

Evaluación de la obtención de energía y subproductos a partir de un esquema básico de biorefinería centrado en co-digestión anaerobia

Layla D. Santamaría^a, Damián A. Cruz^a, Iván Cabeza^a, Mario A. Hernández^b

^a Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Ambiental, INAM - USTA, Carrera 9 No. 51 - 11, Bogotá, Colombia

^b Universidad EAN, Facultad de Ingeniería, Gestión Ambiental, Carrera 11 No. 78 - 47, Bogotá, Colombia

Resumen

En Colombia se generan impactos ambientales a raíz de las diferentes actividades realizadas en el sector agropecuario. La cantidad de materia orgánica presente en los residuos plantea una afectación importante a cuerpos de agua y suelos por un manejo inadecuado. Esta biomasa, agrícola y pecuaria, posee un potencial energético que puede recuperarse en diferentes tipos: eléctrica, líquida, gaseosa o calorífica. En adición, la producción de energía bajo un proceso biológico, como la digestión anaerobia, tiene como beneficio paralelo un tratamiento de dicha biomasa residual. Además, el esquema de biorrefinería favorece la recuperación de subproductos que aportan valor agregado a la biomasa tratada y a este tipo de esquemas.

En el presente estudio se evaluó el aprovechamiento de tres residuos orgánicos procedentes del cultivo de café (mucílago de café), cultivo de cacao (mucílago de cacao) y granjas porcícolas (estiércol de cerdo). La evaluación se enfocó en la obtención de metano a través de co-digestión anaerobia y la cuantificación de subproductos en el efluente. Adicionalmente, la co-digestión favorece la sinergia de los sustratos para obtener la mayor cantidad de biogás. Por lo tanto, se trabajó con una mezcla de residuos previamente definida a través de ensayos preliminares. El estudio se desarrolló en una planta piloto con reactores en régimen semicontinuo, en donde se evaluaron tres concentraciones de sustratos (8 g/l, 16 g/l y 32 g/l). Los reactores tuvieron un seguimiento de la cantidad y composición de biogás, y parámetros fisicoquímicos como el pH, alcalinidad, ácidos grasos volátiles, potencial de óxido reducción, demanda química de oxígeno, metales, metabolitos, nitrógeno amoniacal y fósforo.

En todos los casos la base de los sustratos fue el estiércol, lo cual proporcionó un pH estable variando entre 6.3 y 7.5, debido a la capacidad buffer que este sustrato tiene. Por otro lado, la tasa máxima de producción de biogás fue de 486,6 ml CH₄/gCOD bajo la concentración de 8g/l con relación S/X de 0,5. En este caso, la composición promedio del biogás fue del 56,2% de metano, lo cual equivale a un poder calorífico del 13,782MJ/m³. En cuanto a los metabolitos se identificó de ácido acético, propiónico, láctico y furfural que suele ser utilizado a nivel industrial. Mientras que el contenido de nutrientes fue de 992 mg/l de nitrógeno y 270 mg/l de fósforo, los cuales se pueden recuperar a través de procesos como a la obtención de estruvita. Estas corrientes de aprovechamiento dan viabilidad a estos sistemas para aplicaciones rurales. De esta manera, existen alternativas para consolidar otro tipo de dinámicas productivas a partir de biomasa residual.

Introducción

El sector agropecuario ha tenido un crecimiento significativo en Colombia, en donde el 38,6% del suelo es utilizado para esta actividad económica (Mejía et al., 2019), lo ha generado un aumento de biomasa producida, este sector genera 279.333.596 T/año de biomasa residual (Villanueva &

Universidad EAFIT, 2018, Ministerio de Minas y Energía, 2010) y adicionalmente costos al agricultor ya que en muchas ocasiones no se tienen las herramientas para procesar esa biomasa, lo cual produce una disposición inadecuada de gran porcentaje de estos, contribuyendo así a la generación de impactos ambientales en efluentes de agua, suelos y gases efecto invernadero principalmente (Matthews, 2006). Esto genera un deterioro en los ecosistemas en donde se realizan estas actividades. Por otra parte el 60% de los residuos sólidos, tanto urbanos como agrícolas comprendidos en el grupo RSU, son dispuestos en vertederos o rellenos principalmente, y sólo el 35% de residuos orgánicos presentan un valor para algunos actores, donde se destaca el aprovechamiento termoquímico, capacidad nutritiva para suelos agrícolas y/o lombricultura, (Jaramillo, & Zapata, 2008).

A partir de estos residuos que no tienen una adecuada disposición se puede dar un aprovechamiento para la generación de energía renovable, tratamiento de biomasa y subproductos en diferentes departamentos, debido al alto potencial energético que estos tienen, mediante la digestión anaerobia, en donde el combustible principal de estos sistemas son la materia orgánica, y así el objetivo es lograr una descomposición de ésta por medio de reacciones bioquímicas (Corona et al., 2018, Ahlberg-Eliasson et al., 2017).

El proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo por medio de microorganismos anaerobios los cuales actúan en ausencia de oxígeno, con el fin de producir biogás principalmente el cual se compone de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y trazas de otros gases como nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3) (Kavuma, 2013). Adicionalmente, se generan subproductos que son utilizados en el sector industrial. Este tipo de procesos permite que se obtenga una economía circular y la valorización de residuos que son generados por las diferentes actividades ya que este corresponde a la materia prima para este proceso (Corona et al., 2018, Hagman et al., 2018). Por otro lado se debe tener en cuenta que el aprovechamiento de estos residuos para la generación de biogás, y la implementación de este, implicaría una disminución en la necesidad de utilizar fuentes fósiles (Mancillas-Salas et al., 2015).

El presente trabajo busca la evaluación del potencial energético que posee la mezcla de los residuos, los cuales son estiércol de cerdo, mucílago de café y, mucílago de cacao, en donde se pretende la obtención de biogás a través del proceso de codigestión anaerobia, ya que al implementar los tres sustratos en el mismo ensayo se produce sinergia en el proceso y mejora el crecimiento de los microorganismos (Corro et al., 2013), lo cual genera un aprovechamiento mayor de la materia orgánica que se encuentra en el sistema por medio de un reactor en régimen semicontinuo. Se controlan parámetros como; temperatura, Ph, alcalinidad, AGVs, ORP, etc, además, se evalúa la composición propia del biogás determinando el poder calorífico con el fin de identificar el valor energético aprovechable, en adición, los posibles subproductos con valor económico generados al final de la codigestión.

Materiales y Métodos

La metodología planteada para el cumplimiento del objetivo de este artículo se establece mediante 3 etapas; manejo del inóculo y los sustratos, adecuamiento y fase experimental y por último métodos analíticos (Figura 1).

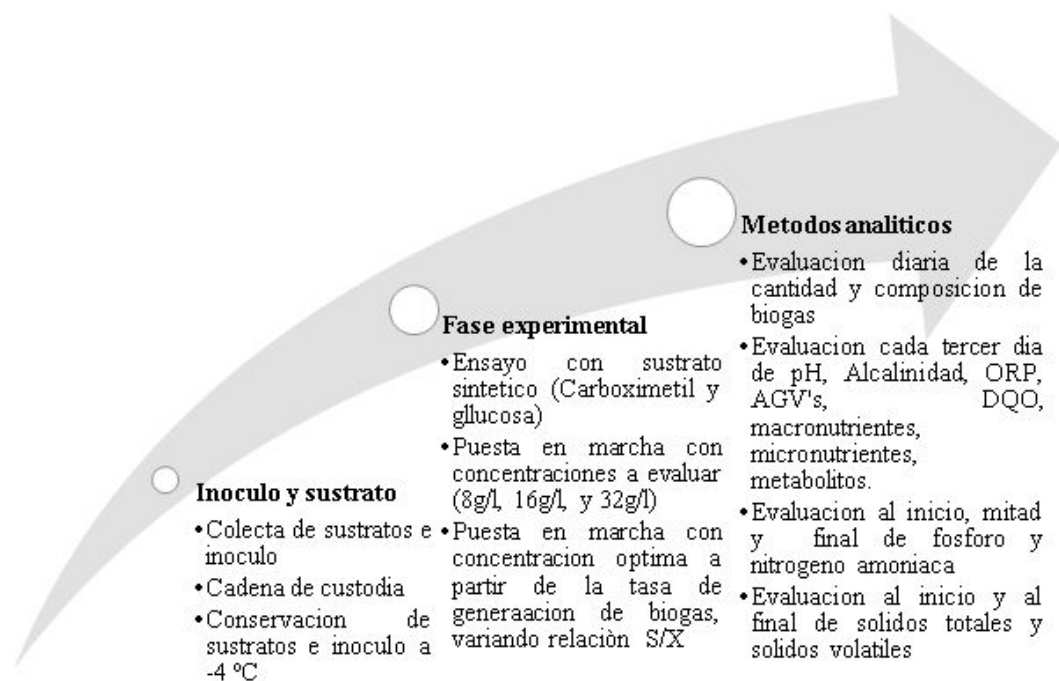


Figura 1: Fases para la evaluación de la obtención de energía y subproductos a partir de un esquema básico de biorefinería centrado en co-digestión anaerobia

● Inóculo y sustratos

El inóculo se obtuvo de la planta de aguas residuales de Alpina S.S en Sopó, Cundinamarca. Este se mantuvo a una temperatura de -4°C para asegurar las condiciones iniciales del lodo el cual fue utilizado para la implementación de la digestión anaerobia sin tratamiento previo.

Los sustratos seleccionados para este estudio fueron estiércol de cerdo, mucílago de café y mucílago de cacao, los cuales fueron debidamente conservados a una temperatura de -4°C, bajo esta condición se limita la degradación microbiológica. El estiércol de cerdo fue recolectado del Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia, ubicado en Mosquera, Cundinamarca; mientras que el mucílago de cacao fue recolectado de una finca ubicada en Floridablanca, Santander, y por último el mucílago de café, fue recolectado de una finca en el municipio de Anolaima, Cundinamarca.

● Fase experimental

La evaluación en cuanto a la generación de metano se realizó a partir de los sustratos anteriormente mencionados, se implementaron dos plantas piloto (Figura 2); cada reactor tiene un volumen total de 6l y permitían el control de la temperatura, la cual se manejó en condición mesófila (35°C) debido a que este permite una estabilización del proceso, reduciendo la concentración de sustancias inhibitoras (Ren et al., 2018). En primera instancia se implementó un ensayo preliminar en cada uno de los reactores con sustrato sintético (Carboximetil y Glutamina) de tal forma que fuera posible verificar la respuesta del inóculo de trabajo y la operatividad de los reactores.

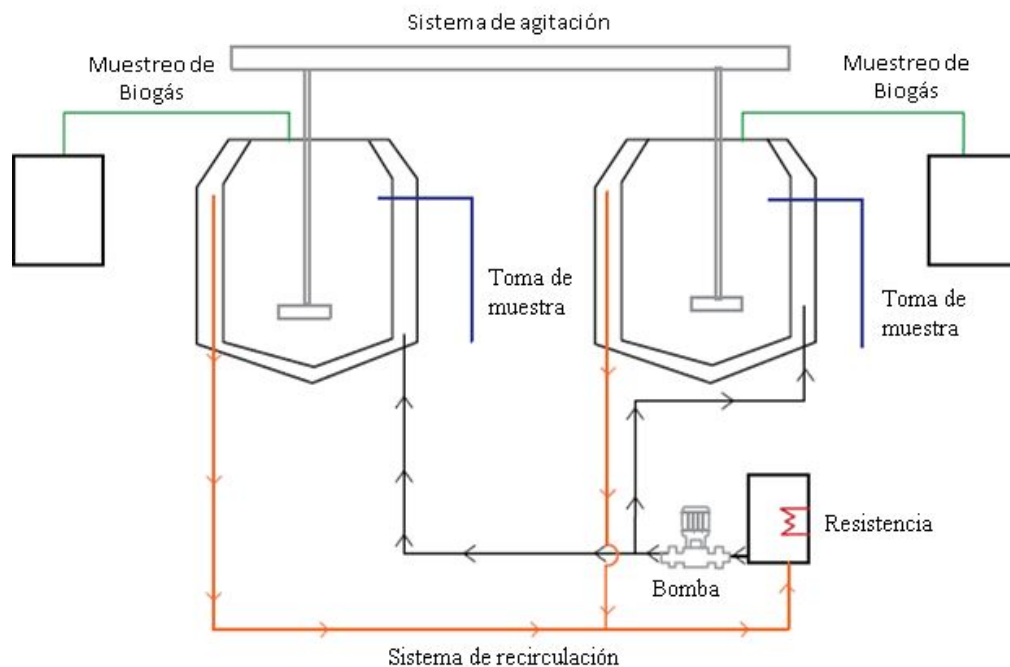


Figura 2: Esquema de planta piloto con reactores EBGC.

Los digestores utilizados para el estudio fueron de la marca EDIBON con reactores EBGC, cuyo funcionamiento es controlado por medio de un computador con el sistema SCADA que se compone de los tres softwares principales, los datos son recibidos por la tarjeta de adquisición de datos y el control de los reactores en tiempo real mediante la caja-interface de control, para el objetivo de este estudio, se utilizó principalmente para el control de la temperatura.

En los reactores se procedió a evaluar tres concentraciones seleccionadas, estas fueron 8g/l, 16g/l y 32g/l, con C/N de 25 y S/X de 1:1; posterior a esto se realizó un análisis de las concentraciones manejadas para así determinar la concentración óptima y a partir de la concentración con el valor de la tasa de producción óptima realizar una variación en cuanto a la relación de sustrato inóculo de 0,5:1, 1:1 y 1.5:1 (Lü et al., 2012). Así finalmente se realizó el modelo Gompertz modificado con los valores obtenidos de la producción de metano, con el fin de conocer la adaptación estos a un modelo matemático.

• Metodos analiticos

Diariamente se monitoreó la cantidad de biogás generado y la composición del mismo a partir del equipo BIOGAS 5000- Landtec y recolección del biogás en bolsas Tedlar. En cuanto a los demás parámetros fueron monitoreados cada 3 días, temperatura y pH se midió por medio del equipo Hanna edge pH meter, ácidos grasos volátiles (AGV), Alcalinidad (ATK) sólidos totales (TS) y sólidos volátiles (VS) se realizaron teniendo en cuenta las metodologías estándar, fósforo, nitrógeno amoniacal y DQO se realizaron por medio del fotómetro multiparámetro Hanna Hi 83099 bajo las longitudes de onda de 525 nm, 420 nm y 610 nm. El análisis de macronutrientes y micronutrientes se realizó mediante absorción atómica en el equipo con condiciones de flujo de acuerdo al elemento que se estaba midiendo, teniendo en cuenta que el rango del flujo de gas combustible se manejó entre 2.0 y 2.8 l/min y el flujo de gas soporte se manejo en 15 l/min. En la evaluación de metabolitos se implementó el método de cuantificación por cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC).

Análisis de resultados

● Producción de metano

La producción y composición de biogás, se ve afectada por diversos parámetros, los cuales fueron analizados a través del proceso. Los resultados mostraron una producción máxima de biogás de 58014,6 ml en 30 días para la concentración de 32 g/l con relación sustrato:inóculo de 1:1, como se observa en la Figura 3, generaron 16 l biogás/l solución para esta concentración. Se demuestra que cuando se incorporan otros sustratos y estiércol porcino en co-digestión, se genera una mayor producción entre el 48 y 69% de biogás, en comparación a ensayos en los que se trabaja el estiércol como único sustrato (Montoro et al., 2019, Ahlberg-Eliasson et al., 2017). Así mismo, se puede realizar una comparación en cuanto a las tres relaciones de sustrato:inóculo, ya que se obtuvo mayor generación de biogás en la relación 0.5:1. Por otro lado, se observa que la mayor producción se efectuó entre el 10 y 15 día, en cuyo intervalo de tiempo se genera el cambio de fase de exponencial a estacionario. Este comportamiento se ve reflejado en las demás de concentraciones aún cuando la producción varía teniendo en cuenta que el TRH fue de 30 días.

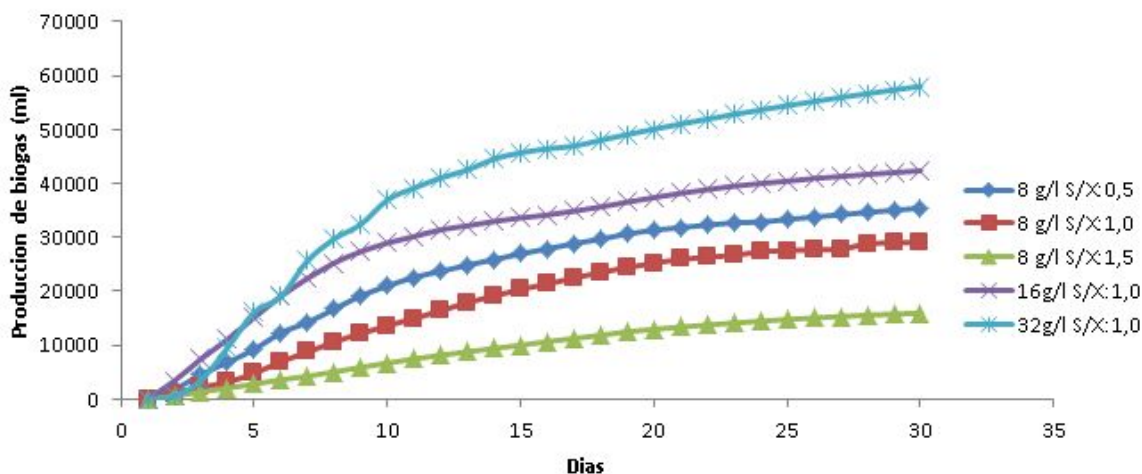


Figura 3: Producción de biogás para cada condición de concentración y relación sustrato – inóculo

En cuanto al metano obtenido, que se muestra en la tabla 1, se determinó una mayor tasa de generación para la concentración de 8g/l con S/X de 0,5 con un valor de 486,6 ml CH_4/gCO , mientras que la tasa de generación de 32g/l que fue la concentraciones con mayor producción acumulada de biogás, fue de 279,4 ml CH_4/gCOD ; cabe mencionar este estudio obtuvo tasas de producción óptimas, teniendo en cuenta que al realizar una comparación con resultados obtenidos en otros procesos de codigestión, se obtuvieron tasas de producción entre 98,7 y 243,8 ml CH_4/gCOD (Zhang et al., 2019). Por otro lado al comparar la tasa de producción que se genera a partir del estiércol como único sustrato y la tasa óptima obtenida en este estudio, se evidencia que al utilizar el estiércol en codigestión, se aumenta la producción en un 32% (Duan et al., 2019), así mismo se demuestra que los tres sustratos manejados tienen un acoplamiento óptimo durante el proceso. En la figura 4, se pueden observar los porcentajes de metano durante el proceso en las diferentes concentraciones, evidenciando que se obtuvieron valores dentro del rango reportado en la literatura el cual oscila entre 45% y 70% (Kavuma, 2013). Además obtuvo una mayor estabilidad entre la fase estacionario y exponencial de los valores de la concentración de 8g/l con S/X de 1:1 ya que no se obtuvieron grandes diferencias entre

los porcentajes, como se observa en la figura 2; esto tiene relación con que durante el proceso se generó una sinergia positiva entre los sustratos lo cual benefició al crecimiento bacteriano en el sistema y por ende aumentó la producción (Corro et al., 2013, Kim et al., 2019).

Tabla 1: Tasas de generación de metano.

Concentración (g/l)	S/X	Metano (ml)	Tasa (ml CH ₄ /gCOD)
8	0,5:1	4875,6	486,6
8	1:1	14536,7	354,7
8	1,5:1	3554,7	146,3
16	1:1	24102,7	313,1
32	1:1	32405,8	279,4

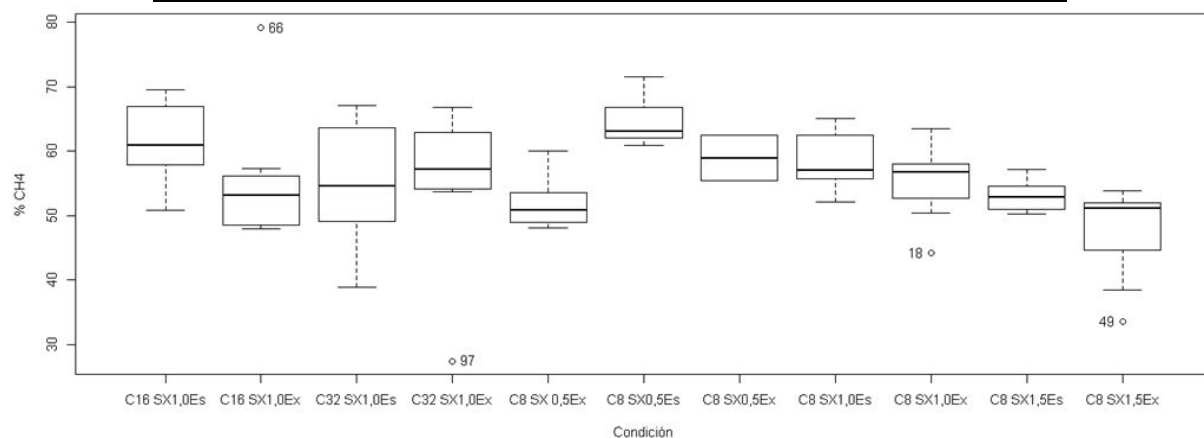


Figura 4: Comportamiento de concentración de metano en fase exponencial (Ex) y estacionaria (Es).

En cuanto al porcentaje de metano, se evidenció que se ve afectado por la relación sustrato: inóculo, en donde obtuvo en las tres relaciones evaluadas (0.5:1, 1:1 y 1.5:1) valores del 56,2%, 54,6% y 49,7% con respecto a la cantidad del biogás. A partir de esto, se observó que a mayor relación de sustrato inóculo menor será la generación de biogás ya que se cuenta con menor cantidad de microorganismos para la producción de este, lo cual indica un aumento en la inestabilidad del proceso por la acumulación de AGV's (Lü et al.,2012). Adicional a esto, se puede relacionar la cantidad de metano generado con la cantidad de H₂S que se encuentra en el sistema, debido a que si los valores de este gas son altos la cantidad de metano tiende a disminuir debido a la toxicidad que le genera al sistema (Iza et al., 1986, Díaz, & Molina, 2002); en tal sentido debemos señalar que los valores obtenidos en este parámetro no superaron los 10000 ppm, en donde se generaría en tal caso inhibición del sistema (Haghighatafshar et al.,2012), ya que estuvieron entre 739 y 3115, teniendo en cuenta que los valores más altos fueron registrados en la relación S/X mayor.

Por otro lado cabe mencionar que los porcentajes de CO₂ generados durante los procesos de evaluación estuvieron entre 33% y 43%, lo cual está dentro del rango descrito en la literatura (Cué et al., 2008), en donde el valor más bajo se obtuvo de la concentración de 16g/l y el más alto fue de la concentración de 8g/l con S/X de 1,5:1, y se logra observar que el CO₂ está en relación con el CH₄

debido de que a medida de que el porcentaje de metano aumenta, el dióxido de carbono disminuye (Burbano, 2006).

Con el propósito de realizar la simulación en cuanto a la producción de metano que se obtuvo en las concentraciones, se procedió a utilizar el modelo Gompertz modificado para la estimación de los parámetros cinéticos. Este modelo tiene un punto de inflexión definido (Cossu et al., 2016) de tal forma que permite observar matemáticamente la adaptación que tuvo cada ensayo, teniendo en cuenta la confiabilidad de los datos con respecto a los coeficientes de correlación (Wu et al., 2018, Solarte et al., 2017); de tal forma que se obtuvieron resultados entre 0,8732 y 0,9975 en donde la concentración de 32g/l obtuvo una mejor correlación como se muestra en la tabla 2, a la vez muestra que la ecuación Gompertz modificada es apropiada para la modelación de la producción del metano (Wu et al., 2018).

Tabla 2: Resultados de modelo Gompertz para la producción de metano

Concentración (g/l)	S/X	P	R Max	$\lambda(h)$	R ²
8	0,5:1	18252,2	60,1	24	0,9919
8	1:1	15499,9	45,6	24	0,9876
8	1,5:1	6845	18,3	24	0,975
16	1:1	23826,6	167,4	24	0,8732
32	1:1	32405	133,3	24	0,9975

A partir de la información experimental, se estableció el poder calorífico a través del porcentaje de metano en el biogás producido para cada condición con registro diario, especificando dos etapas de interés en la producción denominadas; fase exponencial (Ex) y fase estacionaria / decadencia (Es), con el fin de identificar en cuál de las condiciones y fases de producción el biogás presenta una mejor calidad energética.

Para el análisis de los datos, se identifica los valores mínimos, máximos y promedio, al observar los datos obtenidos en la figura 5 se observa que la fase estacionaria presenta un mayor poder calorífico, representando un mayor potencial de combustión la condición de 16 g/l con un poder calorífico de 13.3 y 15.0 MJ/m³ para la zona exponencial (Ex) y la zona estacionaria (Es) respectivamente. Este poder calorífico generaría una potencia de 3.69 a 4.16 kWh, (Serrato & Lesmes, 2016) para la obtención de energía eléctrica o térmica. Pese a que esta condición presentó el mejor valor de poder calorífico, se encuentra por debajo del valor estipulado por la unidad de planeación minero energética (UPME), el cual indica que el poder calorífico inferior para el biogás genérico es de 22 MJ/m³, con una composición del 64.8% de metano 35% de CO₂ y 0.2% de H₂S.

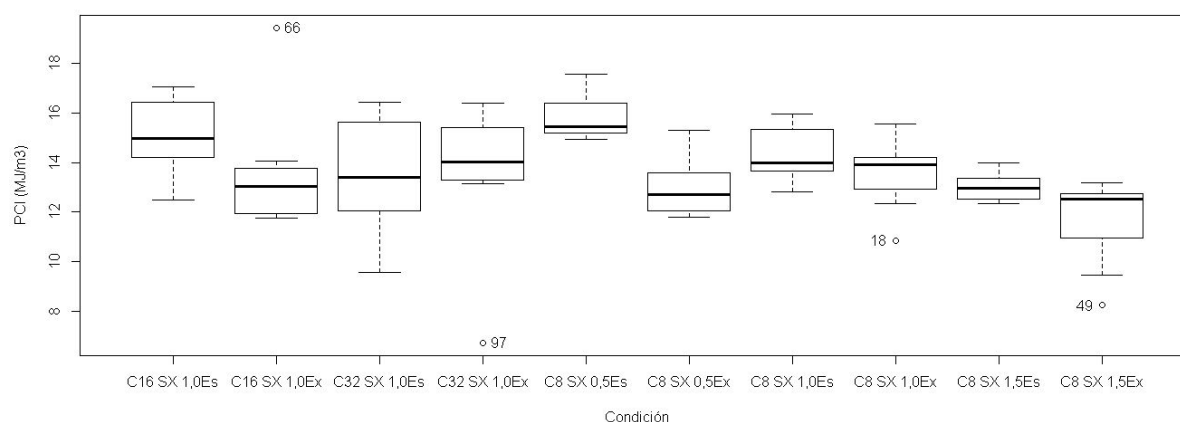


Figura 5: Comportamiento del poder calorífico por condición.

● Análisis de las variables del proceso

El pH a lo largo del proceso tuvo valores en un rango óptimo para la co-digestión, ya que este se conservó alrededor de 7, lo cual se puede corroborar con respecto a la relación que se logró entre los parámetros de alcalinidad y AGV (Figura 6). Al final de cada proceso se obtuvieron valores por debajo de 0,4, lo cual es apropiado para la digestión anaerobia (Li et al., 2015). De la misma forma, Esto indica que la mezcla de sustratos tienen una alta capacidad buffer debido al estiércol y da certeza que los ácidos grasos se encuentran en estado ionizado, lo cual impide que el proceso se inhiba y se genere toxicidad al mismo (Díaz, & Molina 2002). Dentro del análisis de los AGVs se encuentran principalmente ácidos grasos de cadena corta como el ácido acético, ácido propiónico y ácido isobutírico, los cuales son esenciales en las etapas de acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis para su degradación y posterior producción de metano.

No obstante en el único ensayo en donde no se lograron valores por debajo de 0,4 fue en la concentración de 8g/l con S/X de 1,5:1, lo cual indica que durante todo el proceso hubo una acumulación de AGV's causando inestabilidad (Lü et al., 2012) y por ende el proceso estuvo expuesto a acidificación (Gu et al., 2014) en donde se tuvieron valores de pH inferiores a 6,5, el cual es el valor mínimo óptimo para digestión anaerobia (Lorenzo, & Obaya., 2005).

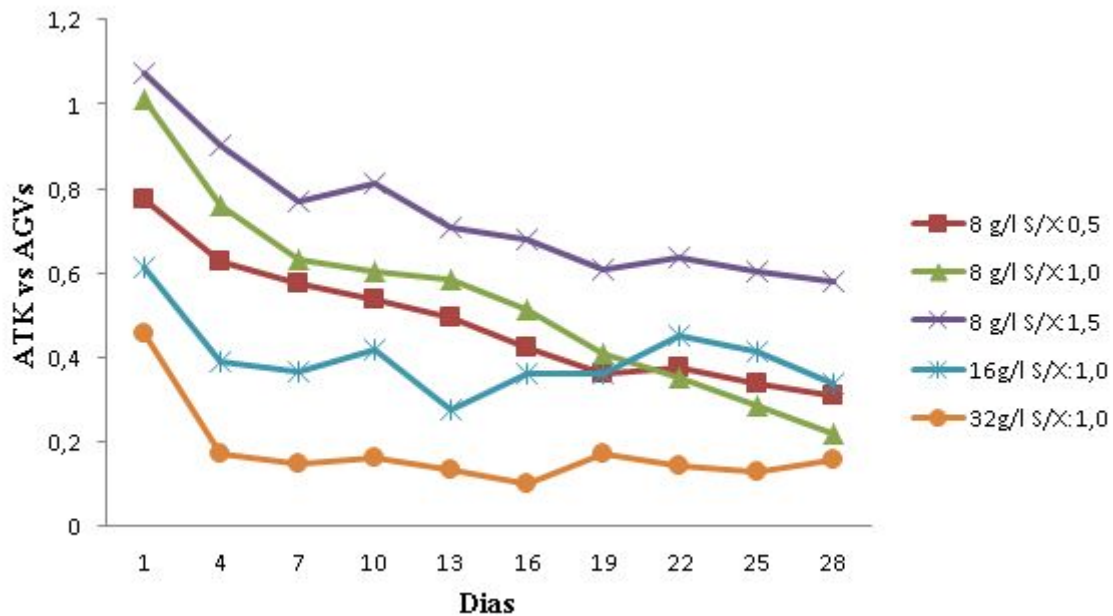


Figura 6: Relación AGV's / Alcalinidad por concentración de sustratos.

Con el fin de determinar el porcentaje de remoción de DQO de cada condición de trabajo manejada, como se observa en la figura 7 que permite conocer el comportamiento que tuvieron los sistemas para la remoción de este, en donde se observa que al inicio del proceso se genera una remoción mayor relacionando así este con la fase exponencial para la producción del biogás. en la tabla 3 se observa que el mayor porcentaje de remoción con respecto a las tres relaciones S/X manejadas, se presenta en una relación S/X 1:1 con un porcentaje del 83,4,2. Por otro lado con respecto a las tres concentraciones manejadas, se obtuvo una remoción de 87,1 % en la concentración de 16 g/l siendo esta la más alta lo cual es la remoción esperada de acuerdo a las condiciones de temperatura y pH que se manejaron (Lorenzo & Obaya, 2005).

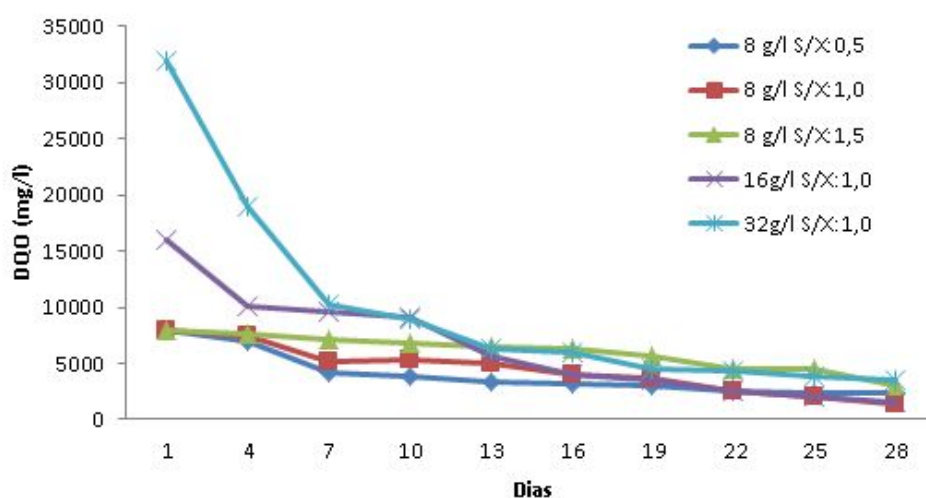


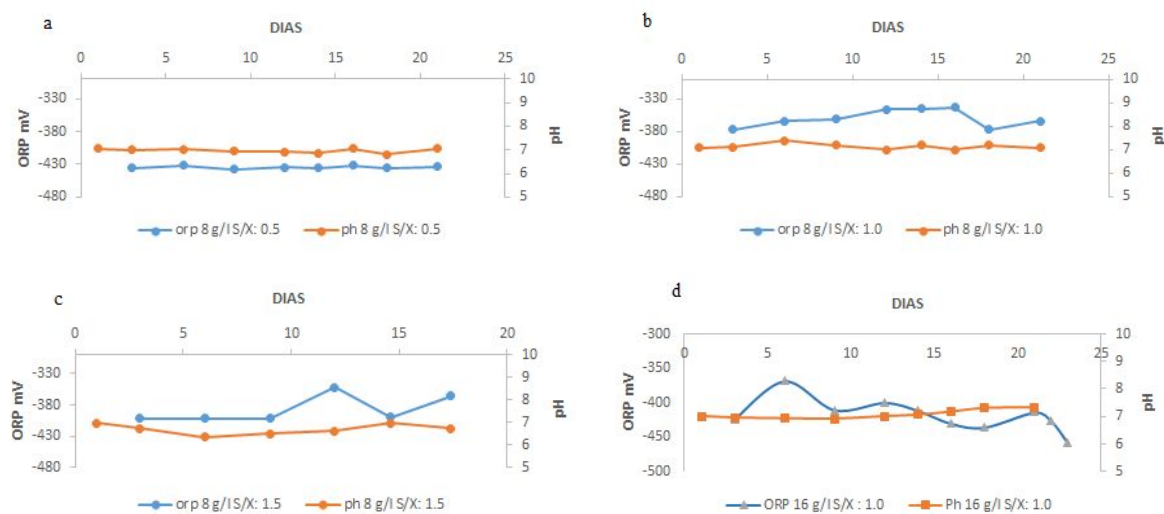
Figura 7: Comportamiento de la DQO en el sistema bajo las diferentes condiciones

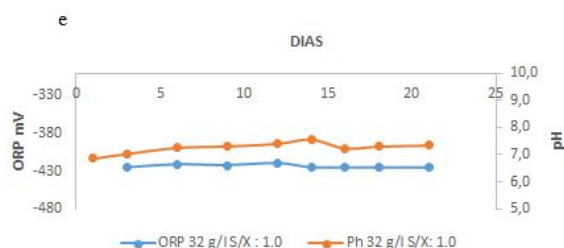
Tabla 3. Porcentaje de remoción a partir de DQO para cada concentración.

Concentración (g/l)	S/X	DQO final (mg/l)	% Remoción
8	0.5:1	2302	71,2
8	1:1	1325	83,4
8	1,5:1	2950	63,1
16	1:1	2057	87,1
32	1:1	4262	86,6

Durante el proceso se monitoreó el potencial redox del sistema, representado en la figura 8. Los datos obtenidos variando la relación inóculo-sustrato para 8 g/l muestran un mejor comportamiento para la relación S/X de 1.0 con valores menores de -300 mV a -400 mV asegurando las mejores condiciones para los microorganismos en la etapa metanogénica de la co-digestión, (Chotinath et al., 2017, Varnero, 2011). En cuanto a las concentraciones de 16 g/l y 32 g/l, al comparar el comportamiento del pH y el ORP no se establece una relación directa, sin embargo, los valores negativos del ORP que presentan las condiciones infieren una producción de OH⁻ indicando que el ambiente no está ácido al igual que los valores registrados de pH, esto, asegura un consumo mayor de los AGVs, el ácido acético y ácidos orgánicos que se producen en las diferentes etapas de la codigestión (Gonzalez, 2015), obteniendo mayor eficiencia en la producción de biogás a lo largo del proceso.

Figura 8: valores potencial óxido-reducción ORP y pH para; a) condición 8 g/l S/X 0.5:1, b) condición 8 g/l S/X:1:1, c) condición 8 g/l S/X 1.5:1, d) condición 16 g/l S/X 1.0:1, e) condición 32 g/l S/X 1:1.





Por otra parte, se observó que a medida que se trabaja con concentraciones elevadas la cantidad de ST y SV va aumentando como se observa en la tabla 4, esto se debe a que estos son proporcionales a la cantidad de materia orgánica que está disponible en el sistema (Sánchez-Reyes et al., 2016). Además se notó una disminución entre 41 y 69% lo cual indica la cantidad de sólidos volátiles que se transforman en biogás al ocurrir la degradación, en donde el mayor cambio se generó en la concentración de 8g/l y el menor en 16g/l, y en cuanto a la relación final de SV/ST se obtuvieron valores entre 0,132 y 0,375 por consiguiente permite demostrar que en el sistema los microorganismos presentaron una buena adaptación en el momento de degradar la materia orgánica (Mendivelso, 2018).

Tabla 4: Reducción de valores en ST y SV en las tres concentraciones con relación S/X de 1:1

Concentración (g/l)	ST Inicial (g/l)	ST Final (g/l)	SV Inicial (g/l)	SV Final (g/l)
8	12,89	1,5	1,11	0,33
16	17,21	9,07	3,98	2,34
32	23,49	7,81	4,24	2,01

- **Subproductos: metabolitos, macro y micronutrientes**

La presencia de metabolitos en el sistema es de vital importancia para el estudio del proceso, en este sentido se identificaron ácido acético, propiónico, isobutírico, butírico y láctico. A partir de esto cabe mencionar que estos componentes se encuentran en dos etapas; ya que en la etapa de acetogénesis se encuentra generalmente el ácido acético, mientras que por otro lado la presencia de ácido propiónico, isobutírico y butírico, se producen en la etapa de acidogénesis.(Mendivelso, 2018, Parra, 2015), de los cuales se obtuvo mayor presencia de ácido propiónico. Esto tiene relación con presencia de ácido láctico en el proceso debido a que los microorganismos como *Propionibacterium*, *Veillonella* y *Clostridium propionicum* utilizan este último como sustrato para producir el ácido propiónico (Cué et al., 2008).

Teniendo en cuenta los requerimientos de las bacterias metanogénicas para su crecimiento y los metales que se encuentran el proceso de digestión anaerobia, se evaluaron el Cobre (Cu), Zinc (Zn), Hierro (Fe) y Magnesio (Mg). Se determinó que el predominante dentro del proceso fue el Hierro, lo cual generó un factor positivo, ya que este ayuda a la transformación de ácido acético en metano (Preeti & Seenayya, 1994), y así mismo ayuda a la estabilidad, traspaso de nutrientes y a que las

bacterias que se encuentran dentro del proceso tengan un ahorro de energía (Mancillas et al., 2015, Patidar & Tare, 2006).

Dentro del esquema general de las biorefinerías, es esencial el aprovechamiento completo de los componentes que se pueden generar, por ello, en el proceso de la digestión anaerobia puede haber una recuperación de subproductos como nutrientes, los cuales tienen demanda en el sector agrícola e industrial. En este caso, se tienen el nitrógeno y estruvita como principales subproductos que genera el sistema y que pueden ser recuperados para su posterior uso. En esta etapa el análisis sobre el nitrógeno amoniacal es de vital importancia, cuyos resultados nos arrojan que en las concentraciones de 8, 16 y 32 g/l se presenta valores desde 114 mg/l hasta 900 mg/l obteniendo los valores altos a medida que se trabaja con concentraciones más altas, rectificando la relación con las investigaciones hechas por (Montoro et. al 2019), dentro sus resultados se presentan mayor porcentaje de nitrógeno a medida que el porcentaje de sustrato aumenta.

Para la recuperación se puede realizar a través de stripping/absorción (Fernández, 2016), cuyo resultado es la obtención de sal de amonio en estado líquido el cual puede ser cristalizada y valorada por aparte de igual forma general un efluente del digestor con concentraciones mínimas de nitrógeno amoniacal. Sin embargo, mediante el nitrógeno amoniacal también es posible la recuperación de estruvita, al estar presente el fósforo los cuales se presentan concentraciones desde 65 mg/l hasta 364 mg/l, para las concentraciones utilizadas en el sistema aumentando de igual manera en relación al aumento de la concentración. La recuperación es realizada mediante precipitación química generando en cristales de sal. Los parámetros importantes para esta obtención es el pH, temperatura y el nivel de solubilidad del magnesio, amonio y fosfato, (Redondo, 2015).

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que entre las cargas evaluadas la concentración que obtuvo los valores más óptimos fue la concentración de 8g/l con relación S/X de 0,5, teniendo en cuenta que la tasa de generación de esta fue 486,6 ml CH₄/gCOD, adicional a esto se demuestra que a menor relación S/X se obtendrán mejores resultado, tanto en cantidad de biogás como de cantidad de metano generado, debido a los microorganismos disponibles en el sistema, y así mismo un valor más alto en la relación S/X, genera complicaciones en las etapas de codigestión, específicamente para la hidrólisis, de igual manera genera acumulacion de AGV's acidificando el entorno.

Adicional a esto se evidencia que el uso de estiércol de cerdo en el proceso como base genera un efecto buffer en el sistema y permite la estabilización del pH por sí solo, y al mismo tiempo demostrando la sinergia entre los tres sustratos entre el proceso de codigestión anaerobia, lo cual permitió la generación de los microorganismos. Aunque no se establece una relación directa entre el potencial de oxido reduccion y el pH, los dos parámetros indicaron condiciones estables para el crecimiento microbiano, asegurando el consumo de AGVs, sólidos y materia orgánica, rectificando tanto teóricamente como experimentalmente el rango óptimo comprendido entre -300 mV a -400 mV para el ORP.

Se logró evaluar dos zonas esenciales en la producción del biogás la zona exponencial y la zona estacionaria, además de tener relación directa con la curva de crecimiento microbiológica, se

identificó que en la zona estacionaria presenta mayor poder calorífico con una composición promedio del 65% de CH₄ 33.5 de CO₂ y 0,4% de O₂ representando un poder calorífico inferior de 15 MJ/m³.

El aprovechamiento de la materia orgánica dentro de los residuos agroindustriales por medio de la digestión anaerobia, presentó resultados óptimos en cuanto eficiencia energética, además, se identificaron subproductos con valor económico tanto para actividades agrícolas como industriales, resaltando metabolitos y nutrientes para su extracción. En cuanto a la presencia de metabolitos se identificó, ácido acético, propiónico, isobutírico, butírico y láctico, en donde el que mayor presencia tuvo fue el ácido propiónico.

Bibliografía

Ahlberg-Eliasson, K., Nadeau, E., Levén, L., & Schnürer, A. (2017). Production efficiency of swedish farm-scale biogas plants. *Biomass and Bioenergy*, 97, 27-37. doi:10.1016/j.biombioe.2016.12.002

Burbano, A. (2006). *Utilización del metano generado en un reactor anaerobio como fuente de energía en una industria de gaseosas*

Chotinath, V, Jirawan, D & Watsa, K, (2017). *Relationship between pH, Oxidation Reduction Potential (ORP) and Biogas Production in Mesophilic Screw Anaerobic Digester*. International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies, Bangkok, Thailand.

Corona, A., Parajuli, R., Ambye-Jensen, M., Hauschild, M. Z., & Birkved, M. (2018). *Environmental screening of potential biomass for green biorefinery conversion* doi://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.316

Corro, G., Paniagua, L., Pal, U., Bañuelos, F., & Rosas, M. (2013). *Generation of biogas from coffee-pulp and cow-dung co-digestion: Infrared studies of postcombustion emissions* doi://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.017

Cossu, R., Morello, L., Raga, R., & Cerminara, G. (2016). *Biogas production enhancement using semi-aerobic pre-aeration in a hybrid bioreactor landfill*. *Waste Management*, 55, 83-92. doi:10.1016/j.wasman.2015.10.025

Cué Brugueras, M., Díaz Alonso, G., Díaz Martínez, A. G., & Valdés Abreu, Manuela de la C. (2008). El artículo de revisión. *Revista Cubana De Salud Pública*, 34(4), 1-11. doi:10.1590/S0864-34662008000400011

Díaz, M., Espitia, S & Molina, F.. (2002). *Digestión anaerobia, una aproximación a la tecnología*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia

Duana, N., Zhanga, D., Lina, C., Zhangb, Y., Zhaoc, L., Liud, H., & Liua, Z. (2019). *Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of pig manure: Methane production, mass flow, reactor scale and heating scenarios*. *Journal of Environmental Management*. doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.062

Fernández, L., (2016), *Selección y dimensionado de un sistema de generación de biogás mediante digestión anaerobia de purines digeridos con glicerina*. Proyectos de fin de carrera de ingeniería química, Universidad de Cadiz, España, <http://hdl.handle.net/10498/18784>.

González, A.M.(2015), *Estudio tecnico - economico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante la digestión anaerobia*. Universidad de sevilla, Espana, Sevilla. <http://hdl.handle.net/11441/27048>

Gu, Y., Chen, X., Liu, Z., Zhou, X., & Zhang, Y. (2014). *Effect of inoculum sources on the anaerobic digestion of rice straw*doi://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.011

Haghighatafshar, S., Kjerstadius, H., la Cour Jansen, J., & Davidsson, Å.,(2012) *Management of hydrogen sulfide in anaerobic digestion of enzyme pretreated marine macro-algae* 68(4). p.265-273

Isa, Z., Grusenmeyer, S., & Vestraete, W. (1986). *Sulfate reduction relative to methane production in high-rate anaerobic digestion: Technical aspects. Applied and Environmental Microbiology*, 51(3), 572-579.

Jaramillo ,G., & Zapara, L., (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Universidad de Antioquia; pg 23-161.

Kavuma, C. (2013). *Variation of methane and carbon dioxide yield in a biogas plant* KTH, Kraft- och värmeteknologi.

Kim, J., Baek, G., Kim, J., & Lee, C. (2019). *Energy production from different organic wastes by anaerobic co-digestion: Maximizing methane yield versus maximizing synergistic effect* doi://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.046

Li, D., Liu, S., Mi, L., Li, Z., Yuan, Y., Yan, Z., & Liu, X. (2015). *Effects of feedstock ratio and organic loading rate on the anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and cow manure* doi://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.033

Lorenzo-Acosto, Y., & Obaya-Abreu, M, C.,(2005). *La digestión anaerobia, aspectos teóricos parte I. instituto cubano de investigaciones de los derivados de la caña de azúcar (ICIDCA)*. revista@icidca.edu.cu. vol. XXXIX, núm. 1pp. 35-48.

Lü, F., Hao, L., Zhu, M., Shao, L., & He, P. (2012). *Initiating methanogenesis of vegetable waste at low inoculum-to-substrate ratio: Importance of spatial separation* doi://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.104

Mancillas-Salas, S, Rodríguez, J, A., & Ríos-González, L., (2015). *Bioestimulación de la digestión anaerobia*.Revista Científica De La Universidad Autónoma De Coahuila, No.4(No.8)

Matthews, C., (29 de Noviembre de 2006). *La ganadería amenaza el medio ambiente*. FAO Sala de prensa.

Mejia, L., Cadena, X., Corrales, J., (2019). *Tendencia económica, Informe Mensual de FEDESARROLLO*. Bogotá: Fedesarrollo.

Mendivelso, A. L., (2018). *Estudio de la producción de biogás mediante la co-digestión anaerobia usando como sustrato el mucílago de café y como inóculos el estiércol porcino y estiércol bovino* Universidad Santo Tomás; Pregrado Química Ambiental; Facultad de Química Ambiental.

Ministerio de Minas y Energía. (2010). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Bogotá D.C.

Montoro, S. B., Lucas, J., Lopez-Santos, D., & Costa, M., (2019). *Anaerobic codigestion of sweet potato and dairy cattle manure A technical and economic evaluation for energy and biofertilizer production*. Journal of Cleaner Production. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.148>.

Parra-Huertas, R. A., (2015). *Digestión anaeróbica: Mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria*. Producción + Limpia, 10(2), 142-159.

Patidar, S. K., & Tare, V. (2006). *Effect of nutrients on biomass activity in degradation of sulfate laden organics* doi://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.07.001

Preeti Rao, P., & Seenayya, G. (1994). *Improvement of methanogenesis from cow dung and poultry litter waste digesters by addition of iron*. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 10(2), 211-214. doi:10.1007/BF00360890

Pulido, A., Turriago, J., Jiménez, R., Torres, C., Rojas, A., Chaparro, N., Ortiz, E., Granados, S., Rodríguez, J., Berrio, V., Figueroa, C., Bohórquez, A., Rojas, S., & López, J (2016) *Inventario nacional y departamental de gases efecto invernadero - Colombia*.

Redondo, L., (2015). *Análisis y caracterización de purines para la obtención de estruvita y biogás*. Universidad politécnica de Valencia, España, Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/71857>.

Ren, Y., Yu, M., Wu, C., Wang, Q., Gao, M., Huang, Q., & Liu, Y. (2018). *A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: Research updates and tendencies* doi://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.109

Sánchez-Reyes, C., Patiño-Iglesias, M. E., Alcántara-Flores, J. L., Reyes-Ortega, Y., Pérez-Cruz, M. A., & Ortiz-Muñoz, E. (2016). *Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares*. Revista Internacional De Contaminación Ambiental, 32(2), 191-198. doi:10.20937/RICA.2016.32.02.05

Serrato, C. C., & Lesmes, V. (2016). *Metodología para el cálculo de la energía extraída a partir de la biomasa en el departamento de Cundinamarca*. pg. 19-21, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, facultad de ingeniería eléctrica. Bogotá, Colombia.

Solarte, J. C., Mariscal Moreno, J. P., & Aristizábal Zuluaga, B. H. (2017). *Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio. Revista ION*, 30(1), 105-116. doi:10.18273/revion.v30n1-2017008

Varnerom, M, T., (2011). *Manual de biogás*. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación FAO. Santiago de Chile.

Villanueva-Mejía, D., & Universidad EAFIT. (2018). *Estudio sobre bioeconomía, como fuente de nuevas industrias basadas en el capital natural de Colombia fase II*

Wu, C., Yu, M., Huang, Q., Ma, H., Gao, M., Wang, Q., & Sakai, K. (2018). *Stimulation of methane yield rate from food waste by aerobic pre-treatment. Bioresource Technology*, 261, 279-287. doi:10.1016/j.biortech.2018.04.006

Zhanga, Y., Caldwellb, G., Zealanda, A., & Sallisa, P. (2019). *Anaerobic co-digestion of microalgae Chlorella vulgaris and potato processing waste: Effect of mixing ratio, waste type and substrate to inoculum ratio. Biochemical Engineering Journal*. doi.org/10.1016/j.bej.2018.12.021

Zhou, M., Yan, B., Wong, J. W. C., & Zhang, Y. (2018). *Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: A mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways. Bioresource Technology*, 248(Pt A), 68-78. doi:10.1016/j.biortech.2017.06.121