



UNIVERSIDAD FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCUELA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA



AURA JAZMIN HERNANDEZ ACUÑA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN REACTOR UASB EN  
CONTINUO Y SEMICONTINUO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR  
DE LA CODIGESTIÓN DE HIDROLIZADO DE CAÑA Y VINAZA.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

OURO PRETO, 2019

AURA JAZMIN HERNANDEZ ACUÑA

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN REACTOR UASB EN  
CONTINUO Y SEMICONTINUO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR  
DE LA CODIGESTIÓN DE HIDROLIZADO DE CAÑA Y VINAZA.**

Monografía presentada al curso de Ingeniería  
Ambiental de la Universidad Federal de Ouro Preto  
como parte de los requisitos para la obtención de  
grado de Ingeniería Ambiental.

Orientador: Bruno Eduardo Lobo Baêta  
Héctor Javier Luna Wandurraga

OURO PRETO, 2019

## Marco constitucional

El presente trabajo de graduación fue desarrollado dentro del marco de cooperación institucional entre la Universidad Antonio Nariño y la Universidad Federal de Ouro Preto, el cual busca promover la transferencia de conocimiento y tecnología entre los dos países, el trabajo EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN REACTOR UASB EN CONTINUO Y SEMICONTINUO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LA CODIGESTIÓN DE HIDROLIZADO DE CAÑA Y VINAZA, fue orientado por el profesor de la Universidad Antonio Nariño (UAN) Héctor Javier Luna Wandurraga, y por el profesor de la Universidad Federal de Ouro Preto (UFOP) Bruno Eduardo Lobo Baêta.

*Bruno Eduardo Lobo Baêta*

Dr. Bruno Eduardo Lobo Baêta

Orientador (UFOP)

*Héctor J Luna W*

Dr. Héctor Javier Luna

Orientador (UAN)



H557e      Hernandez Acuña , Aura Jazmín .  
                Evaluación el comportaminento de un reactor uasb en contnuo y  
                semicontinuo para la producción de biogás a partir de la codigestión de  
                hidrolizado de caña y vinaza [manuscrito] / Aura Jazmín Hernandez Acuña .  
                - 2019.

                49f.: il.: color; grafs; tabs.

                Orientador: Prof. Dr. Bruno Baêta.  
                Coorientador: Prof. Dr. Héctor Wandurraga.

                Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de  
                Minas. Departamento de Engenharia Ambiental.

                1. Bagaço de cana. 2. Hidrólise. 3. Cana-de-Açúcar-Derivados . 4. Metano . I.  
                Baêta, Bruno. II. Wandurraga, Héctor. III. Universidade Federal de Ouro  
                Preto. IV. Título.



**ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO**  
**Curso de Engenharia Ambiental**  
**Escola de Minas**

Aos nove dias do mês de dezembro de 2019, às treze horas e trinta minutos, no Laboratório de Química Ambiental (LQTA)- Auditório, foi realizada a defesa de monografia de final de curso, requisito da disciplina AMB-108 - Trabalho de Graduação II, pela aluna Aura Jazmín Hernández Acuña, sendo a comissão avaliadora formada pelo Professor Dr. DR. Hector Javier Luna Wandurraga (Participação Videoconferência) Facultad de ingeniería Ambiental y Civil- Universidad Antonio Nariño (UAN), Dr. Bruno Eduardo Lobo Baeta, do Departamento de Química industrial – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Dr. Iván Alejandro Ávila León (Participação Videoconferência) Facultad de ingeniería Ambiental y Civil- Universidad Antonio Nariño (UAN), MSc. Oscar Fernando Herrera Adarme, Programa de pós-graduação em Engenharia ambiental- Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela Aprovação da candidata com a nota 6,5, concedendo-lhe o prazo de até 15 dias para incorporar no texto final as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina AMB-108 (Trabalho de Graduação II) após a entrega da versão eletrônica definitiva da monografia defendida (com as assinaturas dos membros da banca) e ao Sistema de Bibliotecas e Informação (SISBIN) da UFOP dentro do prazo estabelecido pela PROGRAD para informação da nota do respectivo semestre.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pela discente.

Ouro Preto, MG, 09 de dezembro de 2019.

Hector J Luna W

Dr. Hector Javier Luna Wandurraga (Participação Videoconferência)  
Facultad de ingeniería Ambiental y Civil- Universidad Antonio Nariño (UAN)  
Membro da Comissão Avaliadora e Professor Orientador

Dr. Bruno Eduardo Lobo Baeta  
Departamento de Química industrial – Universidad Federal de Ouro Preto (UFOP)  
Membro da Comissão Avaliadora e Professor Orientador

Dr. Iván Alejandro Ávila León (Participação Videoconferência)  
Facultad de ingeniería Ambiental y Civil- Universidad Antonio Nariño (UAN)  
Membro da Comissão Avaliadora

Msc. Oscar Fernando Herrera Adarme  
Programa de pós-graduação em Engenharia ambiental- Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)  
Membro da Comissão Avaliadora

Aura Jazmín Hernández Acuña  
Aluna do curso de Engenharia Ambiental-UFOP

## AGRACEDIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por darme esta oportunidad tan grande de estudiar y de culminar mis estudios, por la vida y la salud que me ha brindado, por poner en mi camino personas que realmente han aportado a este sueño.

También a mis padres, por la oportunidad y apoyo incondicional que me han brindado, porque este logro es dedicado a ellos junto con mis hermanos; que son los que han estado en el transcurso de mi vida apoyándome y dándome motivación cada día. A mis orientadores porque fueron de gran ayuda en este proceso dando palabras de aliento y enseñanzas cada día, son un verdadero ejemplo a seguir como excelentes profesionales.

Agradezco a mis compañeros de laboratorio en la UAN y en la UFOP (LQTA), ya que tuve muchas enseñanzas y cada una de las personas aportó un granito de arena a mi aprendizaje. A mis profesores por todos los conocimientos compartidos durante las clases y así poder lograr esta meta.

A las personas que conocí en Ouro Preto, que realmente fueron una compañía excepcional para la experiencia y el aprendizaje, a las repúblicas Fruto Proibido y Fogo de Falha por el recibimiento a hacer parte de su familia republicana y por brindarme su apoyo en la etapa final de mis estudios.

Son muchas personas al largo del camino que aportaron cosas gratificantes para mi vida, muchas gracias porque esto fue posible gracias a ustedes.

## RESUMEN

Las biorefinerías buscan hacer una transición para un esquema energético sustentable aprovechando diferentes tipos de biomásas, que son un residuo orgánico presentado en gran cantidad. Uno de los procesos más relevantes que se encuentran, es la producción de metano con residuos de 1G y 2G, a través de una digestión anaerobia utilizando reactores. Por lo anterior, en esta investigación se emplea un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB), utilizando como sustrato una codigestión de vinaza como residuo de 1G e hidrolizado hemicelulósico, que se obtiene a partir de un pretratamiento de autohidrólisis del bagazo de caña (BC) que es un residuo de 2G.

Se realizó una comparación en el sistema, para identificar la producción de metano y la eficiencia en la operación del reactor en continuo y semicontinuo durante 106 días, por consecuencia se logró un seguimiento en tres puntos de medición en el reactor, donde se pudieron hacer comparaciones en cada uno de los puntos según el comportamiento del sistema. Se identificó que el valor de pH era estable para el sistema metanogénico. La mayor remoción de DQO se presentó en el sistema semicontinuo con 61.8%. En la medición de metano se identificó más óptimo el sistema alimentado en continuo y un mayor %CH<sub>4</sub> en el sistema semicontinuo, donde también se encuentra menor producción de AGVs. Por consiguiente, también se presentó que las cenizas de caldera con estiércol bovino como inóculo, fue óptimo para la digestión anaerobia y la adsorción de inhibidores (FF).

### **Palabras clave**

Hidrolizado de bagazo de caña, AGVs, biorreactor, metano, vinaza, digestión anaerobia.

## ABSTRACT

The biorefineries seek to make a transition to a sustainable energy scheme taking advantage of different types of biomass, which are an organic waste presented in large quantities. One of the most relevant processes found is the production of methane with 1G and 2G residues, through anaerobic digestion using reactors. Therefore, in this investigation an anaerobic upflow reactor (UASB) is used, using as a substrate a vinegar codigestion as a 1G residue and hemicellulosic hydrolyzate, which is obtained from a pre-treatment of sugarcane bagasse autohydrolysis (BC ) which is a 2G residue.

A comparison was made in the system, to identify the production of methane and the efficiency in the operation of the reactor in continuous and semi-continuous for 106 days, consequently a follow-up was achieved in three measuring points in the reactor, where comparisons could be made at each of the points according to the behavior of the system. It was identified that the pH value was stable for the methanogenic system. The highest COD removal occurred in the semi-continuous system with 61.8%. In the methane measurement, the system fed in continuous and a higher% CH<sub>4</sub> in the semicontinuous system were identified more optimally, where there is also lower production of AGVs. Therefore, it was also presented that boiler ashes with bovine manure as inoculum were optimal for anaerobic digestion and adsorption of inhibitors (FF).

## Keywords

Cane bagasse hydrolyzate, AGVs, bioreactor, methane, vinasse, anaerobic digestion.

## LISTA DE ABREVIATURAS

BC: Bagazo de caña

CBFA: cenizas volantes de bagazo de caña

DA: Digestión anaerobia

DQO: Demanda química de oxígeno

ER: Eficiencia de remoción

FF: Furfuraldehído

HMF: 5 – hidroximetil-2-furfuraldehido

HPLC: Cromatografía Líquida de Alta Resolución

OLR: Carga orgánica

PI: Punto intermedio

PM: Punto medio

SPM: Punto medio en semicontinuo

SPI: Punto inicial en semicontinuo

SR: Salida del reactor

SSR: Salida del reactor en semicontinuo

STV: Solidos totales volátiles

TRH: Tiempo de retención hidráulico

UASB: Reactor anaerobio de flujo ascendente

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Frecuencia de monitoreo .....	24
Tabla 2. Factores de conversión a unidades de DQO.....	27
Tabla 3. Parámetros medidos en el reactor.....	35
Tabla 4. Caracterización de sustrato del reactor.....	38

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pasos de la biomasa en la digestión anaerobia.....	16
Figura 2. Diseño Reactor UASB .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figura 3. Medidor de biogás en la operación .....	23
Figura 4. Velocidad de la autohidrólisis en cada ensayo.....	29
Figura 5. pH del hidrolizado.....	30
Figura 6. caracterización del hidrolizado .....	31
Figura 7. Estructura de biopolímeros lignocelulósicos y vía de formación de furanos.....	32
Figura 8. pH de la vinaza.....	33
Figura 9. Caracterización de la vinaza .....	34
Figura 10. pH en sistema continuo y semicontinuo de los puntos de medición Sustrato, PM, SR	36
Figura 11. % de remoción de los puntos de medición PI, PM Y SR en continuo y semicontinuo	37
Figura 12. . % de producción acumulada de CH <sub>4</sub> y producción acumulada de CH <sub>4</sub> en Nml/día	38
Figura 13. AGVs Evaluados en el sistema en continuo .....	40
Figura 14. AGVs evaluados en el sistema en semicontinuo .....	41
Figura 15. Inhibidores FF.....	42

## TABLA CONTENIDO

1. INTRO/DUCCIÓN .....	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo general.....	13
2.1 Objetivos específicos .....	13
3. REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	14
3.4 Biomasa lignocelulósica .....	15
3.4.1 Pretratamiento de la biomasa lignocelulósica .....	16
3.5 Digestión anaerobia .....	17
3.5.1 Inhibición en la digestión anaerobia.....	18
3.5.2 Ácidos grasos volátiles.....	18
3.6 Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) .....	19
3.7 Vinaza .....	19
3.8 Cenizas de la caldera.....	19
4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	20
4.1. Obtención del hidrolizado hemicelulósico del bagazo de caña .....	20
4.1.1. Análisis físico del hidrolizado.....	20
4.2. Caracterización de la vinaza .....	21
4.3 Biorreactor .....	21
4.5 medición de Biogás.....	22
4.6 Operación del reactor UASB .....	23
4.6.1. Preparación del sustrato para el reactor UASB utilizando la codigestión de vinaza e hidrolizado de caña.....	25
4.6.2 Medición de los azúcares en el efluente líquido durante la operación del reactor .....	25
4.6.3 Medición de los AGV en el efluente líquido durante la operación del reactor .....	25
4.6.4 Medición de los inhibidores furfuraldehido (FF) y hidroximetilfurfural (HMF).....	26
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
5.1 Pretratamiento de bagazo de caña.....	28

5.1.1 Caracterización del Hidrolizado hemicelulósico.....	29
5.2 Caracterización de la vinaza .....	32
5.3 Monitoreo del reactor UASB .....	34
5.3.1 pH.....	35
5.3.2 Porcentaje de remoción de DQO.....	36
5.3.3 Producción de CH <sub>4</sub> con la codigestión de vinaza e hidrolizado hemicelulósico.....	37
5.3.4 Ácidos grasos volátiles (AGVs).....	38
<b>5.3.5 Inhibidores HMF Y FF.....</b>	<b>41</b>
6. CONCLUSIONES .....	43
7. RECOMENDACIONES .....	44
8. REFERENCIAS .....	45



## INTRODUCCIÓN

“Las refinerías de petróleo y las plantas petroquímicas son las mayores fuentes de contaminación del aire en la región. Su funcionamiento está asociado a la emisión de diversos compuestos orgánicos a la atmósfera” (ABDELRASOUL et al., 2010).

El funcionamiento de las refinerías, que son en general grandes instalaciones industriales, están asociados a la emisión, principalmente provenientes de los procesos de producción, el almacenamiento los tanques, las tuberías de transporte y el área de residuos (KALABOKAS et al., 2001).

La sustitución de los combustibles fósiles y las refinerías convencionales es un gran objetivo para las bio-refinerías ya que estas representan los fundamentos de la respuesta de la bioeconomía a los precios altos de petróleo y a la necesidad de capital (HENRY, et al., 2014). Las bio-refinerías también ofrecen la posibilidad para una mejor estructura diversificada de enlaces entre la agricultura y los demás sectores de la economía. Un actor clave en los mercados agroalimentarios y energéticos mundiales, a través de sus cultivos de granos y aceiteros, y de los cultivos tropicales como la caña y palma aceitera, entre otros (HENRY, et al., 2014). La biomasa lignocelulósica es una importante fuente de energía renovable con potencial en la producción de biocombustibles, cogeneración de energía eléctrica y generación de compuestos químicos (PIÑEROS-CASTRO, 2014), representando un atractivo, de bajo costo como materia prima para la producción de H<sub>2</sub>. La Biomasa lignocelulósica contiene cantidades variables de celulosa (un polímero de glucosa), hemicelulosa (un heteropolímero de hexosa / pentosas con xilosa como constituyente principal) y lignina (una sustancia orgánica aromática) (QUEMENEUR, M. et al., 2012). El aprovechamiento de biomasa de segunda generación (residuo) se realiza por medio de la digestión anaerobia donde el proceso necesita reacciones químicas debido a esto se puede emplear esta biomasa de forma líquida o sólida para que su producto sea un biogás, la digestión anaeróbica se ha extendido de medio a residuos altamente concentrados de origen agroindustrial, las aplicaciones más complejas como las generadas en industrias petroquímicas, industrias papeleras e incluso aguas residuales (KLEEREBEZEM, et al., 2007). Los procesos de pretratamiento existentes para la biomasa lignocelulósica tienen un gran inconveniente: llevan a la formación de subproductos indeseables, distintos de los monosacáridos, que reducen la fermentabilidad de los hidrolizados obtenidos. De

hecho, una amplia gama de compuestos generados durante la hidrólisis se ha identificado previamente como inhibidores del crecimiento microbiano, así como también su metabolismo, es decir, la fermentación alcohólica. Se han distinguido tres grupos de inhibidores: ácidos orgánicos como el acetato generado por la degradación de la hemicelulosa; derivados de furano de la degradación del azúcar, tales como furfural o 5-hidroximetilfurfural (HMF); y monómeros fenólicos tales como vainillina o siringaldehído derivado de la alteración microbiana de la lignina. Estos inhibidores pueden afectar el crecimiento microbiano con tres modos de acción distintos: los ácidos orgánicos débiles no disociados penetran en las células microbianas y disminuyen el pH intracelular, los derivados de furfural interfieren con las enzimas glucóticas y / o fermentativas, mientras que las macromoléculas y los compuestos fenólicos dañan las membranas microbianas celulares (QUEMENEUR, M. et al., 2012).

Con este proyecto se busca ofrecer nuevas alternativas de energía, aprovechando los residuos agroindustriales que impactan al medio ambiente, como lo es la vinaza. Son las vinazas de destilerías los efluentes líquidos más contaminantes de este sector, por su gran volumen de generación, alta carga orgánica, color oscuro, lo que hace muy difícil su degradación. De ahí la necesidad de un adecuado tratamiento y disposición final (CURBELO M, & LORENZO ACOSTA, 2014).

Debido a lo anteriormente descrito la pregunta problema a desarrollar de este trabajo es. ¿Cómo Evaluar el comportamiento de un reactor UASB en continuo y semicontinuo para la producción de biogás a partir de la codigestión de hidrolizado de bagazo de caña y vinaza?

## **1. OBJETIVOS**

### 1.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento de un reactor UASB en continuo y semicontinuo para la producción de biogás a partir de la codigestión de hidrolizado de bagazo de caña y vinaza.

### 2.1 Objetivos específicos

- Evaluar la producción de metano de un reactor UASB en continuo y semicontinuo a partir de la codigestión de hidrolizado de caña y vinaza.
- Analizar el comportamiento de los ácidos grasos volátiles y los azúcares durante la operación de un reactor UASB en el cambio del sistema de continuo a semicontinuo.
- Determinar la influencia de los inhibidores del hidrolizado de caña en un reactor UASB para la producción de metano durante el cambio del sistema de continuo a semicontinuo.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 3.1 Biorrefinería

Las Biorrefinerías son instalaciones que de forma sostenible convierten biomasa en energía, productos químicos y materiales. En algunos países, estos productos de biorrefinería están hechos de biomasa residual. Los principales procesos en la biorrefinería implican la fermentación de etanol y la fermentación de ácido láctico. Para la biorrefinería, se desarrollaron muchas tecnologías híbridas de diferentes campos, como la bioingeniería, la química de polímeros, la ciencia de los alimentos y la agricultura (OHARA, 2003).

La principal fuerza motriz para el crecimiento de las biorrefinerías es la gran atención dada en todo el mundo a las cuestiones relacionadas con el desarrollo sostenible y la garantía de seguridad energética. Además, las situaciones relacionadas con la mitigación del cambio climático y la creciente demanda de productos químicos y de materiales, también impulsan el interés por las biorrefinerías. En términos generales es posible decir que la biorrefinería es similar a la refinería de petróleo, excepto que utiliza biomasa en lugar de petróleo crudo para producir combustibles, calor, energía, productos químicos y materiales (BAETA, 2016)

### 3.2 Biorrefinerías a partir de la caña de azúcar

El desarrollo económico de diferentes cadenas productivas basadas en biomasa, forma parte de la agenda de investigación, desarrollo e innovación (P& D & I) en países como Alemania, Francia, EE.UU., Brasil y Corea del Sur, entre otros, movilizando grandes sumas de esfuerzos y recursos públicos y privados, buscando el uso óptimo de la biomasa permitiendo agregar valor y reducir los impactos ambientales (HERRERA, 2018). En Brasil, la energía proveniente de la destilación de etanol se obtiene de la biomasa llamada bagazo, que son las lías filtradas de la caña de azúcar (OHARA, 2003). La caña de azúcar se eligió como sustrato para la producción de etanol debido a una serie de razones, incluida su gran adaptación al suelo brasileño y a las condiciones climáticas (RICARDO et al., 2010)

### 3.3 Bagazo de caña

El bagazo es el residuo (fracción sólida) que queda después de la extracción del jugo de caña de azúcar y el peso es cerca del 15% del total de la caña de azúcar. La producción mundial de bagazo de caña es aproximadamente 1900 millones de toneladas métricas y los países con mayor producción de este residuo están localizados en Latino América y Asia. Brasil es el primer productor con aportando un 40%, seguido de India (19%), China (7%), Tailandia (5%), México (2,5%) y Colombia (1,5%) (BEZERRA & RAGAUSKAS, 2016).

Brasil es uno de los países agrícolas más importantes del mundo. Entre sus diversos agroproductos como el café, la soja, la yuca, el maíz, las frutas, la caña de azúcar, etc., este último ha sido uno de los principales productos desde hace varias décadas (RICARDO et al., 2010) La producción de caña de azúcar en 2011 alcanzó 625 millones de toneladas. Dado que el manejo y procesamiento de la caña de azúcar fresca produce 14 y 12.5% de paja y bagazo (base seca), se estima que se produjeron cerca de 82.4 y 73.6 millones de toneladas de estos residuos durante este mismo período, respectivamente (SZCZERBOWSKI, PAULA, ZANDONÁ, & PEREIRA, 2014).

El bagazo de caña está compuesto por 19-24% de lignina, 27-32% de hemicelulosa, 32-44% de celulosa y 4.5-9.0% de cenizas. El resto es principalmente lignina más pequeñas cantidades de minerales, ceras y otros compuestos. (RICARDO et al., 2010).

### 3.4 Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica se entiende toda la materia de origen vegetal procedente de un bosque nativo o plantado (por ejemplo, ramas de árboles) y de los cultivos agrícolas y sus residuos (por ejemplo, orujo de caña de azúcar (BCA), cáscaras de arroz, maíz o café) (DINIZ, 2008).

La estructura química de la biomasa lignocelulósica formada mayoritariamente por un complejo polimérico natural constituido de celulosa, hemicelulosas y lignina, impide la conversión directa de ese material a combustible. La utilización de los residuos lignocelulósicos con altos rendimientos en procesos de fermentación depende de la disponibilidad de acceso de los azúcares a los microorganismos (BAETA, *et al.*, 2016).

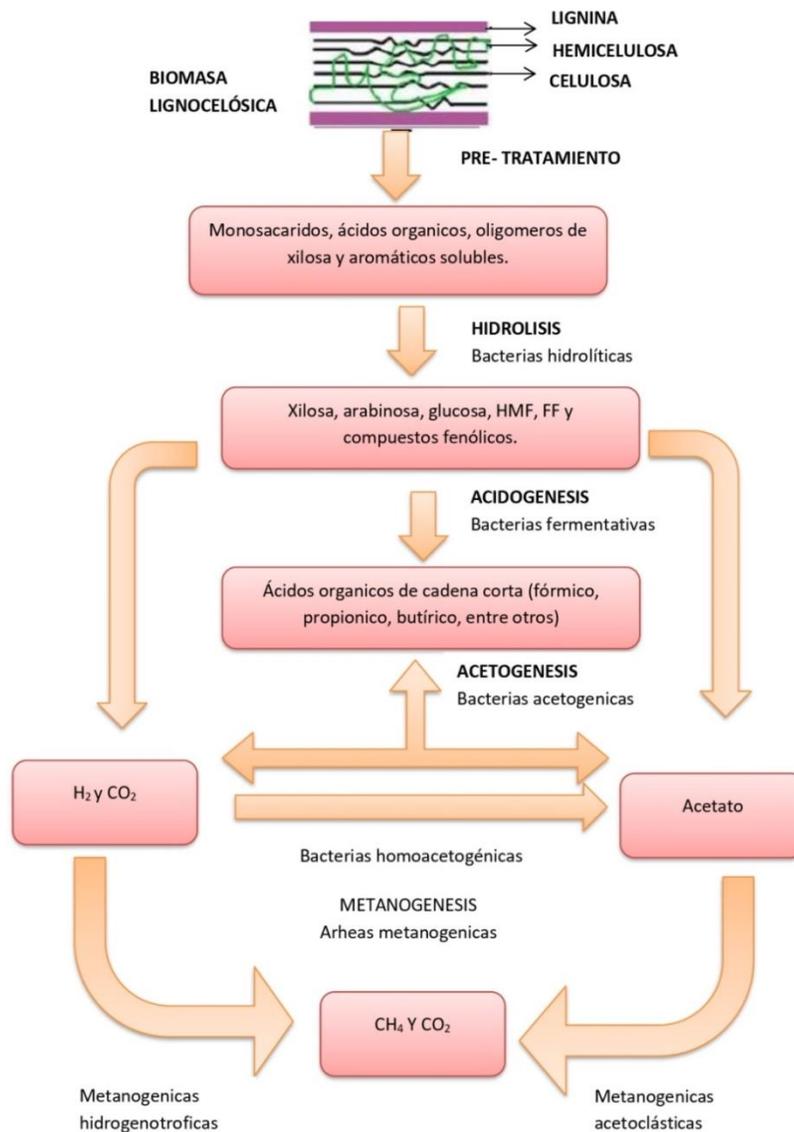


Figura 1. Pasos de la biomasa en la digestión anaerobia

Fuente: adaptado de SILVA ( 2019).

### 3.4.1 Pretratamiento de la biomasa lignocelulósica

Las propiedades de la biomasa lignocelulósica la hacen resistente a la biodegradación. Debido a la complejidad y variabilidad de las estructuras de biomasa química, el método y las condiciones

óptimas de pretratamiento dependen de los tipos de lignocelulosa presentes (ZHENG, ZHAO, XU, & LI, 2014).

El pretratamiento es una herramienta importante para los procesos prácticos de conversión de celulosa, se requiere un tratamiento previo para alterar la estructura de la biomasa celulósica para hacer que la celulosa sea más accesible a las enzimas que llevan a convertir los polímeros de carbohidratos en azúcares fermentables. El objetivo es romper el sello de lignina e interrumpir la estructura cristalina de celulosa (MOSIER et al., 2005).

Desde un punto de vista económico, el pretratamiento es un paso clave en el proceso de bioconversión porque debe mejorar la separación entre los componentes de la pared celular al tiempo que evita la formación de compuestos que inhiben los procesos posteriores de hidrólisis y fermentación.

La explosión de vapor es un proceso mediante el cual los materiales lignocelulósicos se exponen a vapor a alta presión en condiciones óptimas, seguido de enfriamiento rápido del contenido del reactor a un recipiente a presión (ciclón) por expansión adiabática.

### 3.5 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico en el cual microorganismos anaerobios convierten la materia orgánica en biogás. La DA puede realizarse en uno o más reactores, conocidos como digestores o biodigestores. La degradación de la materia orgánica por vía anaerobia se trata de un proceso bioquímicamente complejo, que está sujeto a la formación de diversos compuestos y reacciones intermediarias, catalizadas por diferentes microorganismos y enzimas (HERRERA, 2018).

El proceso de digestión anaerobia puede dividirse en cuatro etapas: i) hidrólisis, ii) acidogénesis, iii) acetogénesis y iv) metanogénesis. Las fases se realizan por diferentes tipos de microorganismos (bacterias y arqueas) que trabajan en condiciones de relación sintrófica entre sí (CHERNICHARO, 2007).

Estas reacciones incluyen: (1) hidrólisis anaeróbica donde, partículas orgánicas complejas hidrolizables tales como celulosa insoluble y hemicelulosa, se convierten en monómeros tales

como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga; (2) fermentación donde, los aminoácidos y azúcares se convierten en ácidos grasos volátiles; (3) acetogénesis donde, los ácidos grasos de cadena larga se convierten en acetato e hidrógeno; (4) oxidación anaeróbica donde, productos intermedios tales como ácidos grasos volátiles se convierten en acetato e hidrógeno; (5) metanogénesis acetoclástica donde el acetato se convierte en etano por metanógenos que utilizan ácidos; y (6) metanogénesis hidrogenotrófica donde, el hidrógeno se convierte en metano mediante metanógenos que utilizan hidrógeno (MYINT; NIRMALAKHANDAN., & SPEECE, 2007).

El tratamiento anaeróbico proporciona un método para reducir contaminación de operaciones agrícolas o industriales mientras al mismo tiempo, compensa el uso de fósiles por parte de las operaciones combustibles como uno de los residuos y aguas residuales más eficientes (CHEN, CHENG, & CREAMER, 2008).

### 3.5.1 Inhibición en la digestión anaerobia

Se muestra consideradamente en la digestión anaerobia la variación en los niveles de inhibición/toxicidad reportados para la mayoría de sustancias. La razón principal de estas variaciones es la complejidad del proceso de DA donde mecanismos como antagonismos, sinergias, aclimatación y la complejidad se afecta significativamente. La inhibición es generalmente indicada por una disminución de las tasas de estado estacionario de producción de gas metano y acumulación de ácidos orgánicos (CHEN, Y., CHENG, J. J., & CREAMER, K. S, 2008).

El amoníaco es un nutriente esencial para el crecimiento bacteriano, puede inhibir la metanogénesis durante el proceso de digestión anaeróbica si está disponible en altas concentraciones. Por lo tanto, el amoníaco se considera un inhibidor potencial durante la digestión anaeróbica, particularmente cuando se trata de tipos complejos de sustratos, como el estiércol o la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (OFMSW), (ORHAN, Y.;BURAK,D, 2013).

### 3.5.2 Ácidos grasos volátiles

Los ácidos grasos de cadena corta son un intermediario clave en el proceso de digestión anaeróbica y también son capaces de inhibir la metanogénesis en altas concentraciones. Los procesos anaeróbicos alteran el pH y particularmente la producción de ácidos grasos (SIEGERT, 2005).

### 3.6 Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)

El funcionamiento de un reactor anaerobio de flujo ascendente o UASB (upflow anaerobic sludge blanket) se basa en la formación de un denso manto de fango en la parte más profunda del reactor, donde tienen lugar todos los procesos biológicos. Este manto de fango se forma por la acumulación de los sólidos suspendidos contenidos en el afluente y el crecimiento de los microorganismos (GIMÉNEZ, 2014).

### 3.7 Vinaza

La vinaza es el producto de jarabe en la destilación del licor de fermentación de alcohol de caña de azúcar; Es un líquido residual, también conocido regionalmente como restyl y viñoto. Se produce en muchos países del mundo como un subproducto de la producción de alcohol; En vista de sus diferentes materias primas (caña de azúcar en América del Sur, remolacha azucarera en Europa, etc.), la vinaza tiene diferentes propiedades (M. A. S. SILVA, GRIEBELER, & BORGES, 2007). Es un efluente líquido caracterizado por presentar altos niveles de materia orgánica, nitrógeno y azufre. Actualmente grande parte de esta vinaza se utiliza en la fertirrigación, a pesar de que muchos estudios apuntan los impactos medioambientales derivados de dicha práctica y otros indican la posibilidad de utilización de este efluente para la producción de biogás a través de la digestión anaerobia (FUESS et al., 2018; FUESS, GARCIA E & ZAIAT, 2018).

En general, este efluente presenta un color oscuro y consiste básicamente en agua (93%) y sólidos orgánicos y minerales (7%)(CHRISTOFOLETTI et al., 2013).

### 3.8 Cenizas de la caldera

La utilización del bagazo de caña como combustible sólido genera un subproducto llamado cenizas cuya composición cualitativa y aplicaciones pueden variar de acuerdo con el material utilizado y con los parámetros del proceso de incineración como temperatura, tiempo de incineración y porcentaje de humedad del material incinerado, que se configuran, así como un material de composición y morfología heterogéneas (CACURO & WALDMAN, 2015). La cantidad media de generación de cenizas por la combustión del bagazo de caña es de 25 kg por cada tonelada de bagazo seco incinerado (SALES & LIMA, 2010), es decir, para una planta de medio porte (entre 1 y 2 millones de caña de azúcar, azúcar procesada) se generan alrededor de 1.800 toneladas de cenizas por cosecha. Estos valores confirman que es indispensable una correcta gestión de este residuo con el fin de minimizar los impactos ambientales asociados (HERRERA, 2018).

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Obtención del hidrolizado hemicelulósico del bagazo de caña

El hidrolizado se obtuvo a partir de un proceso de auto-hidrólisis de bagazo de caña que es realizado bajo la condición denominada CD4 Optimizada por Baeta, *et al.*, (2016). Fue caracterizada por la Temperatura de 182.9°C y tiempo de contacto de 40,7 min y relación líquido-sólido (RSL) de 4mL.g<sup>-1</sup> BC). Utilizando un reactor Parr, modelo 4848 para la producción del hidrolizado, que tiene una capacidad de 2L, la masa de bagazo de caña utilizada en los experimentos es de 120g (base seca).

El bagazo de caña pre-tratado es prensado a una fuerza de 9 toneladas en una prensa hidráulica marca Solab, modelo SL10/10/15/E, con rendimiento de aproximadamente 90%. El hidrolizado fue congelado a temperaturas de -20°C hasta la utilización para la solución de alimentación del reactor UASB.

#### 4.1.1. Análisis físico del hidrolizado

El análisis del hidrolizado hemicelulósico se realizó por medio de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) identificando los siguientes compuestos: azúcares (glucosa, xilosa, arabinosa), ácidos orgánicos (ácido fórmico, ácido acético), FF y HMF.

La determinación se realizó en el HPLC modelo SHIMADZU equipado con detector de índice de refracción (RID-6<sup>a</sup> SHIMADZU) y una columna Aminex HPX 87H (300 x 7,8 mm BIO-RAD). La solución de la fase móvil fue ácido sulfúrico 0,005 mol/L y el flujo en el cual la etapa móvil fue bombeada para el sistema con un caudal de 0,6 mL.min<sup>-1</sup>. La temperatura de la columna fue mantenida en 55°C en un horno modelo CTO-10A SHIMADZU.

Para la cuantificación de los compuestos anteriormente mencionados se utilizó un detector UV-Vis (SPD-10 A V SHIMADZU) operando de canal doble, con una longitud de onda para la determinación de los AGVs 210 nm y para determinación de FF y HMF 274nm.

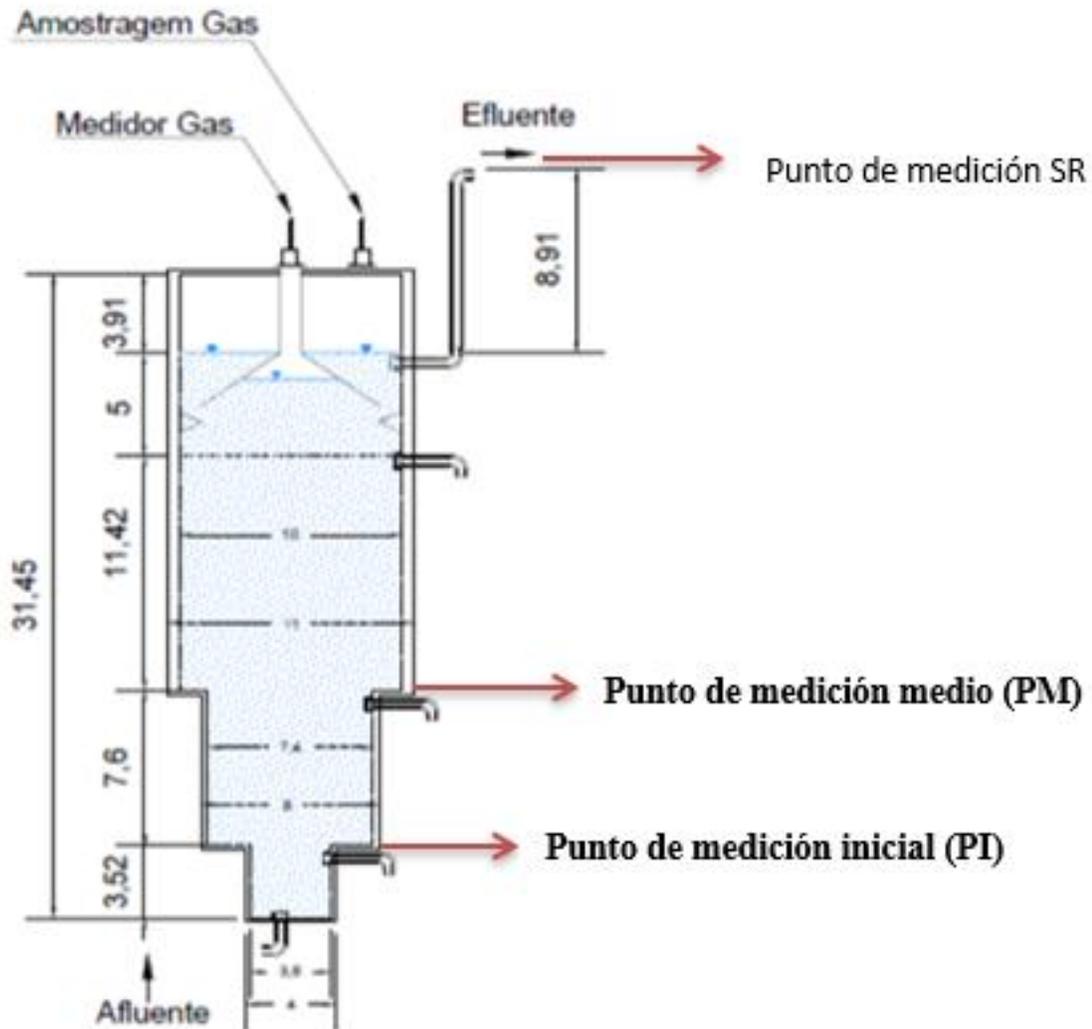
Demanda química de oxígeno (DQO) y el pH, fueron medidos de acuerdo a la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, WER, AWWA, 2005) Utilizando el método colorimétrico de reflujó cerrado, las muestras se calentaron en un termorreactor Dry Bock MA 4004, Marconi durante un tiempo de 2 horas a 148°C, por consiguiente se tomaron medidas en el espectrofotómetro HP UV-vis, modelo 8453 a una longitud de 610 nm, sólidos totales y sólidos suspendidos volátiles (métodos 2540E e 2540B).

#### 4.2. Caracterización de la vinaza

Se medió la DQO respecto a la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, WER, AWWA, 2005) y el pH, sólidos totales y sólidos suspensos volátiles según (métodos 2540E e 2540B), la determinación de azúcares, AGVs, HMF y FF, se realizó por medio de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) basados en los métodos mencionados en ítem 4.1.1.

#### 4.3 Biorreactor

Se utilizó un reactor UASB para la realización de este trabajo inicialmente operado por (HERRERA, 2019), como se muestra en la figura 2 e inoculado con una mezcla de estiércol bovino fresco adicionando cenizas volantes de bagazo de caña de azúcar (SBFA) con condiciones del inóculo de ADARME (2019). El volumen de diseño fue de 1,6L, este fue construido con policloruro de vinilo (PVC), es un material de bajo costo el cual permite una fácil manipulación para el mantenimiento.



#### 4.5 medición de Biogás.

La medición del biogás producido se cuantificó utilizando los medidores *Ritter MilliGascounter*® como se presenta en la Figura 3, fue registrada la medición en intervalos de 24 horas reiniciando el medidor consiguientemente. El volumen de gas es cuantificado por medio de inclinaciones de la celda de medición con una resolución de  $\pm 3$  ml/pulso continuamente siendo el gas evacuado por una boquilla. El flujo de biogás es transmitido por una manguera desde el reactor UASB hasta el

medidor subiendo el gas como pequeñas burbujas a través del líquido del medidor (HCL 0,5mol), este medidor tiene dos cámaras para determinado volumen de gas, por tal razón cuando una de las cámaras se llena hace que la celda de medición se vuelque para empezar el conteo en la cámara vacía, cada vez que se voltea la celda se hace una medida de pulso. La inclinación de la celda de medición permite que se registre mediante sensores magnéticos cada movimiento y el sistema cuente el volumen acumulativo (OTALORA, 2018).

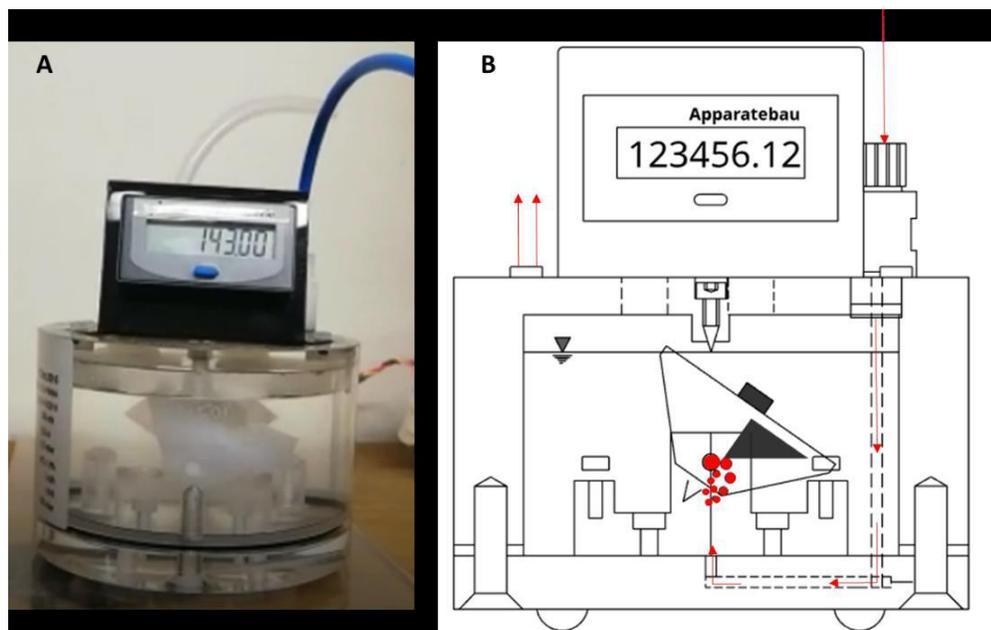


Figura 2. Medidor de biogás en la operación

Fuente: (OTALORA, 2018)

#### 4.6 Operación del reactor UASB

El reactor tuvo un volumen de trabajo de 1,6L y conto con un sistema de control de temperatura, durante su operación cuantificado el flujo de biogás producido diariamente con medidores *Ritter MilliGascounter*®.

Además, se midió la composición del biogás diaria por cromatografía gaseosa y la DQO del efluente con el fin de obtener el porcentaje de remoción los parámetros y frecuencia de medición como se encuentran contemplados en la tabla 1.

El reactor fue operado por 68 días en continuo, alimentado de manera hidráulica con una bomba peristáltica donde se pudo adaptar su caudal más bajo, pero sin embargo el reactor tuvo un TRH bajo, por lo cual se adaptó una tubería para conseguir alimentar de manera semicontinua manualmente cada 8.5 horas un litro de alimentación y se operó el sistema por 30 días.

Tabla 1. Frecuencia de monitoreo

Parámetro	Intervalo de análisis	Técnica
pH	Diario	Potenciométrico
Temperatura	Diario	Medición digital
DQO	2 veces por semana	Espectrofotometría
Azúcares, AGVs y Furanos	1 vez por semana	Cromatografía Líquida
Producción y composición de Biogás	Diario	Cromatografía gaseosa
STV	1 vez por semana	Determinación gravimétrica y calcinación

Los métodos utilizados para la medición de los aspectos correspondientes a la tabla 1 fueron:

- pH: el pH fue medido por un pHmetro 827 marca Metrohm.
- DQOs: Se ha realizado respecto a la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA/AWWA/WEF, 2005). Utilizando el método colorimétrico de reflujó cerrado, las muestras se calentaron en un termorreactor Dry Bock MA 4004, Marconi durante un tiempo de 2 horas a 148°C, por consiguiente, se tomaron medidas en el espectrofotómetro HP UV-vis, modelo 8453 a una longitud de 610 nm.
- Azúcares, AGVs y Furanos: Fueron analizados por medio de cromatografía de alta resolución (HPLC) modelo SHIMADZU equipado con detector de índice de refracción (RID-6<sup>a</sup> SHIMADZU) y una columna Aminex HPX 87H (300 x 7,8 mm BIO-RAD).
- Composición de biogás: Se analizaron las mediciones por medio de cromatografía gaseosa en un equipo modelo SHIMADZU GC-2014, equipado con un detector de conductividad térmica (TCD), y una columna Rt- Msieve 5<sup>a</sup> (30mx0,53mm x50µm), usando nitrógeno

como gas de arrastre, la temperatura de la columna trabajó a 120°C. La muestra de Biogás tomada del Headspace del reactor UASB fue retirado en una jeringa de vidrio GAS Tight 2.5 mL. La cuantificación de biogás es basada en una curva de calibración realizada mediante la inyección de un gas patrón, preparada por la empresa OXIMIL (Oxígeno Minas Gerais Ltda). El gas contiene una mezcla de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>. Siendo la fracción molar del metano igual a 24,9%, en un tiempo aproximado de cada corrida de 5 minutos.

#### 4.6.1. Preparación del sustrato para el reactor UASB utilizando la codigestión de vinaza e hidrolizado de caña

Se realizó la solución de alimentación utilizando la relación 25% y 75% de vinaza tomando la muestra de Agropéu Sugar e hidrolizado que fueron proporcionadas por Jabiboca Sugar and Ethanol con un pretratamiento hecho por Adarme et al., (2019) el cual presenta que esta relación conduce a mayor producción de metano, por lo tanto se adicionó 45ml de hidrolizado hemicelulósico de bagazo de caña, 135 ml de vinaza aforando a 6L adicionando agua, adicionalmente se controló su pH con bicarbonato de sodio para que nos dé una solución buffer a un pH de 7.0.

#### 4.6.2 Medición de los azúcares en el efluente líquido durante la operación del reactor

Se realizó la medición de los azúcares glucosa, xilosa y arabinosa en tres puntos de medición en el reactor punto inicial (PI), punto medio (PM) y efluente (SR) para determinar el comportamiento de cada uno de los azúcares. La medición se realizó por HPLC, esta medición se realizó 2 veces por semana.

#### 4.6.3 Medición de los AGV en el efluente líquido durante la operación del reactor

Se realizó la medición de los AGV (fórmico, acético, propiónico, isobutírico, butírico, valérico e isovalérico) en el punto inicial (PI), punto medio (PM) y efluente (SR). La medición se llevó a cabo por HPLC respecto al método mencionado en el ítem 4.1.1.

#### 4.6.4 Medición de los inhibidores furfuraldehído (FF) y hidroximetilfurfural (HMF)

Esta medición se realizó dos veces por semana en el punto inicial (PI), punto medio (PM) y efluente (SR) durante la operación del reactor. La medición se realizó usando HPLC. Las condiciones cromatográficas para FF y HMF fueron iguales a las usadas para la determinación de los azúcares, lo único que varió fue el tipo de detector empleado para la cuantificación de los compuestos. Los aldehídos fueron cuantificados utilizando un detector UV-Vis (SPD-10 A V SHIMADZU) operando en canal doble, siendo la longitud de onda para la determinación de FF y HMF 274 nm.

#### 4.6.5 Balance de masa

Los balances de masa fueron realizados en unidades de DQO, a través de las reacciones de oxidación, se identificaron azúcares (glucosa, xilosa, arabinosa), y ácidos orgánicos (acético, propiónico, butírico, isobutírico, valérico, isovalérico) y los compuestos HMF y FF.

El factor de conversión para cada uno de los compuestos es presentado en la tabla 2.

Tabla 2. Factores de conversión a unidades de DQO

<b>Compuesto</b>	<b>Reacción de oxidación</b>	<b>Factor de equivalencia</b> <b>(g DQO . g Compuesto)</b>
Glucosa (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> )	$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$	1.45
Xilosa (C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> )	$C_5H_{10}O_5 + 5O_2 \rightarrow 5CO_2 + 5H_2O$	1.07
Arabinosa (C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> )	$C_5H_{10}O_5 + 5O_2 \rightarrow 5CO_2 + 5H_2O$	1.07
Ácido fórmico (CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	$2CH_2O_2 + O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	1,39
Ácido acético (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> )	$C_2H_4O_2 + 2O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	1.07
Ácido propiónico(C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> )	$2C_3H_6O_2 + 7O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$	3.02
Ácido Butírico (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> )	$C_4H_8O_2 + 5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 4H_2O$	1.82
Ácido Isobutírico (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> )	$C_4H_8O_2 + 5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 4H_2O$	1.82

Ácido Valerico (C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub> )	$2C_5H_{10}O_2 + 13O_2 \rightarrow 10CO_2 + 10H_2O$	2.04
Ácido Isovalerico (C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub> )	$2C_5H_{10}O_2 + 13O_2 \rightarrow 10CO_2 + 10H_2O$	2.04
HMF (C <sub>6</sub> O <sub>6</sub> O <sub>3</sub> )	$C_6O_6O_3 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 3H_2O$	1.52
FF (C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> )	$2C_5H_4O_2 + 5O_2 \rightarrow 5CO_2 + 2H_2O$	1.67
Metano CH <sub>4</sub>	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	4

---

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Pretratamiento de bagazo de caña

Durante la operación del reactor se realizó 25 veces el pretratamiento de autohidrólisis descrita en la metodología en el ítem 4.1, se observa en la figura 4 la velocidad de la variación de temperatura del hidrolizado. Donde se evidencia que la temperatura promedio de los pretratamientos fue de 182,3°C y tiempo promedio de 63,92 minutos, con un factor de severidad de 3,86 lo cual representa un valor bajo. En los pretratamientos se obtuvo un tiempo menor de 52 min y temperatura mayor de 185°C.

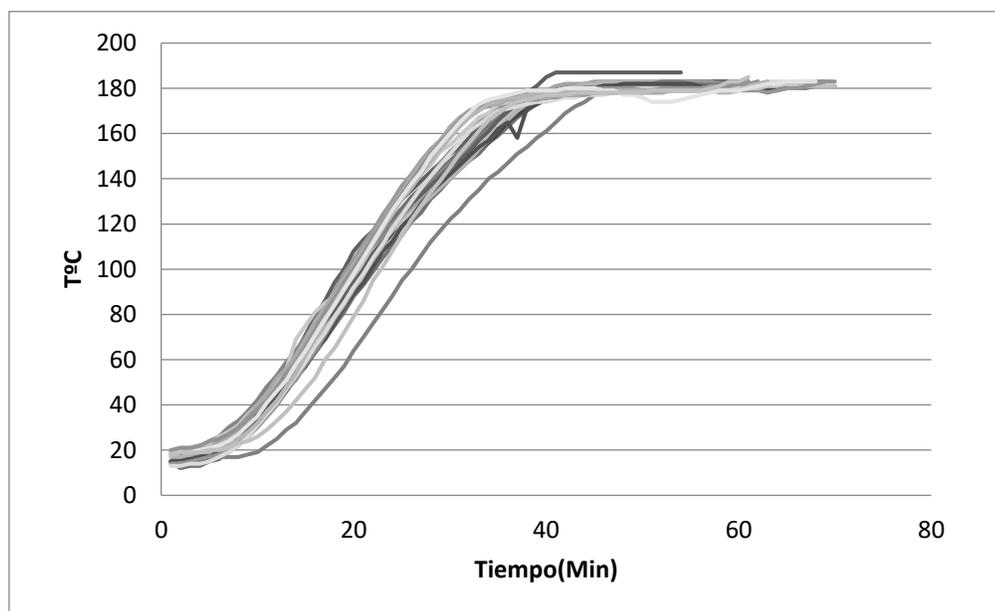


Figura 3. Velocidad de la autohidrólisis en cada ensayo

### 5.1.1 Caracterización del Hidrolizado hemicelulósico

Para la caracterización del hidrolizado hemiceluloso fueron estudiadas las variables de pH y DQO, ácidos orgánicos, azúcares, productos de degradación de azúcar (FF y HMF).

La variable pH tuvo un valor promedio de 3.4 como se muestra en la figura 5, esto se debe probablemente a la presencia de ácido acético y ácido fórmico producidos en el pretratamiento de autohidrólisis.

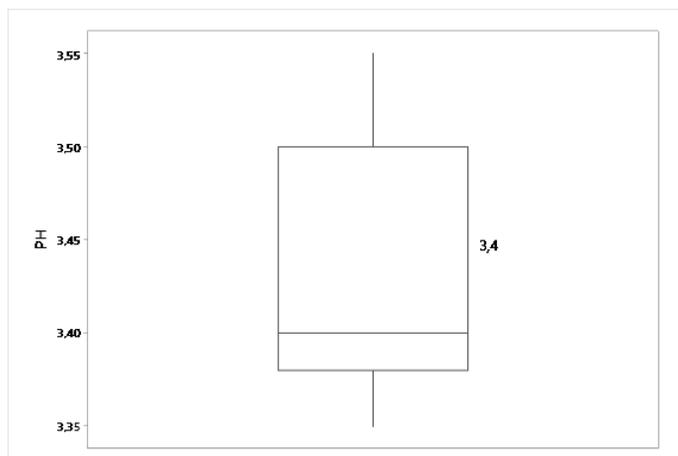


Figura 4. pH del hidrolizado

Como se muestra en la figura 6, el azúcar predominante en el hidrolizado fue xilosa (1,96 gDQO/L) representando el 49%, también se identificaron las concentraciones de glucosa (1,42gDQO/L) y arabinosa (0,63gDQO/L). La xilosa es el principal componente monosacárido de las hemicelulosas (RIBEIRO et al., 2017). Ya que la hemicelulosa se hidroliza más fácilmente que la celulosa (ANTUNES et al., 2014). Seguidamente la glucosa puede derivarse de la fracción celulósica o de algunos heteropolímeros de la fracción hemicelulósica, la glucosa es importante porque es la principal fuente de carbono para los microorganismos. (PATTRA et al., 2008). La arabinosa es un azúcar formado a partir de arabinosilanos, heteropolímeros hemicelulósicos que se encuentran en materiales agrícolas como el BC (PATTRA et al., 2008), la arabinosa se presentó en más baja concentración en comparación a la glucosa y la xilosa.

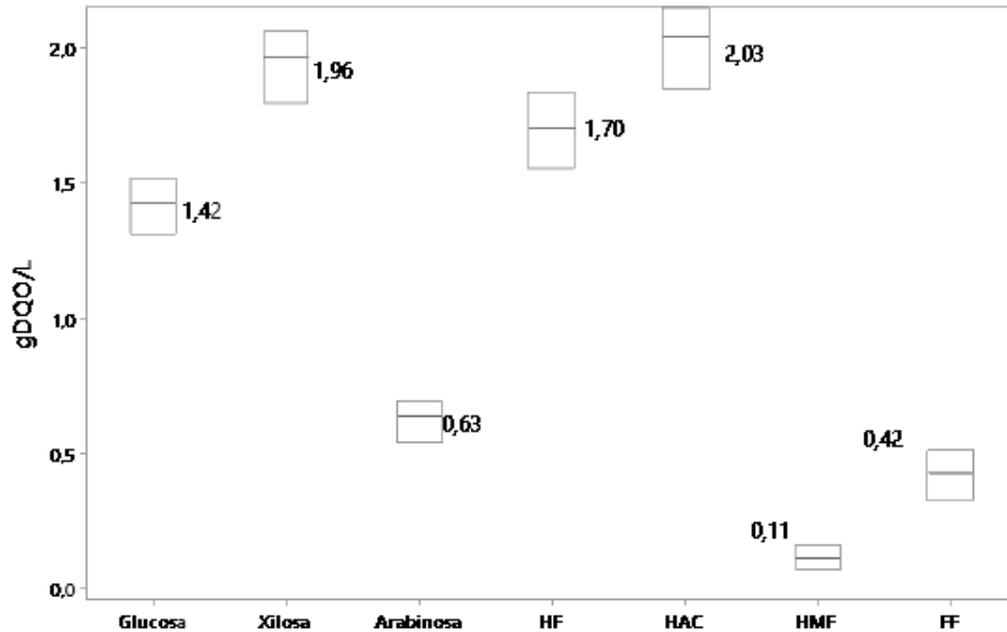


Figura 5.caracterización del hidrólizado

Asimismo, las condiciones del pretratamiento condujeron a la degradación parcial de pentosas y hexosas, generando una baja formación de tóxicos 5-hidroximetil-2-furfural (HMF) y Fulfural (FF),(RIBEIRO et al.,2017), se detectaron en concentraciones de 0,11gDQO/L y 0,42gDQO/L respectivamente. Se ha informado que FF tiene un efecto negativo sobre los microorganismos por reducción de las actividades enzimáticas y biológicas,(PATTRA et al., 2008), sin embargo las concentraciones encontradas fueron bajas.

La DQO del hidrolizado fue de aproximadamente 77,63 gDQO/L es una concentración alta, lo cual se requiere una dilución antes del tratamiento debido a la presencia de algunas sustancias inhibidoras, ya que la OLR es un parámetro importante que afecta significativamente la ecología microbiana y las características de los sistemas anaerobios (TURKDOGAN-AYDINOL & YETILMEZSOY, 2010).

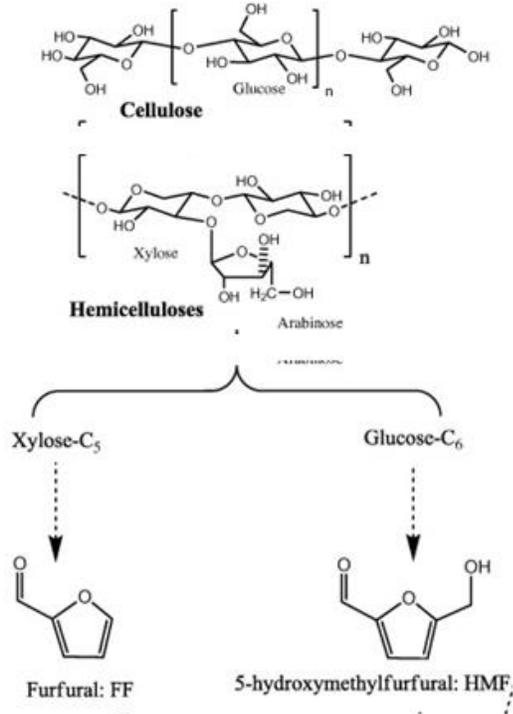


Figura 6. Estructura de biopolímeros lignocelulósicos y vía de formación de furanos

Fuente: Modificado de Barakat, Monlau, Steyer, & Carrere, (2012)

## 5.2 Caracterización de la vinaza

Para la caracterización de la vinaza fueron estudiadas las variables de pH y DQO, ácidos orgánicos, azúcares, productos de degradación de azúcar (FF y HMF).

La composición química de la vinaza de caña de azúcar varía según la planta utilizada para la producción de etanol y el proceso de destilación. Por lo tanto, los efluentes de la destilación de melaza y jugo de caña de azúcar son diferentes (CHRISTOFOLETTI et al., 2013).

El promedio de pH de la vinaza fue de 3.9 como lo se muestra en la figura 8. Según Christofolletti et al., (2013) identificaron la toxicidad de la vinaza por el bajo valor en el pH, su alto nivel de corrosividad y altos niveles en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en diferentes ambientes aplicados, también así como la toxicidad que puede impactar a diferentes microorganismos, haciendo una relación de la reducción de la toxicidad después del ajuste del pH.

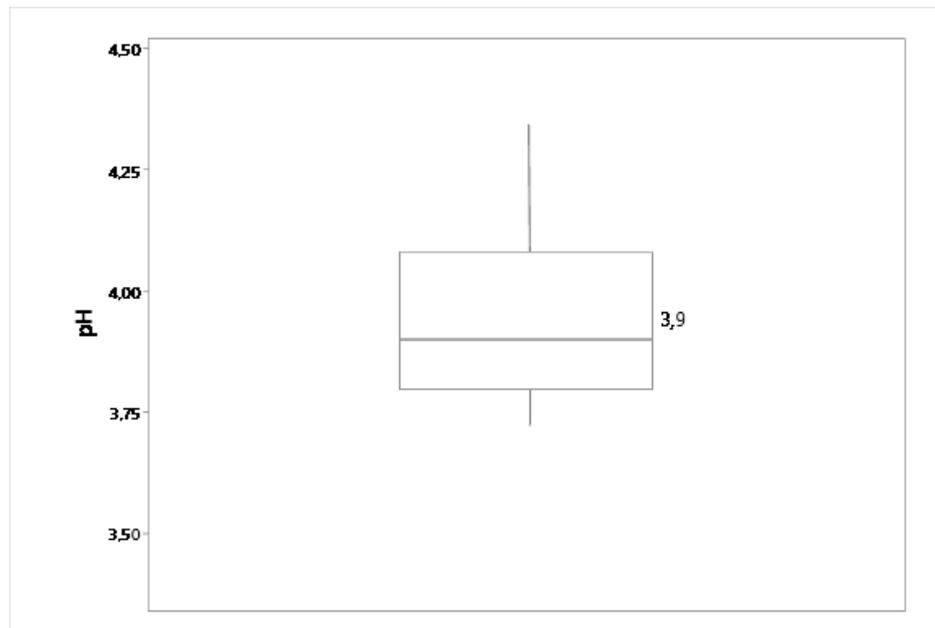


Figura 7. pH de la vinaza

En la figura 9, se muestra la caracterización de la vinaza evidenciándose en mayor concentración el ácido acético, se puede decir que es un precursor para la producción de metano y puede ser beneficiosa la utilización de este como sustrato. Así como también en los azúcares se encuentra la mayor concentración en la xilosa, el cual es un componente monosacárido que tiende a degradarse más fácilmente y de una igual manera la glucosa. La vinaza obtuvo una DQO de 22,98 gDQO/L que con respecto con la investigación de Fuess, et al (2018) el valor se encuentra dentro del rango de los valores obtenidos de los compuestos evaluados, así como también se presentan valores semejantes en el HAc. La vinaza de caña de azúcar muestra un potencial de concentración de DQO como una alta carga orgánica, así también la concentración de AGVs puede ser aplicada y relacionada para la producción de metano en una digestión anaerobia. La utilización de la vinaza como sustrato ayudaría a disminuir la cantidad de la misma, utilizada en fertirrigaciones disminuyendo así los impactos generados en el subsuelo.

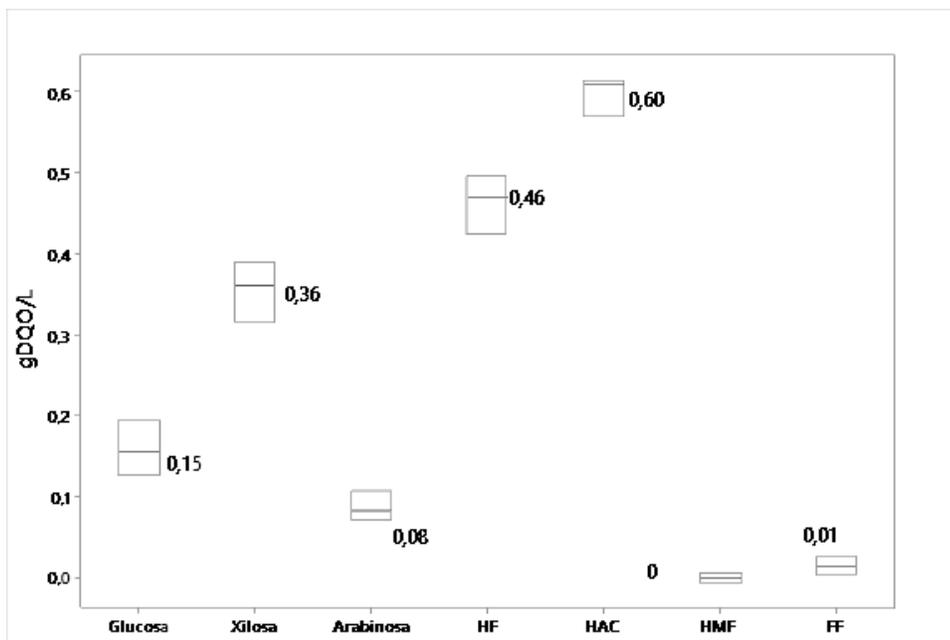


Figura 8. Caracterización de la vinaza

Fuente: Autor

### 5.3 Monitoreo del reactor UASB

Se realizó una comparación en el sistema, alimentando en continuo por un tiempo de operación de 68 días y semicontinuo en un tiempo 30 días, para identificar la eficiencia de producción de biogás y así observar la comparación de los parámetros evaluados en el reactor, en la tabla 3 se muestran los principales parámetros medidos.

Tabla 3. Parámetros medidos en el reactor

<b>Parámetro</b>	<b>Continuo</b>	<b>Semicontinuo</b>
Tiempo de operación (Días)	68	30
TRH (Horas)	7,8	8,5
pH Efluente	7,26± 0,80	7,32± 0,04
Temperatura (°C)	35	35
Caudal (ml/min)	3,39±3,33	400±5,8
DQO Sustrato	1060,79±284,8	1060,79±284,8
OLR (Kg/m <sup>3</sup> .d)	3,26	2,99

### 5.3.1 pH

En la Figura 10, se muestra que el pH de la SR obtuvo un valor en la mediana de 7.35 en el sistema continuo y 7,27 en semicontinuo, lo cual identifica un pH óptimo para el tratamiento ya que las bacterias de metano son muy sensibles al pH, estas necesitan un pH en un rango de 6.5 y 7.8 (TURKDOGAN-AYDINOL & YETILMEZSOY, 2010). Según Zhang, Ban, Li, & Wan, (2019) el pH influye directamente con la remoción de DQO y el rendimiento en la producción de metano, puesto que en condiciones ácidas (pH 5,0-6,0) se inhibe el rendimiento del metano y se reduce la eficiencia de remoción de la DQO. El pH en un digestor anaeróbico es un factor crucial para decidir la estabilidad del proceso, debido a esto el pH del sustrato del reactor siempre fue equilibrado a 7.0.

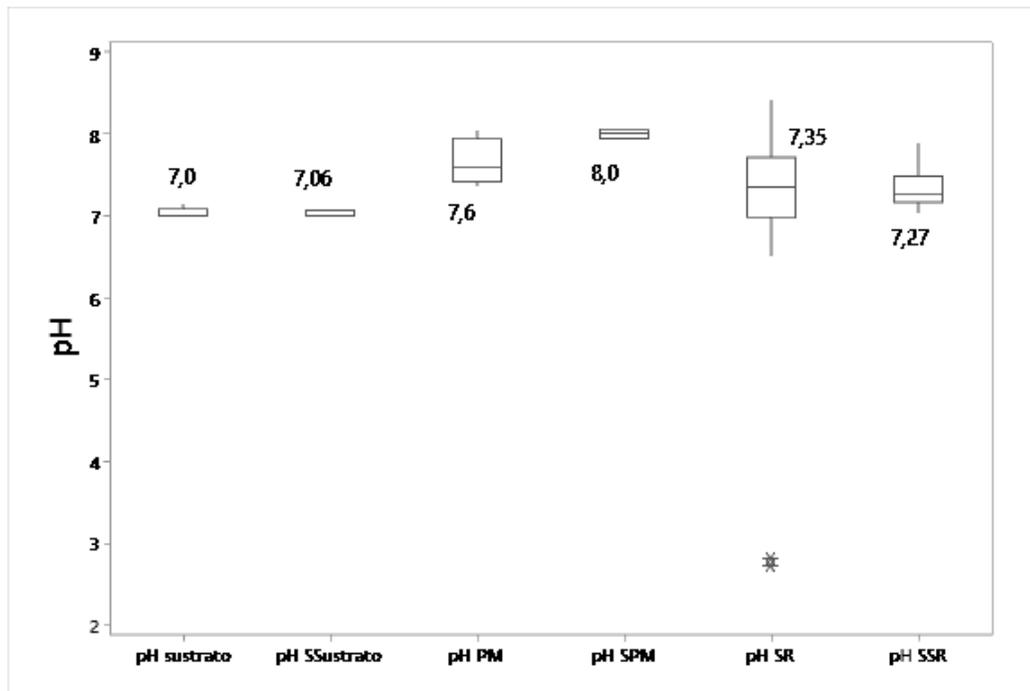


Figura 9. pH en sistema continuo y semicontinuo de los puntos de medición Sustrato, PM, SR

### 5.3.2 Porcentaje de remoción de DQO

En la figura 11 se muestran los porcentajes de remoción, tanto en el sistema alimentado en continuo y alimentado en semicontinuo, se tomaron mediciones en el punto inicial (PI) punto medio (PM) y efluente (SR), esta medición se tomó respecto al valor de la DQO del sustrato, y todos los datos presentados fueron tomados en el tiempo de operación del reactor.

Los valores obtenidos demuestran claramente que el porcentaje removido en el sistema en semicontinuo es más alto en cada uno de los puntos, esto se debe a que tiene mayor tiempo de retención hidráulico y también una OLR menor, por lo tanto, es posible decir que hay un efecto de la carga orgánica en la performance del sistema. Esto es un indicativo que posiblemente hay una sustancia en el sustrato que con el aumento de la carga aplicada pueden dificultar la degradación. Seguidamente también se puede observar que el punto donde más porcentaje es removido es el punto medio del sistema en semicontinuo (ERS PM), probablemente es porque en esta fase del reactor se encuentra la mayor parte de biomasa acumulada y por lo tanto la mayor parte de microorganismos, en efecto también se debe a el tiempo de retención hidráulico es mayor.

En la remoción del sistema continuo se encuentra un porcentaje ascendente respecto al punto anterior, tal como se muestra en el punto inicial (PI) donde se obtuvo 29,35%, en el punto medio (PM) el 45,31% y en el efluente (SR) %59,0, puede deberse a la pequeña recirculación del sistema.

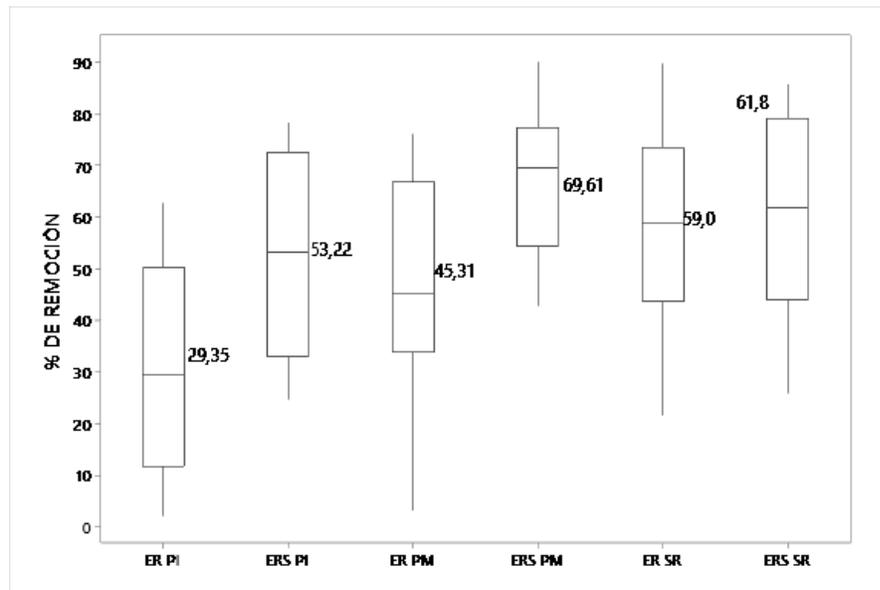


Figura 10. % de remoción de los puntos de medición PI, PM Y SR en continuo y semicontinuo

### 5.3.3 Producción de CH<sub>4</sub> con la codigestión de vinaza e hidrolizado hemicelulósico

En la figura 12. Se muestra el porcentaje de producción de CH<sub>4</sub> y la producción acumulada NmLCH<sub>4</sub>/día en el sistema operado en continuo, durante 68 días y en semicontinuo durante 30 días. Donde el porcentaje, fue mayor en el sistema semicontinuo con un valor de 21,63%, sin embargo, respecto a la medición del caudal es menor la producción medida de CH<sub>4</sub>, esto se debe a que el biogás producido se está quedando retenido en el sistema ya que el reactor no cuenta con una recirculación interna, por lo cual se solubiliza en el líquido y en la fase sólida.

En el sistema operado en continuo fue menor el porcentaje de CH<sub>4</sub> con un valor de 14,62% y se obtuvo un mayor caudal de producción de metano, lo que representa que como se tenía una recirculación en el sistema, la medición fue mayor, pero sin embargo la composición medida de

CH<sub>4</sub> fue más baja, también se tiene presente que la producción de metano durante el tiempo de operación fue inestable, en general puede deberse al bajo TRH.

Sin embargo, el sustrato del reactor puede que no influya directamente en el bajo rendimiento en el sistema, según Adarme et al. (2019) la relación de 25% -75% de Hidrolizado Hemiceluloso y vinaza fueron las concentraciones de mayor producción de metano.

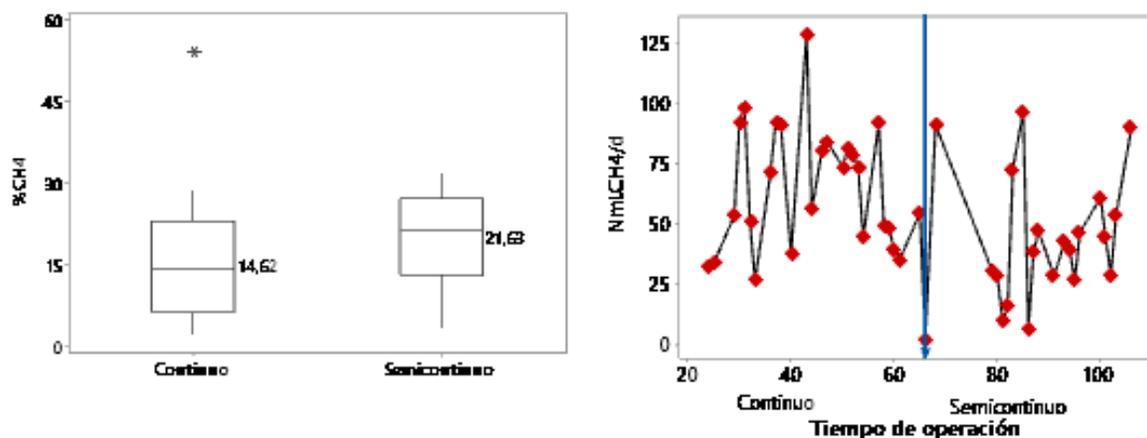


Figura 11. . % de producción acumulada de CH<sub>4</sub> y producción acumulada de CH<sub>4</sub> en Nml/día

#### 5.3.4 Ácidos grasos volátiles (AGVs)

En la tabla 4 se presentan la composición del sustrato del reactor en el tiempo de operación cuanto, a los Azúcares, AGVs y FF.

Tabla 4. Caracterización de sustrato del reactor

COMPUESTO	CONCENTRACIÓN
	mg DQO/L
Glucosa	117,624

Xilosa	71,0159
Ácido formico	50,0919
Ácido Acético	92,5498
Ácido Propiónico	47,3343
Ácido Isobutírico	11,0389
Ácido Butírico	33,4191
Ácido isovalérico	18,2339
Ácido Valérico	15,4938
FF	13,2431

---

En la figura 13 y 14 se muestra la composición de AGVs durante el periodo de operación del reactor alimentado en continuo y semicontinuo respectivamente, se muestran los valores de los tres puntos monitoreados (PI, PM Y SR). Los ácidos orgánicos son subproductos de las primeras etapas de la digestión anaerobia; sin embargo, la acumulación de estos compuestos intermedios puede limitar la metanogénesis debido a inhibiciones termodinámicas (Ribeiro et al., 2017).

En la figura 13 se muestra los AGVs en el sistema en continuo donde se evidencia que la producción en mayor proporción fue la de ácido acético, en cada uno de los puntos de medición con valores de 61.07, 105.37 y 75,40 mgDQO/L respectivamente. El ácido acético y el ácido butírico son los precursores significativamente preferidos para la producción de biometano,

De manera general se presentan mayores concentraciones en Ácido Acético, Ácido Propiónico, Ácido Isobutírico y Ácido Butírico, donde la relación HProp/HAc en el sistema en continuo fue de 0,66 según Hill, Cobb, & Bolte (1987), se presenta una fuerte relación en la productividad de metano basados en la relación de Hprop/HAc, el sistema se encuentra de una forma estable ya que cuando se presenta la relación mayor a 1,4 se indica una falla inminente en el sistema. Se muestra en la figura 13 la disminución de producción de AGVs en el punto medio, ya que solo se presentaron concentraciones en Ácido Acético, Ácido Propiónico, Ácido Butírico, esto puede deberse a la mayor conversión de AGVs para convertir a metano.

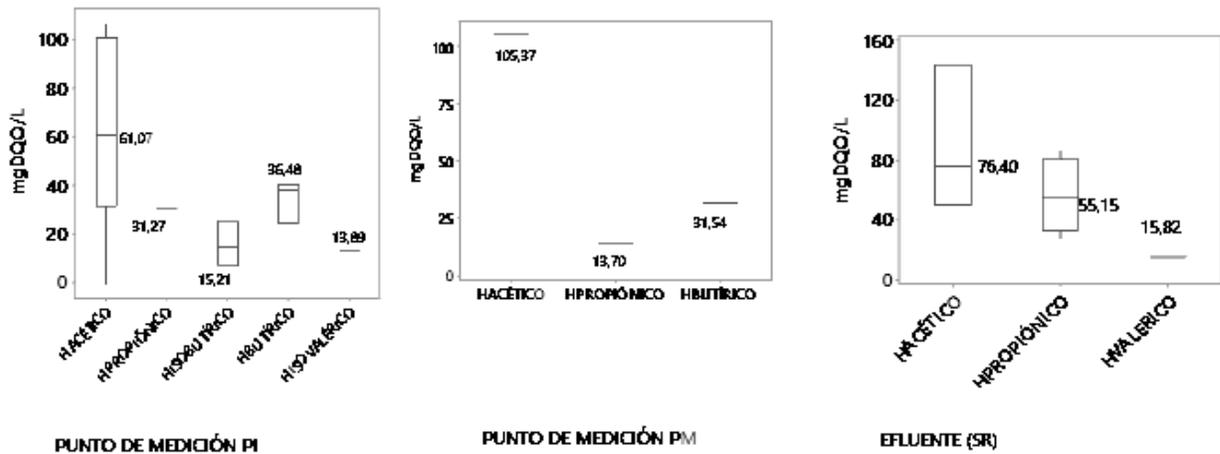


Figura 12. AGVs Evaluados en el sistema en continuo

En la figura 14 se muestra los AGVs en el sistema en semicontinuo donde solo se obtuvieron concentraciones de Ácido Acético y Ácido Propiónico, en el punto de medición media no se presentaron concentraciones de AGVs sin embargo en el efluente del reactor se presenta mayor concentración de Ácido propiónico que tampoco se presentó en el PI puede ser producto de la mantención en las eficiencias de remoción de DQO durante la etapa acidogénica, esto puede ser lo haya influido en haber aumentado la presión parcial de  $H_2$  dentro del reactor ya que se no se tiene recirculación en el sistema y puede que se haya generado una mudanza de la ruta metabólica de acético/butírico para propiónico (Cordeiro, 2018), la relación HProp/HAc fue de 1,1 que también se encuentra el sistema en un rango estable según Hill, Cobb, & Bolte (1987).

Respecto a los datos presentados el sistema semicontinuo se ha demostrado una mayor estabilidad en función del menor acumulo de AGVs y esto puede ser uno de los motivos de una mayor remoción de DQO en este sistema.

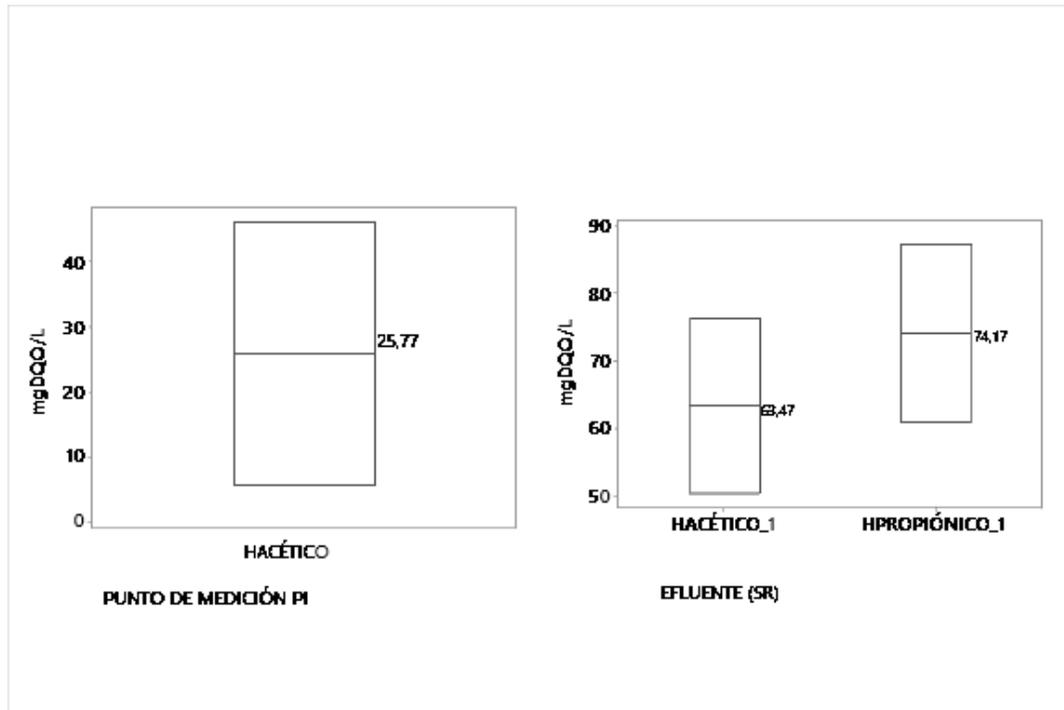


Figura 13. AGVs evaluados en el sistema en semicontinuo

Respecto a la evaluación de las azúcares, durante los puntos de medición no se presentaron azúcares, lo cual puede deberse al consumo de los microorganismos para convertir en AGVs y metano.

### 5.3.5 Inhibidores HMF Y FF

En la figura 15 se muestra la concentración de los inhibidores en continuo y semicontinuo donde fueron evaluados los tres puntos de medición, se evidencia que únicamente hubo concentración en el PI y SR, donde se presenta mayor cantidad en el PI del sistema en continuo con un valor en la media de 13,24 mg DQO/L, que sin embargo se presenta la misma media en cada uno de los puntos presentados, pero que evidenciado rango de la gráfica su cantidad fue mayor, lo que indica que puede que el resto de concentración fue adsorbido por las cenizas de la caldera (SBFA), Adarme et al., (2019) evaluaron el SBFA como adsorbente de los compuestos furfúricos tóxicos (FF Y HMF), que presentó un desempeño óptimo para la adsorción de compuestos inhibidores durante

la codigestión anaerobia en cinética trabajada por lotes, sin embargo puede atribuirse que esté ocurriendo la absorción en el sistema.

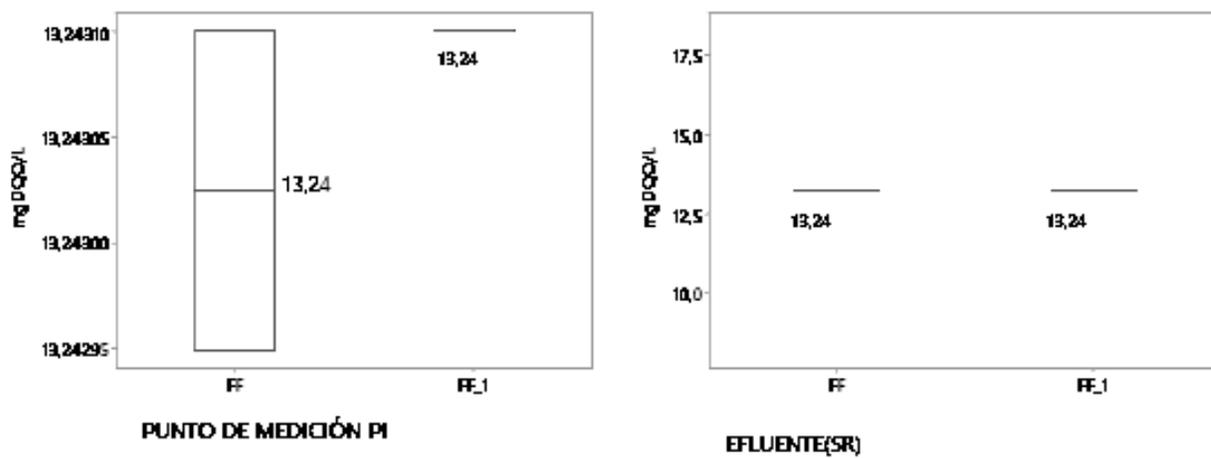


Figura 14. Inhibidores FF

## 6. CONCLUSIONES

- El pretratamiento del hidrolizado de BC se realizó y se caracterizó con respecto lo presentado en la literatura se presentan valores también muy semejantes lo que indica un rendimiento óptimo.
- Se logró evidenciar la inestabilidad en la producción de CH<sub>4</sub> en el reactor, donde su producción fue menor al 50%.
- Se demostró que el sistema en semicontinuo fue donde se obtuvieron los parámetros de medición más estables, ya que presentó mayor remoción de DQO, menor producción de AGVs y mayor porcentaje de metano.
- En el sistema en continuo se logra observar que la medición de metano en NmlCH<sub>4</sub>/d fue mayor, esto puede ser debido a la pequeña recirculación que se encuentra en el sistema lo que lleva a que el biogás salga del reactor, lo que fue inverso a lo ocurrido en el sistema semicontinuo.
- El pH del reactor estuvo en rango estable durante la operación por lo que no se alteró el sistema para los microorganismos metanogénicos.
- Se presentó en el sistema semicontinuo un cambio de ruta metabólica en el sistema, debido a la retención de biogás dentro del reactor.
- Los Azúcares fueron consumidos con respecto a los valores de concentraciones en el HPLC esto ocurre por el aprovechamiento como fuente de carbono de los microorganismos para producción de AGVs y CH<sub>4</sub>.
- Se presenta una disminución en los inhibidores FF en el sistema debido al inóculo utilizado.
- Los resultados mostraron la posibilidad de utilizar la codigestion del hidrolizado y vinaza como sustrato para la digestión anaerobia, teniendo como objetivo la producción de metano, así como también tener en cuenta su dilución por su alta carga orgánica que puede inhibir el sistema.

## 7. RECOMENDACIONES

- Evaluar el reactor con un mayor TRH en el sistema continuo para buscar un equilibrio en el sistema y operar a OLR diferentes.
- Operar por más tiempo el reactor en semicontinuo y adaptar el sistema para recirculación interna evaluando así en mejor forma la producción de metano.
- Evaluar los dos sistemas con el mismo tiempo en la operación para realizar una comparación más precisa respecto a la recolecta de datos.
- Evaluar los SSV en más frecuencia asimismo en diferentes puntos de medición para poder observar el crecimiento de la biomasa.

## 8. REFERENCIAS

ADARME, H., EDUARDO, B., BAÊTA, L., BALENA, J., FILHO, G., ... AQUINO, S. F. DE. Biorefinery Use of anaerobic co-digestion as an alternative to add value to sugarcane biorefinery wastes. *Bioresource Technology*, 287(May), 121443. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121443>

ABDELRASOUL, A., AL-HADAD, A., & KHAN, A. Oil Refineries Emissions Impact on Urban Localities Using AERMOD. *American Journal Of Environmental Sciences*, 6 (6), 505-5015. (2010).

ANTUNES, F. A. F., CHANDEL, A. K., MILESSI, T. S. S., SANTOS, J. C., ROSA, C. A., & SILVA, S. S. Bioethanol Production from Sugarcane Bagasse by a Novel Brazilian Pentose Fermenting Yeast *Scheffersomyces shehatae* UFMG-HM 52 . 2 : Evaluation of Fermentation Medium. 2014.

BAÊTA, B. E. L. Aproveitamento energético a partir da digestão anaeróbia de hidrolisado hemicelulósico gerado pelo pré-tratamento por auto-hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar considerando o contexto da biorrefinaria. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP, p.93. (2016).

BAÊTA, B. E. L., LIMA, D. R. S., ADARME, O. F. H., GURGEL, L. V. A., & AQUINO, S. F. de. Optimization of sugarcane bagasse autohydrolysis for methane production from hemicellulose hydrolyzates in a biorefinery concept. *Bioresource Technology*, 200, 137–146. (2016).

BAÊTA, B. E. L., LIMA, D. R. S., FILHO, J. G. B., ADARME, O. F. H., GURGEL, L. V. A., & AQUINO, S. F. de. Evaluation of hydrogen and methane production from sugarcane bagasse hemicellulose hydrolysates by two-stage anaerobic digestion process. *Bioresource Technology*, 218,436–446. (2016).

BARAKAT, A., MONLAU, F., STEYER, J., & CARRERE, H. Biorefinery Effect of lignin-derived and furan compounds found in lignocellulosic hydrolysates on biomethane production. *Bioresource Technology*, 104, 90–99,(2012).

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.060>

BEZERRA, T. L., & RAGAUSKAS, A. J. A review of sugarcane bagasse for second-generation bioethanol and biopower production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10(5), 634–647. (2016).

CACURO, T.A & WALDMAN, W,R. Cinzas da queima de biomassa: Aplicações e Potencialidades. In *Revista virtual de Quimica*, 7(6), 2154-2165,(2015).

CHEN, Y., CHENG, J. J., & CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 4044–4064. (2008).

CHERNICHARO, C. *Anaerobic reactors* (1st ed.). London: IWA Publishing. (2007).

CHRISTOFOLETTI, C. A., ESCHER, J. P., CORREIA, J. E., MARINHO, J. F. U., & FONTANETTI, C. S. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management*, 33(12), 2752–2761, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>

CORDEIRO, P. H. DE M. Avaliação da biometanização do hidrolisado hemicelulósico obtido pela auto-hidrólise do bagaço de cana de açúcar em sistemas anaeróbios de duplo estágio e um estágio na presença de carvão ativado em pó. *Universidade Federal de Ouro Preto*. (2018).

CURBELO, M, J., & LORENZO ACOSTA, Y. Alternativas de tratamiento de las vinazas de destilería. experiencias nacionales e internacionales. In *Centro Azucar*(p. 58). La Habana, Cuba: Yaillet Albernas Carvajal. (2014).

DINIZ, D. D. S. Produção de álcool etílico utilizando como matérias primas resíduos florestais e agrícolas. (Tesis de Maestria). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. (2008).

FUESS, L. T., GARCIA, M. L., & ZAIAT, M. Seasonal characterization of sugarcane vinasse: Assessing environmental impacts from fertirrigation and the bioenergy recovery potential through biodigestion. *Science of The Total Environment*, 634, 29–40. (2018).

GIMÉNEZ, J. *Estudio del tratamiento anaerobio de aguas residuales urbanas en biorreactores de membranas*. (Tesis doctoral). Escola técnica superior de Engenharia. (2014).

HENRY, Guy., PAHUN, Jeanne., & TRIGO, Eduardo. La Bioeconomía en América Latina: oportunidades de desarrollo e implicaciones de política e investigación. Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, v. 42, n. 4, p. 125–141, (2014). Disponible em: <[http://nulan.mdp.edu.ar/2112/1/FACES\\_n42-43\\_125-141.pdf](http://nulan.mdp.edu.ar/2112/1/FACES_n42-43_125-141.pdf)>.

HERRERA, O. Obtenção de biogás a partir da co-digestão anaerobia de residuos do processo de produção de bioetanol de primeira e segunda geração. (Qualificação doctoral). Universidad Federal de Ouro Preto, p.16. (2018).

HILL, D. T., COBB, S. A., & BOLTE, J. P. Using Volatile Fatty Acid Relationships To Predict Anaerobic Digester Failure. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 30(2), 496–501, (1987). <https://doi.org/10.13031/2013.31978>

KLEEREBEZEM, R., & VAN LOOSDRECHT, M. C. Mixed culture biotechnology for bioenergy production. *Current Opinion in Biotechnology*, 18(3), 207–212, (2007).

M, MYINT; N., NIRMALAKHANDAN; R. , SPEECE. Anaerobic fermentation of cattle manure: Modeling of hydrolysis and acidogenesis. *Water Research*, [S. l.], v. 41, n. 2, p. 323-332, (2007).

MARTINEZ-HERNANDEZ, E., & SAMSATLI, S. Biorefineries and the food, energy, water nexus — towards a whole systems approach to design and planning. *Current Opinion In Chemical Engineering*, 18, 16-22, (2017).

MOSIER, N., WYMAN, C., DALE, B., ELANDER, R., LEE, Y. Y., HOLTZAPPLE, M., & LADISCH, M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 96(6), 673–686, (2005). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025>

OHARA, H. *MINI-REVIEW H. Ohara*. 474–477, (2003). <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1383-7>

ORHAN, Y.; BURAK, D. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. *Process Biochemistry*, v. 48, n. 5-6, p. 901-911, 2013.

OTALORA, F. Evaluación de la producción de biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (astbr) y reactor metanogénico escalonado (rme) alimentado con licor de pentosas. (Tesis de pregrado). Universidad Federal de Ouro Preto, (2018).

PATTRA, S., SANGYOKA, S., BOONMEE, M., & REUNGSANG, A. Bio-hydrogen production from the fermentation of sugarcane bagasse hydrolysate by *Clostridium butyricum*. 33, 5256–5265, (2008). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.008>

PIÑEROS-CASTRO, Y. Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia (1st ed., p. 8). Bogotá D.C: Jaime Melo Castiblanco, (2014).

QUÉMÉNEUR, M., HAMELIN, J., BARAKAT, A., STEYER, J.-P., CARRÈRE, H., & TRABLY, E. Inhibition of fermentative hydrogen production by lignocellulose-derived compounds in mixed cultures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(4), 3150–3159, (2012).

RIBEIRO, F. R., PASSOS, F., VINÍCIUS, L., GURGEL, A., EDUARDO, B., BAÊTA, L., & AQUINO, S. F. DE. Science of the Total Environment Anaerobic digestion of hemicellulose hydrolysate produced after hydrothermal pretreatment of sugarcane bagasse in UASB reactor. *Science of the Total Environment*, 584–585, 1108–1113, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.170>

RICARDO, C., PORTO, L., VANDENBERGHE, D. S., BIANCHI, A., MEDEIROS, P., GRACE, S., ... TORRES, G. Bioresource Technology Bioethanol from lignocelluloses: Status and perspectives in Brazil. *Bioresource Technology*, 101(13), 4820–4825, (2010). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.067>

SALES, A., & LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. *Waste Management*, 30(6), 1114–1122, (2010).

SILVA, M., GRIEBELER, N. P., & BORGES, L. C. *Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático Use of stillage and its impact on soil properties and groundwater*. (62), 108–114. (2007).

SILVA, N. avaliação do pré-tratamento hidrotermico da casca de café na hidrolise enzimática e produção de biogás. (Vol. 8). Universidad Federal de Ouro Preto. (2019).

SZCZERBOWSKI, D., PAULA, A., ZANDONÁ, A., & PEREIRA, L. (2014). Sugarcane biomass for biorefineries : Comparative composition of carbohydrate and non-carbohydrate components of

bagasse and straw. *Carbohydrate Polymers*, 114, 95–101. (2014).  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.07.052>

TURKDOGAN-AYDINOL, F. I., & YETILMEZSOY, K. A fuzzy-logic-based model to predict biogas and methane production rates in a pilot-scale mesophilic UASB reactor treating molasses wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 182(1–3), 460–471. (2010).  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.054>

ZHANG, L., BAN, Q., LI, J., & WAN, C. Functional bacterial and archaeal dynamics dictated by pH stress during sugar refinery wastewater in a UASB. *Bioresource Technology*, 288(May), 121464, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121464>

ZHENG, Y., ZHAO, J., XU, F., & LI, Y. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 42, 35–53. (2014).  
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.01.001>

## HOJA DE APROBACIÓN

Certifico que la alumna Aura Jazmín Hernández Acuña, autora del trabajo de conclusión de curso titulado EVALUACIÓN EL COMPORTAMIENTO DE UN REACTOR UASB EN CONTINUO Y SEMICONTINUO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LA CODIGESTIÓN DE HIDROLIZADO DE CAÑA Y VINAZA, realizó las correcciones sugeridas por la banca examinadora y que estoy de acuerdo con la versión final del trabajo.

*Bruno Eduardo Lobo Baêta*  
Dr. Bruno Eduardo Lobo Baêta

Orientador (UFOP)

*Hector J Luna W*

Dr Héctor Javier Luna

Orientador (UAN)