



## Potencial de biometanización de residuos del procesamiento de café

Alejandra Ramírez-Martínez<sup>1</sup>, Luis Antonio López-Escobar<sup>2</sup>, Oscar Andrés Del Ángel-Coronel<sup>3</sup>, Noemí Nava-Valente<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, Carretera Xalapa-Veracruz Km. 88.5, Tepetates, Manlio Fabio Altamirano 91690, Veracruz, México.

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Huatusco, Calle 9 Sur s/n, entre Avenidas 7 Y 9, Centro, Huatusco 94100, Veracruz, México.

<sup>3</sup>Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, Avenida 25 Poniente 100, Col. Reserva Territorial, Huatusco 94100, Veracruz, México.

\*Autor de correspondencia: [noemi\\_nava@itshuatusco.edu.mx](mailto:noemi_nava@itshuatusco.edu.mx)

Recibido 15 de agosto de 2020; aceptado 28 de septiembre de 2020

### RESUMEN

El procesamiento del café, llamado comúnmente beneficio del café, está asociado con repercusiones medio ambientales en zonas productoras, las cuales se deben principalmente a la alta fracción orgánica contenida en los residuos generados; este tipo de biomasa residual es una fuente prometedora de energía, la cual puede ser tratada mediante procesos biotecnológicos, tal como la digestión anaerobia. En años recientes, este proceso se ha aplicado comercialmente para producir bioenergía a través de la producción de biogás; por ello, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el potencial de biometanización de desechos de café robusta generados en el beneficio húmedo. Para lograr tal objetivo, inicialmente se obtuvieron residuos de café en dos beneficios diferentes localizados en el municipio de

Tlamatoca, Veracruz, para su posterior acondicionamiento. La etapa consecutiva consistió en realizar pruebas para la obtención de biogás en operación semicontinua, partiendo de una carga orgánica de 1 kg SV/m<sup>3</sup>.d, incrementando cada 15 días 0.5 kg SV/m<sup>3</sup>.d hasta llegar a una carga orgánica de 2.5 kg SV/m<sup>3</sup>.d. El análisis estadístico reveló que, durante los 30 primeros días de fermentación, la cantidad promedio de metano producida no tuvo una diferencia significativa ( $p>0.05$ ), aumentando significativamente en el último periodo de la fermentación ( $p<0.05$ ). Aunado a ello, ni la carga de alimentación ni el tiempo de proceso afectaron significativamente el rendimiento del metano con respecto a los gramos de sólido removido ( $p>0.05$ ). Los datos obtenidos muestran la capacidad que los residuos de café robusta tienen en la producción de gas metano.

**PALABRAS CLAVE:** Biogas, digestion anaerobia, metano, pulpa de café

#### **ABSTRACT**

Coffee processing, commonly called ‘beneficio’, is associated with environmental repercussions in producing areas, problems that are mainly due to the high organic fraction contained in the waste generated; this type of residual biomass is a promising source of energy, which can be treated through biotechnological processes, such as the anaerobic digestion. In recent years, this process has been commercialized to produce bioenergy through the production of biogas; therefore, the objective of this work was to evaluate the potential for biomethanization of robusta coffee waste generated on the wet process. To achieve this objective, coffee residues were obtained from two different ‘beneficios’ located in the municipality of Tlamatoca, Veracruz, for their subsequent conditioning. Then, tests to obtain biogas in semi-continuous operation starting from an organic load of 1 kg SV/m<sup>3</sup>.d were carried out; we increased the organic load every 15 days 0.5 kg SV/m<sup>3</sup>.d until a final organic load of 2.5 kg SV / m<sup>3</sup>.d was achieved. The statistical analysis revealed that, during the first 30 days of fermentation, the average amount of methane produced did not increased significantly ( $p>0.05$ ); however, it increased on the last fermentation period (45-60 days,  $p<0.05$ ). Neither the organic

load or the time significantly affected the ratio between the obtained methane and the grams of solid removed from the system ( $p>0.05$ ). These data show the capacity of the waste from the wet processing of robusta coffee to produce methane.

**KEY WORDS:** Biogas, anaerobic digestion, methane, coffee pulp.

## **INTRODUCCIÓN**

El procesamiento del café, llamado comúnmente beneficio del café, está asociado con repercusiones medio ambientales en zonas productoras debido a que los subproductos generados en el proceso contienen una alta fracción orgánica, taninos y compuestos fenólicos nocivos para las plantas, los seres humanos y la biota acuática (Franca et al., 2016; Shemekite et al., 2014; Beyene et al., 2012). La digestión anaerobia constituye una opción tanto para la gestión integral de los residuos y su disminución como para su aprovechamiento y revalorización.

La digestión anaerobia es la tecnología establecida más antigua para la recuperación de energía a través de la degradación biológica de los desechos orgánicos (Mahanty et al., 2014; Bharathiraja et al., 2018). En los últimos años, este proceso se ha aplicado ampliamente para producir bioenergía comercialmente a través de la producción de biogás (Arias et al., 2020). El biogás es una mezcla gaseosa de metano, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno, entre otros, producida por conversión bacteriana de biomasa, también de ser considerado una forma de energía limpia y renovable; además, tiene la ventaja de ser fácil de

implementar para los consumidores y fácil de producir a nivel local, como en granjas de pequeña escala (Taherdanak et al., 2014). El metano, presente en la mezcla del biogás, posee un alto poder calorífico (9100 kcal/m<sup>3</sup> a 15.5° C y 1 atm), mientras que el poder calorífico del biogás varía de 4800 a 6900 kcal/m<sup>3</sup> (Harasimowicz et al., 2007; Widjaja et al., 2010), por lo que es deseable producir biogás con altas concentraciones de metano (CH<sub>4</sub>). Es importante resaltar que la concentración de metano en el biogás depende en gran medida de la fuente de sustrato orgánico y de las condiciones de descomposición (Abdeshahian et al., 2016). En este sentido, la biomasa generada en el procesamiento de café puede ser una fuente muy eficiente de biogás y metano (Fischer et al., 2010), ya que proporciona un balance energético particularmente favorable cuando se considera el rendimiento energético de la biomasa a la energía primaria proporcionada (Deublein et al., 2010).

Los estudios referentes a la producción de biogás a partir de restos de café generalmente no especifican la especie de café del cual provienen los desechos utilizados (Zambrano, 1994; Cabrera, 2011; Fernández et al., 2005). Estos trabajos reportan producciones de biogás que varían

entre los 0.03 m<sup>3</sup> hasta los 0.3 m<sup>3</sup>, dependiendo del tiempo de residencia en el reactor, el método de operación (batch, semi-continuo o continuo), si los desechos fueron tratados solos o en combinación con otros desechos y si hubo control o no de las condiciones de operación del reactor. También es importante considerar que el café arábigo y robusta presentan diferencias en la composición química de sus granos, pues el contenido de cafeína es mayor en el segundo en comparación con el primero, además de que su contenido de lípidos y carbohidratos solubles difieren entre ambas especies (Belitz et al., 2009), que son sustratos esenciales para la producción de biogás (Moreno, 2011) y metano. Por otro lado, la producción de café robusta ha aumentado en varios países, incluyendo México, incremento que es en parte debido a la resistencia de la especie a la roya (principal plaga presente en el cafeto).

Por todo lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el potencial de biometanización a partir de desechos de café robusta provenientes del beneficiado húmedo. La información obtenida servirá de antecedente para la puesta en marcha de reactores productores de biogás a partir de residuos de café,

ubicados en pequeñas poblaciones cafetaleras del estado de Veracruz, los cuales representan una alternativa de obtención de energía renovable a partir del tratamiento y revalorización de residuos generados en el procesamiento del café.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Obtención de las muestras**

Para la producción de biogás, se utilizó pulpa de café obtenida durante el beneficio húmedo del café, la cual fue obtenida de dos beneficios diferentes, localizados en el municipio de Tlamatoca, Veracruz. Las muestras de pulpa de café robusta fueron obtenidas de las tolvas de descarga localizadas en cada beneficio analizado; las tolvas recolectan desechos para después desecharlos en terrenos cercanos. Posteriormente, se redujo el tamaño de partícula de las muestras de pulpa de café mediante un molino de aspas y a su conservación a 4° C para su posterior uso.

### **Pruebas para la obtención de biogás**

La producción de biogás se realizó mediante fermentaciones en lotes (semi-continua o batch) a nivel laboratorio. Para las pruebas de fermentación, se utilizaron reactores de plástico con capacidad de 600 ml,

los cuales contenían una proporción (v/v) de 18% pulpa de café, 42% agua y 40% inóculo, proporción que fue establecida en trabajos previos y descrita por Hernández et al., (2019). Los reactores fueron llenados al 90% de su capacidad y sellados con un material epóxico para evitar posibles fugas de biogás; los reactores fueron operados de la siguiente manera: los reactores anaerobios a escala de laboratorio se alimentaron diariamente con la mezcla antes descrita (18% pulpa de café, 42% agua y 40% inóculo), equivalente a una carga orgánica de 1 kg SV/m<sup>3</sup>.d.

Posteriormente, cada 15 días se incrementó 0.5 kg SV/m<sup>3</sup>.d hasta llegar a una carga orgánica de 2.5 kg. S/m<sup>3</sup>.d. El inóculo utilizado provenía de un reactor anaerobio mesofílico (35°C±2°C) de residuos orgánicos municipales (proceso semilíquido).

### **Métodos analíticos**

Los análisis de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y pH se realizaron de acuerdo al Standard Methods (2005). La determinación del pH se hizo en un equipo marca Hanna Instrumentos (pH 300, Texas) para cada tratamiento por duplicado. Si el valor medido de pH no correspondía a un valor de 7, se agregaba hidróxido de

sodio al 40% (p/p) a la mezcla de residuos con el objetivo de ajustar el pH.

La composición de biogás se analizó mediante un cromatógrafo de gases Ultra-Trace Thermo Scientific equipado con una columna Heliflex AT-Mol Sieve (longitud 30 m x 0.53 mm de diámetro), un Heliflex AT-Q (longitud 30 m x 0.53 mm de diámetro) y un detector de conductividad térmica. En la primera columna, se analizó O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, mientras que en la segunda columna CH<sub>4</sub>, y CO<sub>2</sub>, el gas empleado como acarreador fue helio.

### **Análisis estadístico**

Las pruebas de diferencias de varianzas por ANOVA fueron seguidas por una prueba de Tukey entre pares de muestras, y el análisis de componentes principales se realizó usando el software Minitab 19. También consideraron pruebas en las que la probabilidad calculada era menor al 5% (p<0.05).

## **RESULTADOS**

Como se mencionó en la introducción, los desechos del beneficio húmedo de café tienen el potencial de producir energía eléctrica a partir del biogás que estos mismos

desechos liberan al ser sometidos a fermentación. La utilización de tales desechos reviste una importancia particular para el estado de Veracruz, ya que a) actualmente es el segundo productor de café en el país y b) la cantidad de café robusta que se siembra en el estado va en aumento (SIAP, 2019), c); además de que el uso de tales residuos permitiría disminuir la contaminación que estos provoca en el ambiente. A continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas.

### Producción de metano

La tabla 1 muestra los ml de metano promedio producidos con respecto al tiempo de fermentación y la carga orgánica. El análisis estadístico reveló que, durante los 30 primeros días de fermentación, la cantidad promedio de metano producida no tuvo una diferencia significativa ( $p>0.05$ ), aumentando significativamente en el último periodo de la fermentación ( $p<0.05$ ). Al contrastar estos resultados con el volumen de metano producido en con relación al volumen total de biogás respecto al tiempo de fermentación y la carga orgánica (figura 1), puede notarse que al inicio del proceso (0-15 días) hubo un

gran cambio en la proporción de metano presente en el biogás producido (6.8 y 75%), lo que sugiere la adaptación del medio de cultivo utilizado. Esta gran diferencia se redujo al aumentar la carga de alimentación y el tiempo de proceso (figura 1).

**Tabla 1.** Valores promedio de la producción de metano (ml) y rendimiento del metano producido por gramo de sólido removido a diferentes valores de carga orgánica de alimentación (ml/gr)

Días	1 kg SV/m <sup>3</sup> d	1.5 kg SV/m <sup>3</sup> d	2 kg SV/m <sup>3</sup> d	2.5 kg SV/m <sup>3</sup> d
0-15	12.351± 16.06 <sup>a*</sup> 45.431± 52.97 <sup>a**</sup>	-	-	-
16-30	-	12.154±1 0.03 <sup>a</sup> 61.21±49 .86 <sup>a</sup>	-	-
31-45	-	-	24.073±1 7.70 <sup>ab</sup> 87.44±56. 75 <sup>a</sup>	-

45-			32.731±2
60	-	-	2.20 <sup>b</sup>
			94.97±64
			.05 <sup>a</sup>

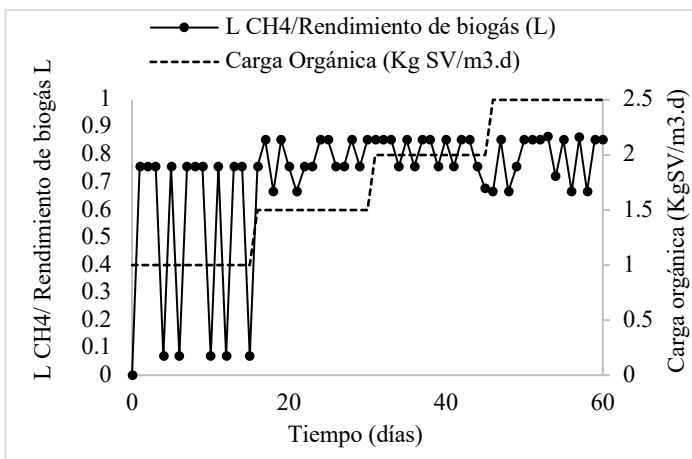
\*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

\*\*Rendimiento de metano mL/g sólido removido

Es interesante notar que el rendimiento del metano respecto a los gramos de sólido removido no mostró una diferencia significativa ni con la carga de alimentación ni con el tiempo de proceso (tabla 1), lo que puede explicarse por la gran variabilidad de los valores de rendimiento. A pesar de esta variabilidad, estos datos muestran la capacidad que los residuos de café robusta tienen en la producción de gas metano.

**Figura 1.** Relación del volumen de metano producido en relación con el volumen total de biogás con respecto al tiempo de fermentación y la carga orgánica.

El cambio en la producción de metano depende también del porcentaje de sólidos volátiles removidos ( $SV_{rem}$ ), valores que son fundamentales para conocer la eficiencia del proceso de conversión de la materia orgánica de los residuos de café en metano, de manera que, mientras mayor sea el porcentaje de remoción de sólidos volátiles, mayor será la producción de biogás, es decir, más eficiente; el porcentaje de remoción de sólidos volátiles también muestra la eficiencia en el tratamiento de residuos sólidos. En promedio, un tratamiento de remoción de sólidos orgánicos tiene eficiencias de hasta el 45% (Flores-Juárez, 2008), lo que sugiere que los porcentajes de remoción alcanzados mediante el proceso utilizado en el presente trabajo son aceptables. La tabla 2 muestra que los valores de remoción de SV no variaron significativamente con la carga orgánica ni el tiempo de fermentación, aunque hacia el final del proceso disminuyeron ligeramente, cuando la carga de alimentación aumentó a 2 kg SV/m<sup>3</sup> d, para volver a aumentar hacia el final del proceso.





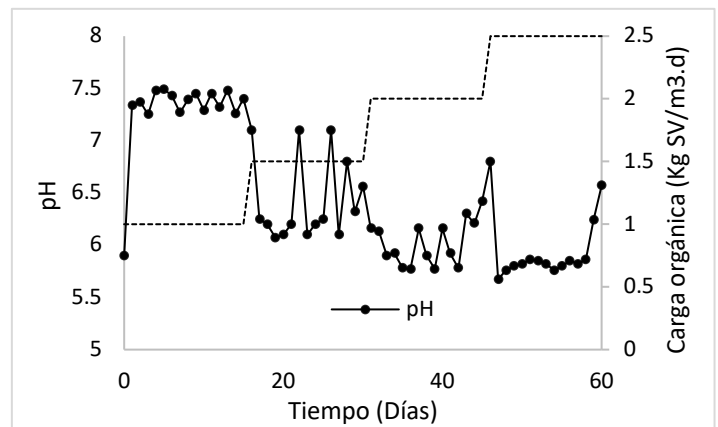
Houbron et al., (2003) evaluaron la producción bioquímica de metano de los efluentes de la producción de café, tanto residuos sólidos como aguas residuales líquidas. Los residuos se pretrataron a pH = 3 durante 48 h antes de que se llevara a cabo la prueba de fermentación en un reactor CSTR de 4 l. La prueba, realizada en condiciones mesófilas, dio como resultado una producción de biogás de aproximadamente 252 LCH<sub>4</sub>/kg<sub>Δ</sub>VS.

El pH es otro factor con un gran impacto en el proceso de remoción de sólidos y producción de biogás, y es que en el proceso de fermentación de residuos orgánicos suceden reacciones en las que se producen ácidos orgánicos, lo que disminuye el pH del medio; sin embargo, esta disminución puede inhibir a las bacterias implicadas en el propio proceso de fermentación (Hernández-Fernández et al., 2019). La figura 2 muestra los valores de pH registrados durante el proceso de fermentación, en la que es posible notar la disminución del pH respecto al tiempo y la carga orgánica, la cual fue significativa estadísticamente (p<0.05).

**Tabla 2.** Porcentaje de remoción de SV a diferentes valores de carga orgánica de alimentación

Días de producción	1 kg SV/ m <sup>3</sup> d	1.5 kg SV/ m <sup>3</sup> d	2 kg SV/ m <sup>3</sup> d	2.5 kg SV/ m <sup>3</sup> d
0-15	35.45±16 0.32 <sup>a</sup>	-	-	-
16-30	-	36.85±6 0.08 <sup>a</sup>	-	-
31-45	-	-	29.10±1 0.46 <sup>a</sup>	-
45-60	-	-	-	38.09±7 0.18 <sup>a</sup>

Las medidas que no comparten una letra son significativamente diferentes



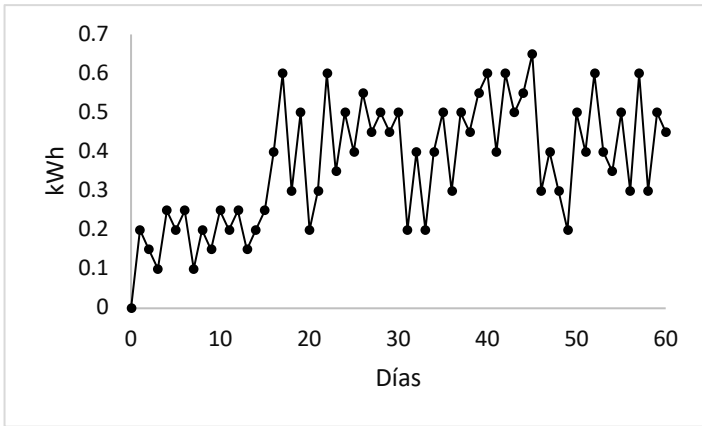
**Figura 2.** Valores del pH del medio de fermentación (residuos de café, agua e inóculo) con respecto al tiempo de fermentación y la carga orgánica.

Los resultados de la tabla 3 revelan que la correlación más grande y significativa corresponde a la de los datos de la carga orgánica y el pH. Experimentos previos realizados con la mezcla utilizada en el presente trabajo (Hernández et al., 2019) mostraron que el pH disminuye, comportamiento que no fue observado con otras muestras; particularmente, un análisis de los datos mostró que la diferencia del pH con relación al valor inicial tenía un efecto significativo en la producción de biogás (y por ende de metano), efecto que no fue observado en el presente trabajo (datos no mostrados), lo que pone de manifiesto el efecto del sistema de fermentación, pues previamente utilizamos un sistema batch, mientras que en el presente trabajo se utilizó un sistema semi-batch. Es notable también la baja correlación (aunque fuertemente significativa) entre la relación del volumen metano/biogás y el volumen de biogás producido. Esta baja correlación puede explicarse por la gran variabilidad en la relación metano/biogás observada al inicio del proceso (figura 1). En ese sentido, es importante resaltar que la relación metano/biogás alcanza valores de rendimiento del 85% (figura 1), lo que muestra que la eficiencia en la conversión de los componentes de los residuos de café

robusta es buena, llegando a alcanzar rendimientos de producción de metano (l) por gramo de sólidos removidos de 94.97 mL/g (tabla 1).

### **Potencial de producción de energía eléctrica a partir del biogás producido**

Hasta ahora, hemos planteado el proceso mediante el cual es posible producir metano a partir de desechos de café. Con el objetivo de mostrar el potencial de producción de energía eléctrica a partir del metano producido, estimamos valores de energía eléctrica partiendo del hecho de que el metano puede generar hasta 10 kWh/m<sup>3</sup>; de acuerdo a los resultados de producción de metano obtenidos en el sistema propuesto, es posible generar hasta 0.65 kWh (figura 3). Es interesante notar que Chala et al., 2018, sugirieron que la cantidad de energía eléctrica y térmica que el metano producido por desechos de café puede producir es aún mayor que la considerada en el presente trabajo: 3.49 MWh/m<sup>3</sup> en el primer caso y 4 MWh/m<sup>3</sup> en el segundo. Además, Chala et al. (2015) mencionaron que las instalaciones de procesamiento de café pueden utilizar tanto la electricidad como la energía térmica producidas por los desechos del proceso para sus propios fines productivos.



**Figura 3.** Potencial ideal de producción de energía eléctrica del metano producido

Como es posible observar en la figura 3, aunque modesta, la cantidad de energía eléctrica potencial que puede producir el sistema propuesto permitiría cubrir necesidades básicas en un hogar. Por ello, consideramos que es viable escalar el sistema para generar más metano y, por ende, una mayor cantidad de energía eléctrica.

### CONCLUSIONES

La cantidad de gas metano obtenido en un reactor de laboratorio operado en un sistema semi-continuo, utilizando residuos de café e inóculo como medio de fermentación, sugieren que utilizar tales residuos permitiría obtener energía eléctrica que satisfaga las necesidades básicas de un hogar. Finalmente, escalar el

proceso permitiría aumentar la producción de metano y, por consecuencia, de energía eléctrica.

### BIBLIOGRAFÍA

- Abdeshahian, P., Lim, J. S., Ho, W. S., Hashim, H., & Lee, C. T. (2016). Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 714-723.
- Adams, M.R.; Dougan, J. (1987) Waste products. In *Coffee: Volume 2: Technology*; Clarke, R.J., Macrae, R., Eds.; Springer Netherlands: Dordrecht, The Netherlands, 257–291.
- APHA (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA), Washington.
- Arias, D. E., Veluchamy, C., Dunfield, K. E., Habash, M. B., & Gilroyed, B. H. (2020). Hygienization and microbial metabolic adaptation during anaerobic co-digestion of swine manure and corn stover. *Bioresource Technology*, 123168.
- Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ) 2018. Los subproductos del café. Disponible en

- [https://www.anacafe.org/glifos/index.php/BeneficioHumedo\\_Subproductos](https://www.anacafe.org/glifos/index.php/BeneficioHumedo_Subproductos).
- Baier, U.; Schleiss, K. (2005) Greenhouse gas emission reduction through anaerobic digestion of coffee pulp. In Proceedings of the 4th International Symposium Anaerobic Digestion of Solid Waste, Copenhagen, Denmark.
- Belitz, H. D., Grosch, W., & Schieberle, P. 2009. Coffee, tea, cocoa. Food chemistry, 938-970.
- Beyene, A., Kassahun, Y., Addis, T., Assefa, F., Amsalu, A., Legesse, W., & Triest, L. (2012). The impact of traditional coffee processing on river water quality in Ethiopia and the urgency of adopting sound environmental practices. Environmental monitoring and assessment, 184(11), 7053-7063.
- Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Chozhavendhan, S., & Iyyappan, J. (2018). Biogas production—A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. Renewable and sustainable Energy reviews, 90(C), 570-582.
- Bonilla-Hermosa, V. A., Duarte, W. F., & Schwan, R. F. (2014). Utilization of coffee by-products obtained from semi-washed process for production of value-added compounds. Bioresource technology, 166, 142-150.
- Cabrera, J. C. (2011) Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café (Bachelor's thesis, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2012.).
- Chala, B., Oechsner, H., Latif, S., & Müller, J. (2018). Biogas potential of coffee processing waste in Ethiopia. *Sustainability*, 10(8), 2678.
- Chanakya, H. N., & De Alwis, A. A. P. (2004). Environmental issues and management in primary coffee processing. Process Safety and Environmental Protection, 82(4), 291-300.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). Biogas from waste and renewable resources: an introduction. John Wiley & Sons.
- Fernández Boizán, M., Rodríguez Pérez, S., Bermúdez Savón, R. C., Terry Brown, A., & Treto Rey, Y. (2005). Evaluación de la biodegradabilidad anaerobia de los residuales líquidos de una

- despulpadora ecológica. *Revista Cubana de Química*, 17.
- Fischer, E.; Schmidt, T.; Hora, S.; Geirsdorf, J.; Stinner, W.; Scholwin, F. (2010) *Agro-Industrial Biogas in Kenya: Potentials, Estimates for Tariffs, Policy and Business Recommendations*; German International Cooperation (GIZ):Berlin, Germany.
- Flores-Juárez C.R. (2008) *Tratamiento de residuos sólidos provenientes de rastros mediante digestión anaerobia*. Tesis (Maestría en Ciencia y Tecnología en la Especialidad de Ingeniería Ambiental). Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S. C.
- Franca, A. S., Oliveira, L. S. (2009). Coffee processing solid wastes: current uses and future perspectives. *Agricultural wastes*, 9, 155-189.
- Franca, A. S., Oliveira, L. S. (2016). *Coffee and its by-products as sources of bioactive compounds*. *Coffee: Production, Consumption and Health Benefits*. New York, USA: Nova Science Publishers, 1-28.
- Gadhamshetty, V., Arudchelvam, Y., Nirmalakhandan, N., & Johnson, D. C. (2010). Modeling dark fermentation for biohydrogen production: ADM1-based model vs. Gompertz model. *international journal of hydrogen energy*, 35(2), 479-490.
- Harasimowicz, M., Orluk, P., Zakrzewska-Trznadel, G., & Chmielewski, A. (2007). Application of polyimide membranes for biogas purification and enrichment. *Journal of Hazardous Materials*, 144(3), 698-702.
- Hernández-Fernández J., Nava-Valente N., Ramírez-Martínez A. (2019) *Avances en Investigación Agrícola, Pecuaria, Forestal, Acuícola, Pesquería, Desarrollo Rural, Transferencia de Tecnología, Biotecnología, Ambiente, Recursos Naturales y Cambio Climático*. INIFAP, CP, UACH, INAPESCA, UV, TecNM. Medellín, Ver., México. Año 3, Num. 1, 224P.
- Houbron, E., Larrinaga, A., & Rustrian, E. (2003). Liquefaction and methanization of solid and liquid coffee wastes by two phase anaerobic digestion process. *Water science and technology*, 48(6), 255-262.
- Kivaisi, A. K., & Rubindamayugi, M. S. T. (1996). The potential of agro-industrial residues for production

- of biogas and electricity in Tanzania. *Renewable Energy*, 9(1-4), 917-921.
- Mahanty, B., Zafar, M., Han, M. J., & Park, H. S. (2014). Optimization of co-digestion of various industrial sludges for biogas production and sludge treatment: Methane production potential experiments and modeling. *Waste management*, 34(6), 1018-1024.
- Miñón-Fuentes, R., & Aguilar-Juárez, O. (2019). Hydrogen production from coffee pulp by dark fermentation. *Water Science and Technology*, 80(9), 1692-1701.
- Moreno, M. T. V. 2011. *Manual de biogas*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Shemekite, F., Gómez-Brandón, M., Franke-Whittle, I. H., Praehauser, B., Insam, H., & Assefa, F. (2014). Coffee husk composting: an investigation of the process using molecular and non-molecular tools. *Waste management*, 34(3), 642-652.
- Taherdanak, M., & Zilouei, H. (2014). Improving biogas production from wheat plant using alkaline pretreatment. *Fuel*, 115, 714-719.
- Widjaja, T., Iswanto, T., Altway, A., Shovitri, M., & Juliastuti, S. R. (2017). Methane production from coffee pulp by microorganism of rumen fluid and cow dung in co-digestion. *Chemical Engineering Transactions*, 56, 1465-1470.
- Zambrano, F. 1994. *DA Estudios de planta piloto para el tratamiento anaeróbico de las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café*. Centro nacional de Investigaciones de café, Chinchiná. Cenicafé.