

Evaluation of biogas production from cocoa husks and mucilage

Evaluación de la producción de biogás a partir de cáscara y mucílago de cacao

TABAREZ, K.¹; RAMÓN, A. A.²; CARRASCO, L. M.³; VÁSQUEZ, J.⁴

¹Ing. Keily Vanessa Tabarez Hincapie, Ingeniería Bioquímica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, e-mail: kvtabarez@gmail.com. ORCID. <https://orcid.org/0009-0005-0766-498X>

²Ing. Aura Alexandra Ramón Vanegas, Grupo de Bioprocesos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. E-mail: aura.ramonv@udea.edu.co. ORCID. <https://orcid.org/0000-0003-1252-9983>

³MSc. Luz Marina Carrasco Salcedo, Programa de derecho, grupo Democracia, Derecho y Justicia, Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia. E-mail: investigaciones.apa@ucc.edu.co. ORCID. <https://orcid.org/0009-0002-9700-4069>

⁴PhD. Juan Esteban Vásquez Bustamante, Grupo de Bioprocesos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. E-mail: juan.vasquezb@udea.edu.co. ORCID. <https://orcid.org/0000-0003-3178-6854>

Universidad de Antioquia
Ciudadela Universitaria Medellín, Antioquia, Colombia
Tel: +57 604 2195537
E-mail: kvtabarez@gmail.com

Recibido: 12/12/2023 / Aceptado: 10/04/2024

Resumen

La industria del cacao genera una gran cantidad de residuos durante el proceso de producción, destacando entre ellos la cáscara de cacao (CVC) y el exudado de mucílago de cacao (EMC). Estos residuos pueden ser aprovechados como sustratos en sistemas de digestión anaerobia para la obtención de biogás debido a su alto contenido orgánico. En ese sentido, el objetivo de este estudio fue evaluar la producción de biogás a partir de estos residuos a través de la determinación de su potencial bioquímico de metano y la producción semicontinua en biodigestores anaerobios. Como resultados, el potencial de EMC, CVC y la codigestión de ambos residuos obtuvieron rendimientos máximo de metano de 636 NmLCH₄/g·SV, 114 NmLCH₄/g·SV y 346 NmLCH₄/g·SV, respectivamente. En la producción semicontinua de biogás, se obtuvieron rendimientos de biogás de 295 mL/gSV·d con la CVC y 462 mL/gSV·d con el EMC. Además, se identificaron problemas de estabilidad de pH en el sistema con EMC, aunque se obtuvieron rendimientos significativos de biogás. Este estudio destaca la importancia de adoptar prácticas sostenibles en la gestión de residuos del cacao para mitigar la contaminación ambiental mediante sistemas de digestión anaerobia.

Palabras clave: Cáscara de cacao, mucílago de cacao, biogás, codigestión, residuo.

Abstract

The cocoa industry generates a significant amount of waste during the production process, notably cocoa pod husks (CPH) and cocoa mucilage exudate (CME) among them. These residues can be utilized as substrates in anaerobic digestion systems for biogas production due to their high organic content. In this regard, the objective of this study was to evaluate biogas production from these residues. To achieve this, the biochemical methane potential and semi-continuous production in anaerobic digesters were determined. As results, the potential of EMC was significantly higher compared to CVC and its co-digestion; A maximum methane yield of 636.4 NmLCH₄/g-VS, 114.3 NmLCH₄/g-VS, and 345.7 NmLCH₄/g-VS were obtained, respectively. In semi-continuous biogas production, biogas yields of 294.9 mL/gVS·d were obtained with the CVC and 462.2 mL/gVS·d with the EMC. In addition, pH stability problems were identified in the system with EMC, although significant biogas yields were obtained. This study emphasizes the importance of adopting sustainable practices in cocoa waste management to mitigate environmental pollution through anaerobic digestion systems.

Keywords: Coca pod husks, cocoa mucilage, biogas, co-digestion, waste.

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de cacao en Colombia ha abarcado un área de 188.000 Ha distribuida en 27 departamentos, de los cuales, Santander, Antioquia, Arauca, Huila, Tolima y Nariño, son los más representativos (MADR, 2021). La producción de cacao en Colombia ha alcanzado una producción promedio anual de 53 mil toneladas (Unidad de Gestión de Riesgos Agropecuarios, 2020). En particular, la región del Urabá se produce alrededor del 39% de la producción de cacao en Antioquia (Cámara de Comercio del Magdalena Medio y Nordeste Antioqueño, 2018). Con estos altos volúmenes de producción, en las fincas cacaoteras colombianas, por lo general, se enfrentan problemas ambientales debido a la falta de estandarización en la gestión de residuos. Durante el proceso de producción de cacao, se producen una cantidad considerable de residuos entre los cuales se desechan partes de la fruta que representan entre el 70-80% de su totalidad; se elimina la cáscara del grano, el exudado de mucílago y la cáscara de cacao (Valladares et al., 2022). La cáscara de cacao (CVC) contiene

aproximadamente un 10-15% de humedad y es rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, este residuo se ha utilizado como abono orgánico, como combustible y en algunos casos, como ingrediente en productos alimentarios (Vriesmann et al., 2011). Por otro lado, el exudado de mucílago de cacao (EMC), es una sustancia viscosa y gelatinosa compuesto principalmente de azúcares como la sacarosa. La disposición final de estos residuos no ha sido establecida, lo que resulta en descomposición, malos olores, contaminación de suelos y la propagación de plagas en las plantas, lo que provoca impactos ambientales negativos (Porto de Souza et al., 2022). Debido a la gran cantidad de subproductos que se descartan como residuos, los cultivadores enfrentan dificultades de sostenibilidad, lo que supone un desperdicio significativo. Se estima que se eliminan alrededor de 10 toneladas de residuos a partir de una tonelada de frijol de cacao seco procesada (Mariatti et al., 2021). Estos residuos ofrecen oportunidades valiosas de valorización, siendo la digestión anaerobia uno de ellos. La digestión anaerobia (DA) es un proceso complejo en el cual la acción metabólica de un grupo de

microorganismos degrada la materia orgánica en ausencia de oxígeno (Uddin et al., 2019). Durante este proceso, se descomponen compuestos orgánicos complejos en productos intermediarios conocidos como ácidos grasos volátiles (AGV), esenciales en el proceso debido a que sirven como precursores fundamentales en la producción de metano. Esta descomposición conduce a la formación de una mezcla de gases denominada biogás, compuesta por CH₄ (50-70%), CO₂ (25-45%) y pequeñas cantidades de otros gases, como N₂, H₂, O₂, H₂S, entre otros (Calbry et al., 2020). De acuerdo con la información anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la obtención de biogás de residuos procedentes del proceso de obtención del cacao mediante la determinación del potencial metanogénico y la estimación de la producción semicontinua de biogás a partir de estos residuos.

2. METODOLOGIA

El inóculo empleado en la determinación del ensayo de potencial bioquímico de metano (PBM) consistió en lodos provenientes de un digestor anaerobio de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando de Medellín, Colombia. El lodo se almacenó a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) durante 5 días antes de usarse en los experimentos como inóculo. Como sustratos se utilizaron la CVC y el EMC proveídos por la asociación de cacaoteros ubicada en Chigorodó, Colombia. La CVC fue reducida a un tamaño menor a 5 mm. Los residuos fueron almacenados en refrigeración a 4 °C. En la Tabla 1 se puede encontrar el contenido de sólidos totales, sólidos volátiles y humedad

presentes en cada residuo. Estos parámetros fueron analizados siguiendo los procedimientos establecidos en los métodos estándar (APHA, 2017).

Para el PBM de los residuos y su codigestión en proporción 50:50; se utilizó el equipo AMPTS II – Light. Para ello, se emplearon viales de 2,3 L con un volumen útil de 2L dejando un espacio libre de 300 mL. Los ensayos se realizaron por duplicado. En los sistemas alimentados con CVC y la codigestión, la proporción entre la cantidad de inóculo y el sustrato en términos de sólidos volátiles correspondió a 2 y para los ensayos con EMC de 1,8. Los potenciales se evaluaron por un tiempo de 20 días a una temperatura mesófila de 35 °C. La remoción de CO₂ del biogás fue llevada a cabo al hacer pasar el biogás por un vial con NaOH a una concentración de 1M. Además, se tomaron muestras de ácidos grasos volátiles (AGV). Estos ácidos se cuantificaron empleando un HPLC con una columna ICSep COREGEL-87H3, a un flujo de 0,6 mL/min, utilizando una solución móvil de H₂SO₄ 0,01 N, y la temperatura de columna se mantuvo en 80 °C.

Tabla 1. Caracterización de residuos.

Muestra	Sólidos volátiles (%)	Sólidos totales (%)	Humedad (%)
CVC	16,86	15,54	84,14
EMC	5,64	7,37	92,63

Fuente: Autores.

La evaluación de biogás semicontinua se llevó a cabo mediante la operación de dos reactores tipo ASBR, uno con CVC y otro con EMC. Se utilizaron biodigestores construidos en PVC con volumen total de

6 L, dejando un espacio de cabeza de 1 L. (Tabarez, 2023). Los biodigestores fueron operados a temperatura ambiente de aproximadamente 30 °C. El inóculo empleado fue estiércol de ganado bovino proveniente de una finca situada en la región de Urabá, Antioquia. Se empleó el 30% del volumen útil del reactor como inóculo. Se utilizó una tasa de carga orgánica de 1 g SV/L·d. Para el monitoreo del reactor, se analizaron muestras periódicas del efluente para determinar el contenido de sólidos totales y volátiles, pH, alcalinidad y AGV. El biogás producido por el sistema se almacenó en una bolsa, se midió periódicamente su volumen y se analizó su composición de metano utilizando el equipo MRU Optima7.

3. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La Figura 1, muestra el comportamiento de los PBM durante 21 días de operación. La CVC registró el menor rendimiento, con un acumulado de 114 NmL CH₄/gSV, mientras que el EMC reportó un valor de 636,4 NmLCH₄/gSV y su codigestión alcanzó un valor de 636 NmLCH₄/gSV. Según este comportamiento, se observó que la producción de metano comenzó desde el primer día en la CVC, aunque aumentó gradualmente en cantidades pequeñas. Sin embargo, a partir del cuarto o quinto día, la producción disminuyó significativamente y para el día 16 apenas aumentaba.

Por otro lado, en el EMC también se produjo metano desde el primer día, pero la producción aumentó rápidamente, alcanzando valores altos hasta aproximadamente el día 12, donde se estabilizó. En cuanto a la codigestión de

ambos residuos, se observaron aumentos significativos hasta el día 7 y luego la producción se mantuvo constante. En comparación, la digestión con CVC se estableció más rápidamente, seguida de la codigestión, aunque el EMC tuvo el mayor rendimiento en la producción de metano a lo largo del estudio.

En la codigestión, los rendimientos fueron inferiores a los del EMC, pero superiores a los de CVC. Sin embargo, se observó una tendencia comparable a la biodigestión cuando se utiliza CVC, lo que sugiere que la presencia de CVC en la codigestión puede disminuir la producción específica de metano. Esto podría atribuirse a la constitución del material, ya que la presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina, como es el caso del CVC, son difíciles de degradar por los microorganismos.

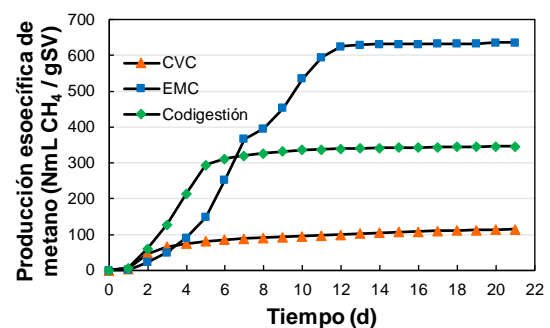


Figura 1. Producción específica de metano en el ensayo de PBM de la CVC, el EMC y su codigestión. **Fuente:** Autores.

El comportamiento de AGV del montaje alimentado con EMC en el potencial se muestra en la Figura 2. De acuerdo con esto, se detectó la presencia de 5 ácidos volátiles, los cuales mostraron una disminución en su concentración a lo largo del tiempo. El ácido láctico y el ácido isobutírico se consumieron hacia el día 5,

mientras que el ácido acético, el ácido butírico y el ácido propiónico disminuyeron hasta alcanzar valores muy bajos en días posteriores. El ácido acético estuvo presente durante todo el experimento, el cual comenzó a presentar valores bajos a partir del día 7. El ácido acético se detectó desde un principio con una concentración aproximada de 5 g/L. Se detectó ácido láctico a una concentración cercana a 3.2 g/L, mientras que la concentración del resto de ácidos detectados fue bajas.

La evolución de los AGV coincide con el rendimiento de metano, que mostró una producción rápida durante los primeros 12 días y luego se estabilizó, posiblemente debido a la abundancia inicial de acetato. Estos resultados sugieren que el EMC es un sustrato eficaz para la producción de biogás, debido al contenido significativo de carbohidratos simples. En comparación, la medición de AGV del PBM alimentado con CVC (Tabla 2) mostró únicamente la presencia de ácido acético como AGV. Esto podría explicarse por la degradación más lenta de la hemicelulosa en comparación con la celulosa, el componente principal de la cáscara de CVC.

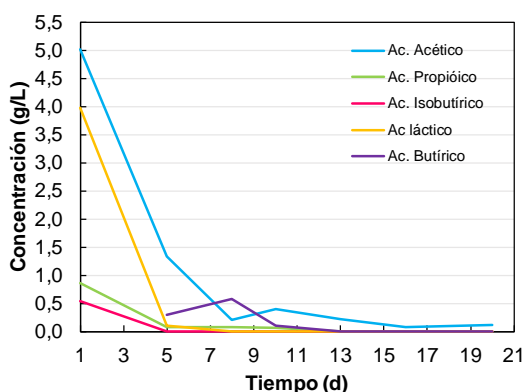


Figura 2. Evolución de ácidos grasos volátiles (AGV) del EMC en el ensayo de PBM. **Fuente:** Autores.

Tabla 2. Concentración de ácido acético para la CVC en el ensayo de PBM.

Tiempo (d)	Ácido acético (g/L)
1	0.163
8	0.047
10	0.103
13	0.100
16	0.021
20	0.248

Fuente: Autores.

La Figura 3a, muestra el rendimiento diario de la producción de biogás utilizando CVC como sustrato durante un período de 72 días, con una alimentación de 1 gSV/L·d. Se observa que en los primeros 15 días no hubo producción de biogás, pero después se mantiene estable, alcanzando un rendimiento promedio de biogás de 295 mL/gSV·d. Por otro lado, la Figura 3b muestra la producción de biogás para EMC, donde se comenzó con una tasa de carga orgánica de 1 gSV/L·d, pero debido a problemas de estabilidad de pH, se redujo a 0,1 gSV/L·d a los 6 días y se mantuvo así durante todo el período de evaluación. A pesar del retardo se obtuvo una producción de biogás de alrededor 462 mL/gSV·d. No obstante, se observaron problemas de presurización en el sistema en ciertos momentos del proceso, lo que resultó en una pérdida significativa de gas generado que no fue capturado en la bolsa de almacenamiento. La composición promedio de biogás para el reactor alimento con CVC fue de 55,97% de CH₄, 28,08 % de CO₂ y 114 ppm de H₂S; y para el reactor alimentado con EMC fue de 51,12% de CH₄, 15,14 % de CO₂ y 4 ppm de H₂S.

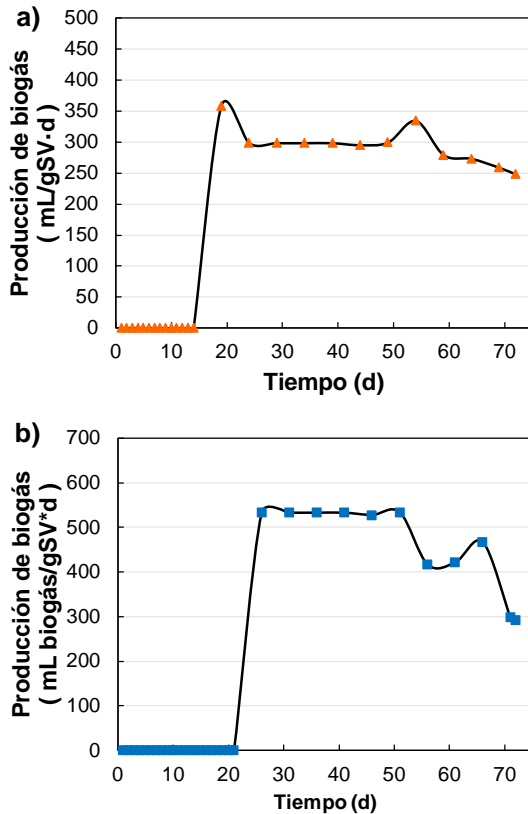


Figura 3. Producción de biogás específica durante el proceso de DA de CVC (a) y EMC (b). **Fuente:** Autores.

La Figura 4 presenta el monitoreo del pH durante proceso. En ambos montajes, el pH inicialmente disminuyó hasta 5,5, indicando un entorno ácido poco favorable en la obtención de biogás. Después de 15 días, tras la adición de bicarbonato, el pH comenzó a aumentar y se estabilizó cerca al día 25. El montaje alimentado con CVC alcanzó un pH de aproximadamente 7,4 y el EMC se estabilizó en torno a 6,9. Por otro lado, la Figura 5 muestra el monitoreo de AGV totales y la relación entre el contenido de ácidos grasos volátiles y la alcalinidad en ambos residuos. En los primeros 8 días, los AGV en la CVC alcanzaron concentraciones de aproximadamente 4000 mg/L de AGV, que luego disminuyeron significativamente alrededor del día 24, estabilizándose en

aproximadamente 1400 mg/L. En el montaje alimentado con EMC, los AGV aumentaron después de 15 días y luego disminuyeron constantemente hasta alcanzar aproximadamente 600 mg/L de ácidos volátiles. Ambos sistemas de digestión anaerobia presentaron comportamientos similares en cuanto a los AGV, con valores iniciales altos que luego se normalizaron, en el montaje con EMC se registraron valores más bajos de AGV hacia el final del proceso.

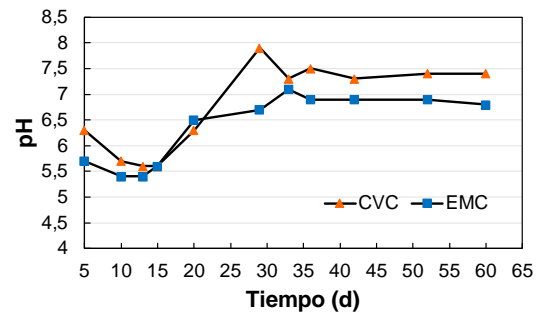


Figura 4. Seguimiento del pH durante el proceso de DA de CVC y EMC. **Fuente:** Autores.

La alcalinidad en el sistema con CVC inicialmente disminuyó, pero luego tuvo un aumento reportando valores de 2600 mg/L de CaCO_3 , en contraste con la disminución gradual de los AGV a lo largo del tiempo. En el montaje alimentado con EMC, se observaron cambios en la alcalinidad a lo largo del proceso, y esta variación también estuvo relacionada con una disminución constante de los AGV. Los análisis de SV del efluente en el reactor alimentado con CVC se mantuvieron en el rango del 2% al 3% durante la mayor parte del proceso, mientras que para el EMC fue alrededor del 4%.

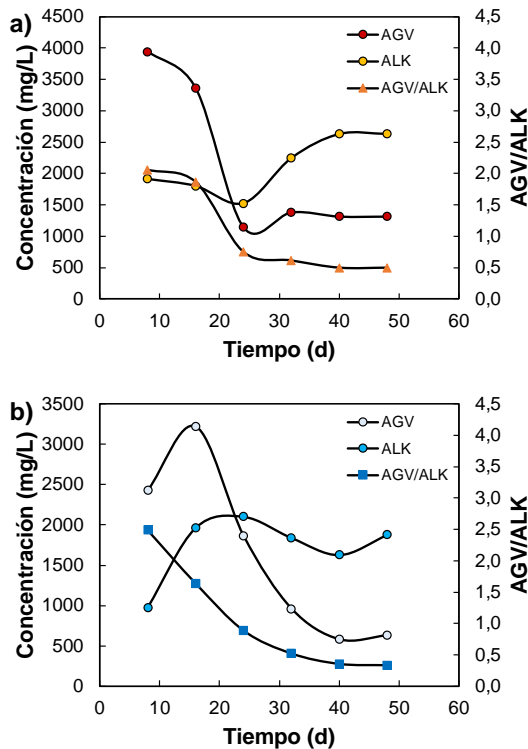


Figura 5. Evolución de AGV totales y la relación AGV/ALK durante el proceso de DA de CVC (a) y EMC (b).

Fuente: Autores.

Es importante señalar que la producción de biogás en ambos montajes experimentó un retraso de hasta 15 días antes de iniciar; esto podría atribuirse a la baja adaptación inicial de las arqueas metanogénicas a las condiciones del medio como el pH o la temperatura. Es probable que los bajos valores de pH al inicio de la DA contribuido a este retraso en ambos residuos. Además, en el sistema semicontinuo con CVC, se observó una leve reducción en la producción específica de biogás hacia el final del proceso, posiblemente debido a las variaciones estacionales en la composición del residuo debido a que se recolectó en distintas temporadas durante la evaluación, lo cual pudo ser influenciado por la celulosa de la CVC.

4. CONCLUSIONES

Este estudio evaluó la viabilidad de utilizar residuos del proceso de obtención de cacao, específicamente la cáscara de cacao (CVC) y el exudado de mucílago de cacao (EMC), para la producción de biogás mediante digestión anaerobia. Los resultados indican que el EMC posee un potencial significativo para la producción de metano, con una producción específica de 636 Nml CH₄/gSV, en comparación con la CVC, que presentó una producción más baja. La codigestión de ambos residuos mostró una mejora en el rendimiento en comparación con la CVC sola, aunque no superó al EMC individualmente. Estos hallazgos sugieren que la valorización de residuos de cacao a través de la digestión anaerobia podría ser una estrategia viable para mitigar los problemas ambientales asociados con la descomposición de estos residuos, al tiempo que se produce biogás como recurso renovable. No obstante, el estudio también reveló limitaciones, como el retraso en la producción de biogás, la necesidad de ajustar el pH y la tasa de carga orgánica para optimizar el proceso.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CODI de la Universidad de Antioquia por la financiación de este estudio a través del proyecto 2021-43115.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23th edition. American Public Health Association, Washington, D.C.
- Calby, A. & Schildhauer, T. (2020). Direct Methanation of Biogas—Technical

- Challenges and Recent Progress. *Frontiers in Energy Research*. 8, 570887. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.570887>
- Cámara de Comercio del Magdalena Medio y Nordeste Antioqueño. (2018). Concepto económico. Sector cacao. Recuperado de: <https://ccmna.org.co/wp-content/uploads/2020/08/7.1.2-CONCEPTO-ECONOMICO-2018.pdf>
- Mariatti, F., Gunjević V., Boffa, L. & Cravotto, G. (2021). Process intensification technologies for the recovery of valuable compounds from cocoa by-products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 68, 102601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102601>
- MADR, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Cadena de cacao. Recuperado de: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Cacao/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Porto de Souza, L., Valladares, K., Bittencourt, G., Murawski, A., Sarmiento, Z., Zwiercheczewski de Oliveira, P., Vinicius de Melo, G. & Soccol, C. (2022). Added-value biomolecules' production from cocoa pod husks: A review. *Bioresource Technology*. 344 (B), 126252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126252>
- Tabarez, K. (2023). Evaluación de extracción de pectinas y producción de biogás a partir de los residuos generados en la obtención de cacao de la asociación ACEFUVER (Tesis de pregrado). Universidad de Antioquia, Carepa, Antioquia, Colombia. Disponible en: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/35801>
- Uddin, M., Rahman, M., Taweekun, J., Techato, K., Mofijur, M. & Rasul, M. (2019). Enhancement of biogas generation in up-flow sludge blanket (UASB) biorreactor from palm oil mill effluent (POME). *Energy Procedia*. 160, 670-676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.220>
- Unidad de Gestión de Riesgos Agropecuarios. (2020). Ficha de inteligencia: Cacao. Finagro. Recuperado de: https://www.finagro.com.co/sites/default/files/ficha_de_inteligencia_-_cacao.pdf
- Valladares, K., Porto de Souza, L., & Soccol, C. (2022). A biorefinery approach for pectin extraction and second-generation bioethanol production from cocoa pod husk. *Bioresource Technology*. 346, 126635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126635>
- Vriesmann, L., Dias de Mello, R., & Petkowicz, C. (2011). Cacao pod husks (*Theobroma cacao* L.): Composition and hot-water-soluble pectins. *Industrial Crops and Products*. 34 (1), 1173-1181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.04.004>