, diferenciándose de los otros tratamientos (Tabla 4).

Al igual que en la presente investigación, es demostrado por Padi & Chimphango (2020) que el efluente obtenido a partir del proceso de la digestión anaeróbica contiene nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), por lo que beneficia a la agricultura como biofertilizante.

Hasanudin *et al.* (2019) mencionan que las aguas residuales tratadas por medio de la biodigestión anaeróbica de la industria de la yuca contienen aproximadamente 1,15 kg de nitrógeno y 0,05 kg de fósforo por tonelada de yuca, lo que equivale al 0,11% y 0,005%, respectivamente, siendo valores menores a los encontrados en la presente investigación con las diferentes partes de las fibras de yuca.

El biofertilizante obtenido por digestión anaeróbica del efluente de la industria de la yuca es una fuente de nutrientes y puede utilizarse como alternativa a los fertilizantes habituales en diversos cultivos como el crambre (Neves *et al.*, 2017), de igual manera como lo observado en la tabla 4, se demuestra que las diferentes fibras estudiadas en la presente investigación después del proceso de la biodigestión contienen macro y micronutrientes con enorme potencial para fertilizante.

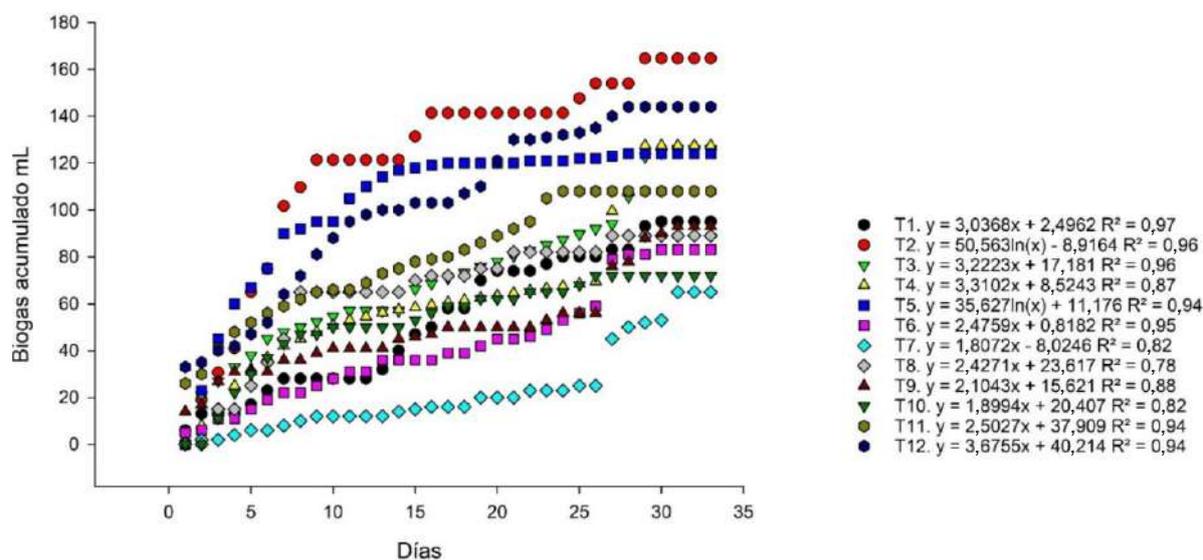


Figura 1. Cantidad de Biogás acumulado (mL) durante 32 días de la biodigestión anaeróbica de fibras de yuca. T₁. Corteza de la yuca + agua, T₂. Cilindro central de la yuca + agua, T₃. Corteza + Cilindro central de la yuca + agua, T₄. Corteza de la yuca + Inóculo de la Biodigestión de estiércol bovino, T₅. Cilindro central de la yuca + Inóculo de la Biodigestión de estiércol bovino, T₆. Corteza + Cilindro central de la yuca + Inóculo de la Biodigestión de estiércol bovino, T₇. Corteza de la yuca + Inóculo de la biodigestión de torta de piñón, T₈. Cilindro central de la yuca + Inóculo de la biodigestión de torta de piñón, T₉. Corteza + Cilindro central de la yuca + Inóculo de la biodigestión de torta de piñón, T₁₀. Corteza de la yuca + Inóculo de la biodigestión de estiércol porcino, T₁₁. Cilindro central de la yuca + Inóculo de la biodigestión de estiércol porcino, T₁₂. Corteza + Cilindro central de la yuca + Inóculo de la biodigestión de estiércol porcino.

Tabla 4. Análisis de macro y micronutrientes del sustrato biodigerido de la biodigestión anaeróbica de fibras de yuca.

Tratamientos	N	P	K	Ca	Mg	S
	%					
T ₁	1,55 c	0,06 a	0,38 defg	0,44 ab	0,05 bc	0,14 a
T ₂	0,75 d	0,06 a	0,42 cd	0,39 bc	0,06 abc	0,11 a
T ₃	0,85 d	0,05 a	0,34 efg	0,43 ab	0,05 bc	0,14 a
T ₄	0,75 d	0,04 a	0,27 h	0,44 ab	0,05 bc	0,12 a
T ₅	0,85 d	0,04 a	0,41 cde	0,36 bc	0,05 bc	0,13 a
T ₆	1,50 c	0,05 a	0,43 cd	0,41 abc	0,05 bc	0,15 a
T ₇	2,08 b	0,04 a	0,31 g	0,41 abc	0,04 c	0,14 a
T ₈	2,11 b	0,06 a	0,51 b	0,33 c	0,08 a	0,15 a
T ₉	2,62 a	0,05 a	0,64 a	0,43 ab	0,08 a	0,12 a
T ₁₀	2,15 b	0,05 a	0,39 def	0,49 a	0,07 ab	0,13 a
T ₁₁	2,27 b	0,04 a	0,47 bc	0,43 ab	0,07 ab	0,14 a
T ₁₂	1,47 c	0,05 a	0,34 fgh	0,43 ab	0,06 abc	0,15 a
CV	4,91	20,6	4,58	5,36	13,05	11,86
<i>p</i>	0,001**	0,16ns	0,001**	0,001**	0,001**	0,22ns
Tratamientos	B	Zn	Cu	Fe	Mn	
	ppm					
T ₁	36,00 b	11,00 bc	4,00 bc	18,50 h	4,00 c	
T ₂	36,50 b	6,00 cd	4,00 bc	14,50 h	2,50 c	
T ₃	23,50 cde	8,00 bcd	2,50 c	24,00 gh	4,00 c	
T ₄	18,50 de	9,00 bcd	2,50 c	43,50 ef	5,00 bc	
T ₅	19,50 de	4,00 d	2,50 c	48,50 def	3,50 c	
T ₆	20,50 de	7,50 cd	2,50 c	37,00 fg	4,00 c	
T ₇	18,00 e	9,50 bcd	2,50 c	209,00 a	6,50 bc	
T ₈	20,50 de	5,00 cd	3,00 bc	61,00 cd	3,50 c	
T ₉	28,00 c	10,50 bc	3,00 bc	73,00 c	6,50 bc	
T ₁₀	34,00 b	18,50 a	6,50 ab	124,00 b	13,00 a	
T ₁₁	44,00 a	10,50 bc	8,50 a	51,00 def	8,50 abc	
T ₁₂	24,00 cd	14,00 ab	8,50 a	56,00 de	10,50 ab	
CV	5,57	16,29	24	5,62	26,31	
<i>p</i>	0,001**	0,001**	0,001**	0,001**	0,001**	

Las diferentes mediciones de gas metano obtenidas en todos los tratamientos durante la biodigestión anaeróbica a los 32 días se muestran en la Figura 2. Los tratamientos T₈ (71,67 %CH₄), T₄ (71,67 %CH₄) y T₁₂ (56,67 %CH₄) tuvieron mayores concentraciones de gas metano, diferenciándose de los demás tratamientos. Peres *et al.* (2019), mencionan que es posible producir biogás con residuos de la industrialización de la yuca,

habiendo encontrado en su trabajo resultados superiores al 50% de CH₄, semejante a los encontrados en el presente estudio. En una investigación usando desechos de la yuca (corteza y tallo) en la producción de biogás encontraron valores de metano acumulado de hasta cerca de 70%, resultados similares a los encontrados en T₈ y T₄, con diferentes inóculos y residuos a los usados por Ismail *et al.* (2021).

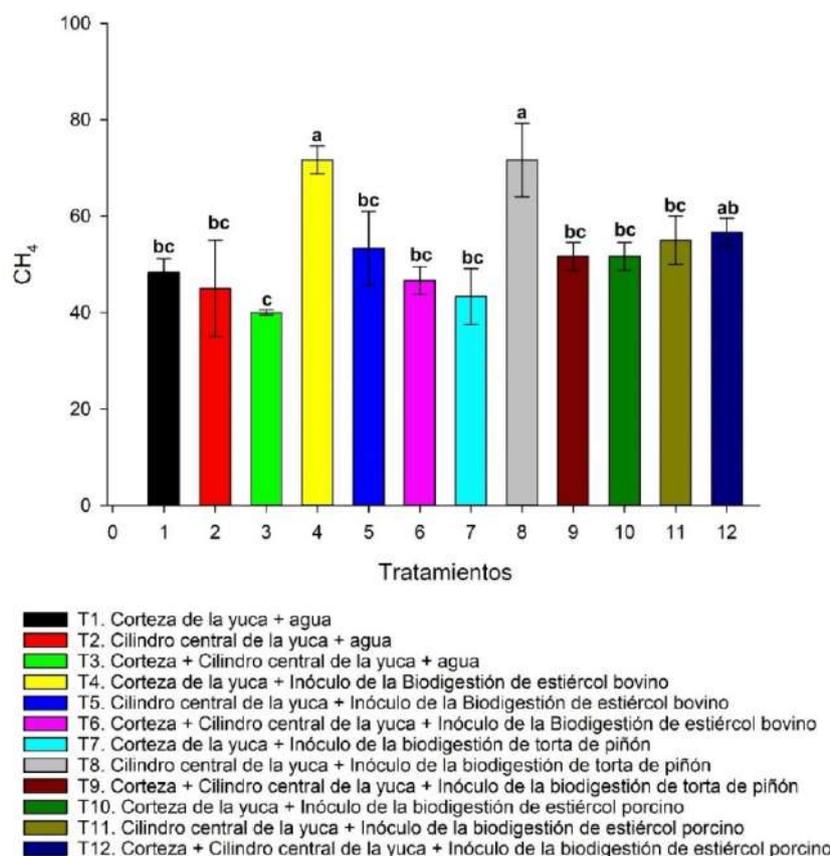


Figura 2. Porcentaje de gas metano medido la biodigestión anaeróbica de fibras de yuca.

Se concluye que fue producido biogás a partir de fibras de yuca (corteza y fibra central) con diferentes inóculos (Biodigestión de estiércol bovino, porcino y de torta de piñón), durante 32 días totalizando 164,66 mL de biogas en el tratamiento que se utilizó el Cilindro central de la yuca + agua. La biodigestión del cilindro central de la yuca o de la corteza usando como inoculantes la biodigestión de torta de piñón o estiércol bovino producen 71,67 % de CH₄. Los substratos biodigeridos contienen macro y micronutrientes con potencial uso en la agricultura, con mayor porcentaje en el tratamiento con Corteza + Cilindro central de la yuca + Inóculo de la biodigestión de torta de piñón.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alrefai, A. M.; Alrefai, R.; Benyounis, K. Y. & Stokes, J. 2020. Impact of Starch from Cassava Peel on biogas produced through

the anaerobic digestion process. *Energies*, 13: 2713.

Andrade, D.S.; Gavilanes, F.Z.; Silva, H.R.; Leite-Castro, H.G. & Telles, T.S. 2020. *Chapter 19 - Sustainable bioenergy production*. In: Gupta, V.K.; Treichel, H.; Kuhad, R.C. & Rodriguez-Cout, S. (eds) *Recent Developments in Bioenergy Research*. Elsevier, pp. 363-391.

Aristizábal, J.T.S. & Mejía, L.D. 2007. Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. *Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO*, 63: 1-134.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 1989. ABNT/NBR 10664. 1989. *Determinação de Sólidos totais, Sólidos suspensos e Sólidos dissolvidos - Método de gravimetria*. ABNT.

Azevedo, F. G. 2010. *Estudos das condições ambientais para a produção de biogás a partir de glicerol co-produto do biodiesel*. Disertación en (Maestría en Ingeniería Química) - Universidad Federal de

- Pernambuco – Campus de Recife – PE – Área de Concentração Engenharia Química.
- Cerón-Vivas, A.; Cáceres, K.T.C.; Pérez, A.R. & Cerón, Á.A.C. 2019. Influence of pH and the C/N ratio on the biogas production of wastewater. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 92: 88-95.
- Cock, J. H. & Connor, D. J. 2021. *Cassava*. In: *Crop physiology case histories for major crops* (pp. 588-633). Academic Press.
- Di Rienzo, J. A.; Macchiavelli, R. & Casanoves, F. 2017. *Modelos lineales generalizados mixtos aplicaciones en InfoStat*. 1^a ed. Grupo Infostat.
- Gavilanes, F. Z.; Guedes, C. L. B.; Silva, H. R.; Nomura, R. G. & Andrade, D. S. 2017. Physic nut seed cake methanation and chemical characterization of anaerobic biodegraded substrate. *Waste and Biomass Valorization*, 10: 1267-1276.
- Hasanudin, U.; Kustyawati, M. E.; Iryani, D. A.; Haryanto, A. & Triyono, S. 2019. Estimation of energy and organic fertilizer generation from small scale tapioca industrial waste. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 230: 012084.
- Henríquez, C.; Bertsch, F. & Salas, R. 1998. *La fertilidad de suelos: Manual de laboratorio*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Ismail, N.; Fauzi, N. F.; Salehabadi, A.; Latif, S.; Awiszus, S. & Müller, J. 2021. A study on biogas production from cassava peel and stem in anaerobic digestion reactor. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-10. doi:10.1007/s13762-021-03222-4.
- Kunz, A. & Oliveira, S. A. 2007. *Kit biogás portátil*. Concórdia: EMBRAPA – CNPSA. 2 p. http://www.cnpsa.embrapa.br/down.php?ti po=publicacoes&cod_publicacao=1068.
- Leite, V. D. & Povinelli, J. 1999. Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 3: 229-232.
- Mañunga, T.; Barrios-Pérez, J. D.; Zaiat, M. & Rodríguez-Victoria, J. A. 2019. Evaluation of pretreatment methods and initial pH on mixed inoculum for fermentative hydrogen production from cassava wastewater. *Biofuels*, 1 - 8. doi:10.1080/17597269.2019.1680041
- Neves, A. C.; Bergamini, C. N.; Leonardo, R. D. O.; Gonçalves, M. P.; Zenatti, D. C. & Hermes, E. 2017. Efeito de biofertilizante obtido da digestão anaeróbia de manipueira no desenvolvimento de plantas de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21: 681-685.
- Odoemelam, C.S.; Percival, B.; Ahmad, Z.; Chang, M.W.; Scholey, D.; Burton, E.; Okafor, P.N. & Wilson, P.B. 2020. Characterization of yellow root cassava and food products: investigation of cyanide and β -carotene concentrations. *BMC Research Notes*, 13: 333.
- Padi, R. K. & Chimphango, A. 2020. Commercial viability of integrated waste treatment in cassava starch industries for targeted resource recoveries. *Journal of Cleaner Production*, 265: 121619.
- Peres, S.; Monteiro, M.R.; Ferreira, M.L.; do Nascimento Junior, A.F.; & Fernandez, M.D.L.A.P. 2019. Anaerobic digestion process for the production of biogas from Cassava and sewage treatment plant Sludge in Brazil. *BioEnergy Research*, 12: 150-157.
- Prasetyo, T.; Sumardiono, S.; Aji, H. A.; & Pratama, A. Y. 2017. Effect of C/N ratio and pH on biogas production from industrial cassava starch wastewater through anaerobic process. *Advanced Science Letters*, 23: 5810-5814.
- Raheman, H. & Mondal, S. 2012. Biogas production potential of *Jatropha* seed cake. *Biomass and bioenergy*, 37: 25-30.
- Soeder, D. J. 2021. *Fossil Fuels and Climate Change*. In: *Fracking and the Environment*. Soeder, D. J. (Ed.). (pp. 155-185). Springer.
- Surendra, K. C.; Takara, D.; Hashimoto, A. G. & Khanal, S. K. 2014. Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31: 846-859.
- Suzuki, A. B. P.; Feiden, A.; Fernandes, D. M.; Martins, G. I. & Faria, R. A. P. 2012. Utilização de manipueira juntamente com sólidos da cama de aviário em biodigestores

para geração de biogás Use of cassava wastewater with solid poultry manure in anaerobic digesters to generate biogas. *Ambiência*, 8: 809-819.

TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente). 2017. *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>

Wang, Z.; Jiang, Y.; Wang, S.; Zhang, Y.; Hu, Y.; Hu, Z.; H. & Zhan, X. 2020. Impact of total solids content on anaerobic co-digestion of pig manure and food waste: Insights into shifting of the methanogenic pathway. *Waste Management*, 114: 96-106.

Received April 24, 2021.
Accepted May 21, 2021.