

Potencial de producción de biometano y biohidrógeno a partir de residuos agrícolas: mucílago de café y cacao y estiércol de cerdo

RESUMEN

En este trabajo se determinaron las mezclas de sustratos con las mejores producciones para biometano y biohidrogeno a través de un diseño experimental box Behnken, utilizando estiércol de cerdo, mucílago de café y cacao. Posteriormente, se determinaron las condiciones de volumen de cada mezcla variando la concentración del sustrato CS, la relación mucílago de cacao M:C y la relación C/N (Carbono/Nitrógeno). Los montajes se llevaron a cabo en un baño termostático con un controlador de temperatura y una resistencia para mantener la temperatura del proceso a 35°C. Se realizaron 15 ensayos por triplicado para cada uno de los procesos de digestión, con respecto a la mayor producción obtenida en el diseño experimental se presentó un volumen de 1109,7 ml de CH₄ para la M3 (CS:8, M:C:3 y C/N:35) en el proceso de digestión anaerobia, y una producción de 418 mL de H₂ para la M10 (CS:8, M:C:2 y C/N:25) en el proceso de fermentación oscura. Estos resultados permiten establecer las condiciones de mezcla para el proceso y obtener una producción favorable permitiendo que los procesos de biorefinería sea lo más eficiente posible.

Palabras clave: Bio-hidrógeno, Bio-metano, Fermentación oscura, Digestión anaerobia, biorefinería, estiércol de cerdo, mucílago de café, mucílago de cacao.

ABSTRACT

In this work the mixtures of substrates with the best productions for biomethane and biohydrogen were determined through an experimental Behnken box design, using pig manure, coffee mucilage and cocoa. Subsequently, the volume conditions of each mixture were determined by varying the CS substrate concentration, the M: C cocoa mucilage ratio and the C / N (Carbon / Nitrogen) ratio. The assemblies were carried out in a thermostatted bath with a temperature controller and a resistance to maintain the temperature of the process at 35 ° C. 15 trials were carried out in triplicate for each of the digestion processes, with respect to the highest production obtained in the experimental design, a volume of 1109,7 mL of CH₄ was presented for M3 (CS: 8, M:C: 3 and C/N: 35) in the anaerobic digestion process and a production of 418 mL of H₂ for mixture M10 (CS: 8, M:C: 2 and C/N: 25) in the dark fermentation process. These results allow to establish the mixing conditions for the process and obtain a favorable production allowing the biorefinery processes to be as efficient as possible.

Keywords: Bio-hydrogen, Bio-methane, Dark fermentation, Anaerobic digestion, biorefinery, pig manure, coffee mucilage, cocoa mucilage.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el petróleo y los combustibles fósiles tienen una representación significativa en el desarrollo industrial abarcando el 80% de la demanda energética global (Jung et al. 2011). El uso habitual de las energías convencionales y la falta de sostenibilidad en los modelos de energía, han obligado a crear propuestas sostenibles diferentes a las convencionales, uno de los nuevos modelos de producción es la economía del hidrógeno (Brey et al. 2006). Para el uso de este tipo de tecnologías deben considerarse cuatro medidas: la disponibilidad de energía primaria, los costos de producción del hidrógeno, la reducción de emisiones de dióxido de carbono y las implicaciones del uso de la tierra (Ewan and Allen 2005). El principal problema con el uso de estas energías es la disponibilidad de recursos para producirlas. Este problema puede disminuir al emplear biomasa de bajo costo, en cantidades suficientes y que no compita con los alimentos por la tierra de cultivo (Saxena, Adhikari, & Goyal, 2009). Esta biomasa la encontramos en los residuos orgánicos municipales y los residuos agrícolas. Emplear este tipo de residuos permite reducir los volúmenes de desecho (Escamilla Alvarado, Poggi Varaldo, & Ponce Noyola, 2007). Aunque las energías provenientes de la biomasa no reducen las cantidades de CO₂ si lo producen de forma biogénica, el CO₂ biogénico se obtiene de las actividades realizadas con biomasa, estas emisiones generalmente se tratan como neutrales con respecto al cambio climático, sin embargo, muchos investigadores consideran que este compuesto puede tener beneficios para el cambio climático (Liu et al. 2018).

Dos métodos convencionales para la producción de bio-metano y bio-hidrógeno, son la digestión anaeróbica y la fermentación oscura respectivamente (De Gioannis et al. 2017). La digestión anaerobia es un proceso que convierte los sustratos orgánicos en biogás en ausencia de oxígeno. En la naturaleza los sustratos orgánicos complejos necesitan pasar por varios procesos para lograr la producción de biogás, (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis), los microorganismos metanogénicos, por otra parte, pueden crecer a bajos potenciales redox, produciendo biogás. Uno de los principales productos, que resulta ser una mezcla entre metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) por medio de la degradación de ácidos grasos volátiles (AGV) (Q. Zhang, Hu, and Lee 2016). Por otro lado, la fermentación oscura, es una de las más prometedoras, debido a que su tasa de producción de biohidrógeno es más alta que la de la foto fermentación y la bio-fotólisis, pese a no ser una de las primeras opciones al momento de escoger una energía renovable que reduzca las cantidades de CO₂, ayuda en la disminución del volumen de desechos, el proceso de digestión anaerobia estabiliza los desechos producidos por alimentación y es el mejor en recuperar y convertir la energía en biogás. Este proceso básicamente transforma los residuos en biohidrogeno cuando se realiza el proceso de fermentación oscura y metano cuando se hace el ciclo completo de la digestión anaerobia, dando un tratamiento a los residuos más viable económicamente (Wang and Zhao 2009).

En esta investigación se emplearon tres tipos de sustratos, mucílago de café, estiércol de cerdo y mucílago de cacao, los cuales han demostrado tener una buena tasa de producción (M. Andrés, Rodríguez, and Andres 2014), en el caso del cacao este permite maximizar la

producción de metano en co-digestión anaerobia siendo esto una ventana de oportunidades para países como Colombia (Ivan et al. 2016).

Con el propósito de buscar los sustratos y mezclas con el mayor potencial de producción y así contribuir al estudio de biorefinerías, el objetivo de la presente investigación fue la determinación del potencial de producción de biometano y biohidrogeno a partir de residuos agrícolas como mucílago de café y cacao y estiércol de cerdo mediante un diseño experimental Box-Behnken.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Recolección y almacenamiento de los sustratos

Se realizó la recolección de cada sustrato, el estiércol de cerdo se recogió en el centro agropecuario marengo de la Universidad Nacional ubicado en Mosquera Cundinamarca, se refrigeró y almacenó a -4°C . El cacao fue suministrado por una persona natural desde la ciudad de Bucaramanga, posteriormente en el laboratorio se realiza un despulpado manual para poder extraer el mucílago y posterior conservarlo. Por último, el mucílago de café se consiguió en una finca cafetera ubicada en Anolaima Cundinamarca, el mucílago se almacenó en bolsas ziplock de aproximadamente 1 L refrigeradas a -4°C .

Los residuos en su mayoría están en estado líquido, por este motivo se realizaron soluciones para trabajar en volúmenes y así homogeneizar de una forma más sencilla los residuos.

CARACTERÍSTICAS DE LAS SOLUCIONES DE LOS SUSTRATOS

Mucilago de café	Esta solución esta dada por 19,5 mL de mucilago de café en 100 mL de agua destilada.
Estiércol	Esta solución esta dada por 47,27 gr de estiercol en 250 mL de agua destilada.
Mucilago de cacao	Esta solución es dada por partes iguales en este caso son 12,05 gr de cacao en 12,05 mL de agua destilada.

Tabla 1 Características de las soluciones de los sustratos

Como se muestra en la anterior tabla se describe como es la preparación de las soluciones de cada sustrato a emplear en el diseño experimental.

2.2. Diseño experimental

Se realizó una matriz experimental estableciendo 15 ensayos (Tabla 2) donde cada uno contiene diferentes volúmenes de los sustratos, esto se determinó variando la concentración del sustrato CS, la relación mucílago de cacao M:C y la relación C/N basado en un diseño experimental Box-Benhken.

Este diseño Box-Benhken le permite realizar al diseño hacer una cuantificación adecuada a una respuesta con base a un número razonable de pruebas, para realizar de manera correcta el diseño, son necesarios 3 niveles por factor. Por lo general este tipo de diseños tienen menos puntos de diseño que un diseño central compuesto, que permite ajustarse a un modelo cuadrático completo (Cabeza, López, Ruiz-Montoya, & Díaz, 2013).

Mezcla	RS M:C	C.S	C/N
1	3	2	35
2	1	2	35
3	3	8	35
4	1	8	35
5	3	4	25
6	1	4	25
7	3	4	45
8	1	4	45
9	2	2	25
10	2	8	25
11	2	2	45
12	2	8	45
13	2	4	35
14	2	4	35
15	2	4	35

Tabla 2 Matriz experimental.

Con respecto a las tres variables mencionadas anteriormente, se calcula la carga orgánica a agregar de cada uno de los sustratos, para cumplir con la condición establecida inicialmente. Partiendo de ello se determina el volumen de cada sustrato, del inóculo, buffer y agua destilada, para completar un volumen total de 200 ml.

Para los procesos de fermentación oscura y digestión anaerobia, se hicieron montajes de desplazamiento utilizando botellas ámbar de un litro, con agua e hidróxido de sodio al 0,5N. El hidróxido tiene como finalidad retener el CO₂ que se produce, logrando que el hidrógeno que se produce en el proceso de fermentación oscura y el metano que se produce de la digestión anaerobia. Estas botellas de desplazamiento se conectan a los biorreactores por medio de un equipo de mangueras de microgoteo que permiten el desplazamiento de hidróxido hacia las botellas receptoras para medir el volumen desplazado.

Los biorreactores se realizaron en botellas ámbar de 250 ml a un volumen de trabajo de 200 ml. Posteriormente los reactores se colocaron en un baño termostatzado con un controlador

de temperatura y una resistencia para mantener la temperatura del proceso a 35°C así mantener las condiciones ideales del proceso. El montaje se muestra en la Ilustración 1.

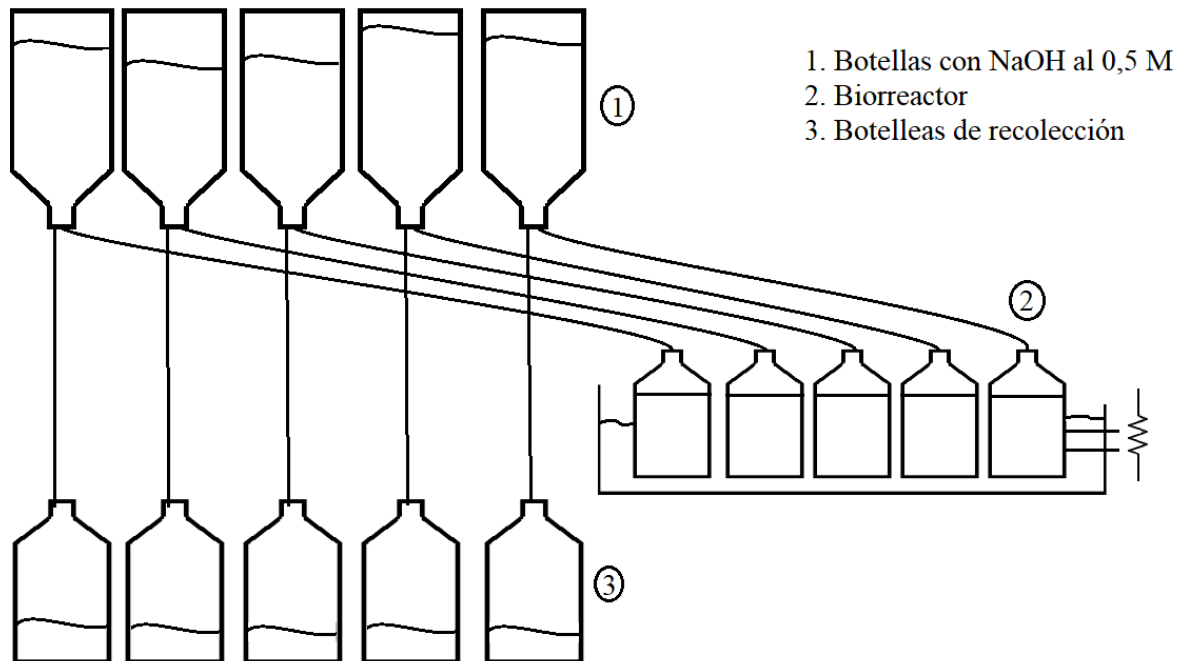


Ilustración 1. Montaje para fermentación oscura y digestión anaerobia.

Se realizó inicialmente un análisis fisicoquímico a los sustratos a emplear para la determinación de demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales y sólidos volátiles (ST) y (SV). se midieron de acuerdo con los métodos estándar (APHA, 2005). De acuerdo a los protocolos estándar para los análisis de los parámetros a evaluar, se realizó por triplicado a cada muestra (Dario n.d.).

2.3.Preparación de inóculo

El inóculo utilizado en los experimentos se obtuvo de la planta de aguas residuales de Alpina S.A. en Sopó, Cundinamarca (Colombia). En la digestión anaerobia se utilizó directamente. Mientras que para la fermentación oscura se llevó a cabo un choque térmico que consistió en llevar a ebullición el inóculo durante 30 minutos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Características de los sustratos

Se realizó a los sustratos inicialmente análisis de demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y CHONS. Tabla 3

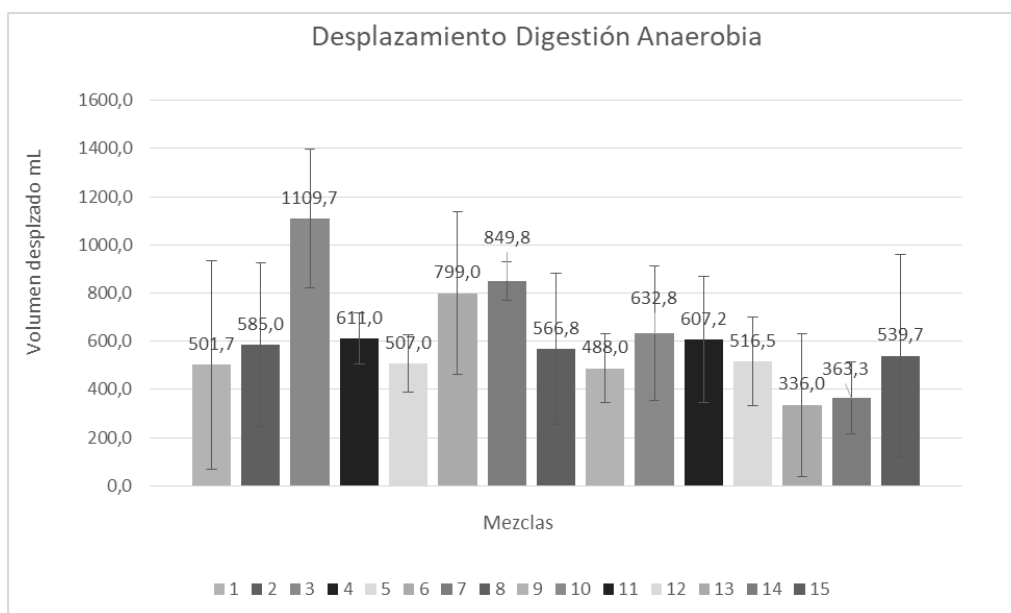
	X								
	C	H	O	N	S	C/N	ST(%)	SV (%)	DQO (mg/L)
Mucílago	38.88%	6.30%	50.28%	0.72%	0.05%	54.0	93.83	5.96	261.15
Cacao	40.22%	6.35%	49.35%	0.72%	0.05%	55.9	90.00	10.18	674.18
Estiércol	37.24%	5.06%	34.89%	4.08%	0.28%	9.1	97.67	1.92	298
Inóculo	24.90%	2.44%	18.98%	8.86%	0.48%	2.8	-	-	-

Tabla 3 Análisis CHONS y caracterización de los sustratos

El análisis elemental CHONS, para evaluar la relación C / N, se desarrolló a través de una metodología donde se utiliza relaciones estequiométricas y composición química respaldada en los análisis de carbono, nitrógeno y azufre desarrollados por CalderonLabs®

3.2 Análisis del proceso digestión anaerobia

El análisis para desplazamiento de las 15 mezclas establecidas se muestra en la gráfica 1. Cada parámetro analizado tuvo una incidencia directa en la producción de cada una de las muestras, específicamente de las M3 que dio la mayor producción con un valor de 1109 ml de CH₄, la M13 que dio la menor producción con un valor de 336 ml de CH₄ y la M11 que obtuvo una producción intermedia entre las demás muestras con un valor de 607,2 ml de CH₄.



Gráfica 1 Desplazamiento total en digestión anaerobia

Una vez listos los resultados es posible evidenciar que las mezclas que contienen mayores cantidades de cada sustrato, fueron a la vez los valores más altos e intermedios de producción. Los valores más bajos de Digestión anaerobia se obtuvieron con las mezclas que tenían unas concentraciones altas de estiércol, pero bajas en mucílago y cacao. Se muestran en la Tabla 4 los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros de las mezclas que arrojaron los volúmenes relevantes para el proceso de digestión anaerobia.

MEZCLA	DQO mg/L	Alca. mgCaCO ₃ / L	AGVs mgDQO/L	Nitro. Amoniacal	Fósforo
3A	1401,8	6520	992	100,16	120
13M	2391,6	5473,3	376	30,33	163,3
11B	295,83	1320	272	58,16	296,6

Tabla 4. Mezcla de A: Alto, M: Promedio y B: Bajo en producción con su correspondiente caracterización, para Digestión anaerobia.

Las muestras se dividieron de la siguiente manera: A: la muestra de valor alto en la relación de datos, M: La muestra de valor intermedio en la relación de datos y B: La muestra de valor bajo en la relación de datos, el número indica la mezcla utilizada.

Para el desarrollo de la matriz experimental se tomó en cuenta la relación C/N donde fue calculada para cada sustrato, tomando su DQO y el valor de NTK, para la M3 se empleó una relación de 35 mg/l, para la M13 un valor de 35 mg/l y la mezcla M11 un valor de 45 mg/l. Según la literatura los valores óptimos de C/N están entre 25 y 30, pero algunos estudios recientes indican una producción favorable en un rango entre 15 y 20 (C. Zhang et al. 2014) lo que determina una buena eficiencia en la producción del gas, a bajas cantidades de nitrógeno, en algunos trabajos se encontró que por encima de ciertos niveles de nitrógeno 3 mg/L aunque en diferentes casos se encontraron algunas concentraciones tolerantes a cantidades entre 4 y 9 kg/m³, en cualquiera de los dos casos se puede observar una inhibición en el proceso de digestión (Lorenzo Acosta and Obaya Abreu 2005). Por otro lado, se alcanzaron valores altos de DQO lo que determina una cantidad alta de materia orgánica indicando que se va a producir una cantidad considerable de carbono (Grado n.d.)

Pero podemos observar que a una relación C/N de 46 se obtuvo mayor producción que con una de 59, esto debido a que se tiene una carga orgánica mayor que le permite tener mayor producción.

El siguiente parámetro son los valores de AGV, este parámetro determina cuanta cantidad de materia prima fue degradada para el proceso de digestión anaerobia o fermentación oscura (De La Merced 2012).

En este orden de ideas es necesario que los valores de AGV sean bajos para garantizar una conversión completa en biogás. En este caso se tienen datos que van desde 272 mg DQO/mL hasta 992 mg DQO/mL estos datos nos indicarían una desestabilización en el proceso y por ende una disminución en la producción de biogás esta condición se produce cuando las formas no ionizadas de AGV inhiben a los procesos de las bacterias

metanogénicas, esto sucede básicamente cuando las concentraciones son superiores a 60 mg/L (FAO 2011).

Uno de los parámetros que afectan el desarrollo biológico de los microorganismos inhibiendo el crecimiento y la producción es el nitrógeno amoniacal, en condiciones óptimas el contenido de nitrógeno amoniacal debe tener una cantidad mínima de 50 mg/L aunque puede ser beneficioso para este proyecto entre los 50 y los 100 mg/L en este caso tenemos valores entre los 30 mg/L y los 100 mg/L lo que para este tipo de procesos no tendrán ningún tipo de efectos adversos, pero tampoco positivos sobre el proceso, cuando las cantidades están entre los 200 y 300 mg/L no hay procesos negativos para el proceso, entre los 1500 y 3000 se comienzan a considerar efectos inhibitorios en los microorganismos a pH muy alcalinos, y cuando los valores superan los 3000 mg/L se considera una sustancia de toxicidad alta (Grado n.d.)

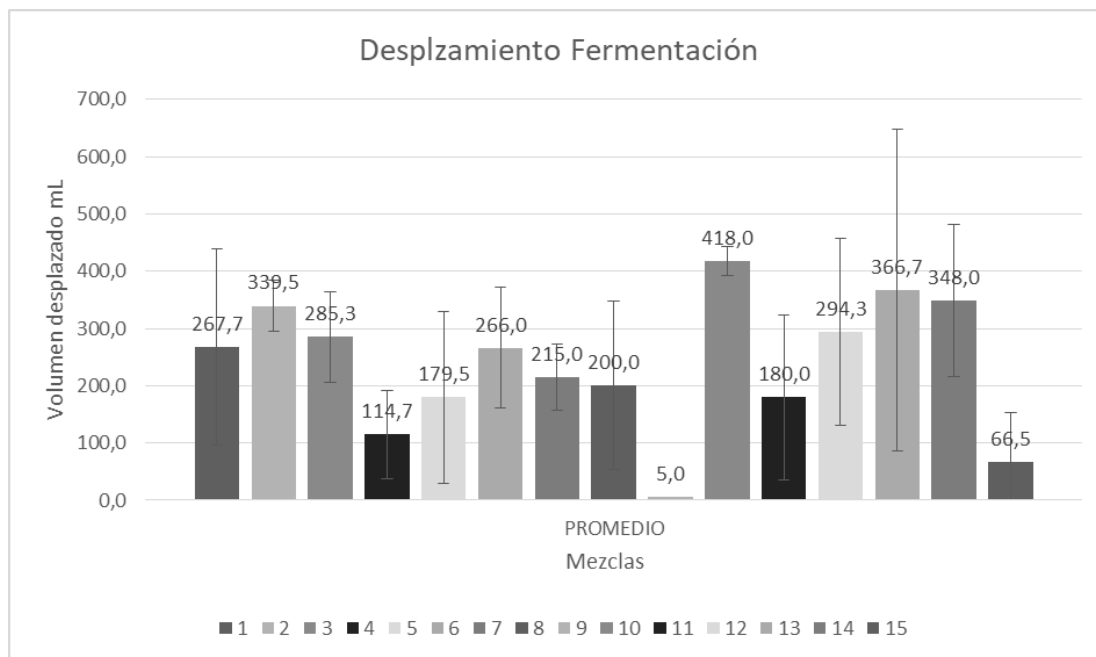
Por último tenemos el valor de fósforo, el fósforo es un elemento químico que en conjunto con el nitrógeno pueden ser recuperados del proceso por medio de precipitación de estruvita, la estruvita es un valor agregado del proceso de las biorefinerías y se obtiene después de un proceso de cristalización, este proceso utiliza todo el fósforo producido en el proceso que para el caso de este proyecto se obtuvieron valores entre 120 mg/L y 296 mg/L que serían aprovechados en procesos alternos de la biorefinería (Hidalgo Barrio n.d.).

Producción en fermentación

Los procesos de Fermentación funcionan en condiciones similares a los procesos que se realizan en la digestión anaerobia, de hecho, la fermentación es un proceso intermedio de la digestión anaerobia, por lo que se hacía necesario realizar un monitoreo constante del mismo, si los ensayos no se dejaba el tiempo suficiente, no llegaban a la fermentación, pero si se dejaban, aunque fuera por poco, pasar del tiempo de retención necesario para realizar la fermentación el proceso podría convertirse en digestión anaerobia (FAO 2011).

Esta respuesta está asociada al rol fundamental de estas bacterias en la regulación de las concentraciones de hidrógeno en el sistema. El resultado sería el consumo de los ácidos grasos volátiles e hidrógeno, reduciendo la concentración de hidrógeno en el biogás. Por el contrario, se tendría la generación de metano, producto no deseado bajo esta condición.

Al igual que la digestión anaerobia el proceso de producción para las 15 mezclas en fermentación oscura se presenta en la gráfica 2.



Gráfica 2 Desplazamiento total en fermentación oscura

En este caso la mayor producción se dio en la M10 con un valor de producción total de biohidrógeno de 418 ml de H₂, para la producción de hidrógeno se analizaron principalmente datos como el pH, los azúcares y la relación C/N, que son los que afectan directamente al proceso.

MEZCLA	DQO mg/L	Alca. mgCaCO ₃ / L	AGVs mgDQO/L	Nitro. Amoniacal	Fósforo	ART (mg/L)
10A	2143,3	4866,6	1896	332,25	119,16	0,557
7M	1400	2180	2088	119,5	54,16	0,239
9B	645	2126,6	1512	102,5	48,3	0,261

Tabla 5. Mezcla de A: Alto, M: Promedio y B: Bajo en producción con su correspondiente caracterización, para Digestión anaerobia.

Los datos que se obtuvieron en fermentación oscura para DQO y nitrógeno reportan valores de C/N de entre 21 a 101, en el caso de la fermentación oscura se han encontrado estudios que muestran una buena producción a valores de C/N de entre 20 a 200 mientras los de C/P oscilan entre 50 y 440 los estudios demuestran que la producción de hidrógeno aumentó a una alta C/P si se aumentaba la C/N (Argun et al. 2008).

Para la fermentación se obtuvieron valores de pH inicial de 5 y finales de entre 1 y 9, para la literatura se indican valores óptimos para la fermentación de entre 5 y 6 para una producción eficiente de biohidrogeno (Agrowaste 2004), en el caso de este proyecto el pH se mantuvo en niveles estándar, logrando una producción estable de biohidrogeno especialmente en las M10 y la M13, Por otro lado, para la M15 y la M9 se obtuvieron los

valores de pH más altos, esta condición indica un crecimiento de bacterias metanógenas que son las causantes del consumo de H₂ (Francisco and Salinas 2012).

CONCLUSIONES

Los ensayos que se realizaron para cada sustrato y cada una de sus mezclas da a entender que los procesos de producción de biogás a partir de desechos comunes en Colombia es posible y trae diversas ventajas, una de esas ventajas se vio en los reactores en que se realizó digestión anaerobia presentaron una producción volátil menos fuerte que los reactores en los que se realizaba la fermentación, lo que demuestra que el proceso reduce olores, ayudando a un problema ambiental que afecta directamente la calidad de vida, otra característica importante del proceso es la sedimentación de toda la materia orgánica lo que nos da una utilidad extra. El proceso logra una separación natural que puede ser de ayuda en este tipo de procesos en temas de contaminación de aguas, otros dos agregados del proceso que tienen una finalidad de carácter ambiental, la primera es la estruvita, un compuesto adicional que se obtiene en el proceso de la digestión anaerobia y que aprovecha compuestos como el fósforo y el nitrógeno para ser utilizados después de una correcta cristalización como abono en proyectos de agronomía.

Para este proyecto se obtuvieron valores considerablemente altos de fósforo de cada una de las mezclas en cada uno de los ensayos, aunque sintetizar las estruvitas no es un proceso sencillo, la cantidad producida es considerable y para un proyecto de escala puede ser una solución significativa para la agronomía del país, la segunda, lo que indica que el proceso de digestión y de fermentación tiene la capacidad de convertir la mayoría de sustrato en combustible sin producir ningún tipo de contaminación.

El proceso nos demostró que para la digestión anaerobia la mezcla con mayor potencial de producción de metano fue la M3 que contenía las siguientes características (CS:8, M:C:3 y C/N:35), del mismo modo sucedió con la fermentación donde se obtuvieron los mejores resultados con la M10 que contenían las siguientes características (CS:8, M:C:2 y C/N:25), lo que indica que las mejores condiciones se dan cuando los sustratos están en cantidades similares. Por otro lado, las mezclas que contenían estiércol en cantidades altas fueron las más difíciles de estabilizar debido al efecto tampón que tiene el estiércol que limitaba las condiciones óptimas de pH.

Los resultados de este proyecto sugieren la capacidad de las mezclas para la producción de metano en lugar de hidrógeno.

En términos de nutriente la digestión anaerobia tiene la capacidad de liberar mayor concentraciones de fósforo y en términos de nutrientes la fermentación tiene la capacidad de liberar mayor concentración de nitrógeno amoniacal.

El proceso de fermentación oscura presentación concentraciones de AGVs más altas con relación a la digestión anaerobia.

No se presentó inhibición en ninguno de los procesos de producción evidenciado por las concentraciones de nitrógeno amoniacal.

REFERENCIAS

- Agrowaste. 2004. "Fermentación Oscura." *Agro Waste*: 1–4.
<http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/FERMENTACION-OSCURA.pdf>.
- Andrés, Mario, Manuel Rodríguez, and Yves Andres. 2014. "Bioresource Technology Use of Coffee Mucilage as a New Substrate for Hydrogen Production in Anaerobic Co-Digestion with Swine Manure." 168: 112–18.
- Andrés, Sergio, Blanco Londoño, and Tatiana Rodriguez Chaparro. 2012. "Producción de Biohidrógeno a Partir de Residuos Mediante Fermentación Oscur...: Libros, Revistas y Mas." 20: 398–411.
<http://eds.b.ebscohost.com.ezproxy.unal.edu.co/eds/pdfviewer/pdfviewer?sid=6c19affe-f435-4d79-bfe8-99a5c7a19f6a@sessionmgr115&vid=1&hid=114>.
- APA. 2005 "Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales, 21ª ed. Asociación Americana de Salud Pública / Asociación Americana de Obras Hídricas / Federación de Medio Ambiente del Agua, Washington DC"
- Argun, Hidayet, Fikret Kargi, İlgi K Kapdan, and Rukiye Oztekin. 2008. "Biohydrogen Production by Dark Fermentation of Wheat Powder Solution : Effects of C / N and C / P Ratio on Hydrogen Yield and Formation Rate." 33: 1813–19.
- Brey, J. J. et al. 2006. "Designing a Gradual Transition to a Hydrogen Economy in Spain." *Journal of Power Sources* 159(2): 1231–40.
- Cabeza, I. O., López, R., Ruiz-Montoya, M., & Díaz, M. J. (2013). Maximising municipal solid waste - Legume trimming residue mixture degradation in composting by control parameters optimization. *Journal of Environmental Management*, 128, 266–273.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.030>
- Dario, Edwin. "Produccion de Biogas Mediante La Codigestion Anaerobica de La Mezcla de Residuos Citricos y Estiercol Bovino Para Su Utilizacion Como Fuente de Energia."
- Escamilla Alvarado, C., Poggi Varaldo, H., & Ponce Noyola, M. T. (2007). Producción de hidrógeno y metano como biocombustibles bajo el esquema de biorrefinería. *Concyteg*, 6(71), 5. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.juro.2017.11.063>
- Ewan, B. C.R., and R. W.K. Allen. 2005. "A Figure of Merit Assessment of the Routes to Hydrogen." *International Journal of Hydrogen Energy* 30(8): 809–19.
- FAO. 2011. "Manual de Biogas." *Manual de Biogas Proyecto CHI/00/G32*: 1–119.
- Francisco, Juan, and Illescas Salinas. 2012. "Producción de BioH₂ Por Fermentación Oscura Apartir de Pañales Desechables Usados." (46): 52006.

- De Giannis, Giorgia et al. 2017. "Energy Recovery from One- and Two-Stage Anaerobic Digestion of Food Waste." *Waste Management* 68: 595–602.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.013>.
- Grado, Trabajo Final D E. "ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL NITRÓGENO EN UN SISTEMA CONTINUO ACOPLADO CONTACTOR DE MEMBRANA HIDROFÓBICA / REACTOR ANAEROBIO."
- Hidalgo Barrio, Dolores. "ESTRUVITA: ESE ORO BLANCO PROCEDENTE DE LOS RESIDUOS." *Gestión y tratamiento de residuos*.
- Ivan, C et al. 2016. "Anaerobic Co-Digestion of Organic Residues from Different Productive Sectors in Colombia: Biomethanation Potential Assessment." *5th International Symposium on Industrial Biotechnology (Ibic 2016)* 49: 385–90.
- Jung, Kyung Won, Dong Hoon Kim, Sang Hyoun Kim, and Hang Sik Shin. 2011. "Bioreactor Design for Continuous Dark Fermentative Hydrogen Production." *Bioresource Technology*.
- De La Merced, Diego. 2012. "EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO TIPO CONTINUO."
- Levin, David B., Lawrence Pitt, and Murray Love. 2004. "Biohydrogen Production: Prospects and Limitations to Practical Application." *International Journal of Hydrogen Energy* 29(2): 173–85.
- Liu, Weiguo, Qian Zhu, Xiaolu Zhou, and Changhui Peng. 2018. "Comparative Analyses of Different Biogenic CO₂ Emission Accounting Systems in Life Cycle Assessment." *Science of The Total Environment* 652: 1456–62.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718343857>.
- Lorenzo Acosta, Yaniris, and Ma Cristina Obaya Abreu. 2005. "La Digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos. Parte I." *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar* 39(1): 35–48.
- Saxena, R. C., Adhikari, D. K., & Goyal, H. B. (2009). Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1), 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.07.011>
- Wang, Xing, and You cai Zhao. 2009. "A Bench Scale Study of Fermentative Hydrogen and Methane Production from Food Waste in Integrated Two-Stage Process." *International Journal of Hydrogen Energy* 34(1): 245–54.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.100>.
- Zhang, Cunsheng, Haijia Su, Jan Baeyens, and Tianwei Tan. 2014. "Reviewing the Anaerobic Digestion of Food Waste for Biogas Production." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38: 383–92.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>.

Zhang, Quanguo, Jianjun Hu, and Duu Jong Lee. 2016. "Biogas from Anaerobic Digestion Processes: Research Updates." *Renewable Energy* 98: 108–19.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.029>.