

DIGESTIÓN ANAEROBIA DE SOBRANTES ALIMENTICIOS DE RESTAURANTE
EN UN REACTOR TUBULAR A TEMPERATURA AMBIENTE

ANA MARÍA GÓMEZ IBÁÑEZ
IVÁN RICARDO GÓMEZ OSORIO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2016

DIGESTIÓN ANAEROBIA DE SOBRESALIENTES ALIMENTICIOS DE RESTAURANTE
EN UN REACTOR TUBULAR A TEMPERATURA AMBIENTE

ANA MARÍA GÓMEZ IBÁÑEZ
IVÁN RICARDO GÓMEZ OSORIO

Trabajo de grado para optar al título de:
Ingeniero Químico

DIRECTOR:
HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ
Ingeniero Químico, M. SC., Ph.D.

CO-DIRECTORES:
LILIANA DEL PILAR CASTRO MOLANO
Ing Química, Ph.D.

LUIS ENRIQUE LAMBIS BENÍTEZ
Ing. Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2016

Dedicatoria

A Dios y a la Virgen por darme cada día la confianza, la ilusión y la fe, por cuidarme y llevarme de su mano durante toda mi vida.

A mi papá y mi mamá, porque sin su amor y su entrega no sería quien soy. Todo esto es por Ustedes. Los amo.

A mi abuelito Mario, mi abuelita Beatriz y mi abuelita Rosalba, porque son los más grandes ejemplos de grandeza que Dios me dio.

A mi compañero de aventuras, Carlos, por ser la voz de mi conciencia y estar siempre ahí, porque sin ti este cuento no sería tan feliz. Eu te amo, meu amor, a nossa história ainda está começando.

A mi tío Sergio, porque siempre creyó en mí.

A Vilma, Fernando y María porque estuvieron conmigo a pesar de los kilómetros.

A Lilibian, Juan Martín y Mario, porque me apoyaron en cada paso.

A mi tío Jorge, porque me enseñó que lo más importante es la familia.

A mi hermano, Andrés, porque desde niños fue mi modelo a seguir.

A mi amigo Ivancho, por la infinidad de cosas que me enseñó durante todos estos años y la paciencia que me tuvo. Gracias, estamos pa' las que sea.

A la profe Mabel, porque se arriesgó por nosotros, espero haberla hecho sentir orgullosa.

A Cata y Paloma, por ser las mejores amigas que la UIS me dejó. Las quiero para siempre.

A Luis, Jose, Santi y mi grupo de Digestión Anaerobia, porque hicieron de este proceso el más bonito. Cuentan conmigo amigos.

A los profes Humberto y Lilibian, por las enseñanzas y la confianza.

Ana María

Dedicatoria

“Cualquier trabajo que hagan, háganlo de buena gana, pensando que trabajan para el Señor y no para los hombres”
Colosenses 3, 23.

A mis padres Martín y Luz Benia por ser la guía de mi camino en todo momento y educarme para ser un hombre de bien para la sociedad.

A mi abuela Edelmira por ser ese motor cada mañana al levantarme y brindarme su cariño todos los días.

A mi hermano Martín, por ser un ejemplo de vida, tanto personal como profesional, nunca un hermano pudo estar más orgulloso, gracias por todo Tin.

A Nathalia porque sin importar las dificultades y lo que sea que se presentara en el camino siempre estuvo ahí dándome fuerza en los momentos más difíciles para no desfallecer.

A la Profesora Mabel y a Franklin, por todas sus enseñanzas en estos años universitarios y por abrirme la puerta de su hogar y hacerme sentir como en casa.

A Ana María mi compañera guerrera de este proyecto de grado, luchamos juntos de principio hasta el final, ¡LO HICIMOS ANNIE!

A todo el grupo de Digestión Anaerobia por abrirme sus puertas, y enseñarme el valioso camino de la investigación.

A mis compañeros de la universidad Diego, María Camila, Bryan y Federman, por hacer parte de mi vida no solo como compañeros sino como amigos que me apoyaron en todo momento.

IVÁN

AGRADECIMIENTOS

Primero a Dios, por darnos la vida y la fuerza todas las mañanas para poder cumplir las metas propuestas, entre esas la realización de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos la formación necesaria para cumplir nuestro camino en la formación como ingenieros.

A la Escuela de Ingeniería Química, por ser nuestra casa durante estos años y por apoyarnos durante toda nuestra educación.

A los profesores Humberto Escalante y Liliana Castro, por abrirnos las puertas en su grupo de investigación y ser quienes nos apoyaron en todo momento.

A Luis Lambis, por estar siempre ahí para apoyarnos y por enseñarnos tanto sobre la DA.

A la profesora Mabel y a Franklin, por confiar en nosotros y darnos la mano, por abrirnos las puertas de su casa y por todos los conocimientos que nos entregaron.

A todo el grupo de Digestión Anaerobia, por enseñarnos que los triunfos en equipo son más satisfactorios y se disfrutan más.

A don Guillermo, don Eduardo y don Wilson por proveernos de materiales y demás cosas que fueron necesarias para la elaboración del proyecto.

A Linita, por ser esa mano amiga para cada uno de los estudiantes de la Escuela.

A Catalina Camargo y Laura Mantilla, porque fueron indispensables para que la etapa final de este proceso se llevara a cabo con éxito.

IVÁN Y ANA MARÍA

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1.1. DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	19
1.1.1. Etapas de la DA	20
1.2. ACIDIFICACIÓN E INHIBICIÓN	21
1.3. REACTORES TUBULARES	22
2. OBJETIVOS	23
2.2. OBJETIVO GENERAL	23
2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3. METODOLOGÍA.....	24
3.1. MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1.1. Origen del inóculo y el sustrato.....	26
3.1.2. Diseño y Construcción del reactor tubular	26
3.1.3. Evaluación de la DA.....	27
3.2. VARIABLES DE RESPUESTA DE LA DA CON SAR.....	30
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO Y EL INÓCULO	32
4.2. EVALUACIÓN DE LA DA.....	33
4.2.1. Estabilización del Inóculo.....	33
4.2.2. Operación discontinua y semi-continua.....	36
CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFÍA.....	43

ANEXOS.....50

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Etapas de la DA.....	20
Figura 2. Metodología para la DA de SAR en un reactor tubular.....	24
Figura 3. Reactor tubular.....	27
Figura 4. Reducción de la carga de SV durante el pretratamiento.....	34
Figura 5. Comportamiento del pH durante el pretratamiento.....	34
Figura 6. Comportamiento de los AGV's durante el pretratamiento.....	35
Figura 7. Comportamiento de la CB durante el pretratamiento.....	35
Figura 8. Consumo de SV en operación discontinua.....	36
Figura 9. Comportamiento del pH durante la DA de SAR.....	37
Figura 10. Comportamiento de los AGV's durante la DA de SAR.....	37
Figura 11. Comportamiento de la CB durante la DA de SAR.....	38
Figura 12. Producción de biogás durante la operación de DA.....	40
Figura 13. Biogás acumulado durante operación de DA.....	40

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones de diseño del reactor tubular.	27
Tabla 2. Condiciones de operación discontinua.....	28
Tabla 3. Clasificación de las VCO.....	29
Tabla 4. Condiciones de operación en semi-continuo.	29
Tabla 5. Condiciones de acidificación de la DA de SAR.....	30
Tabla 6. Variables de respuesta de la DA de SAR.	30
Tabla 7. Caracterización fisicoquímica del inóculo.	32
Tabla 8. Caracterización fisicoquímica del sustrato.	32
Tabla 9. Rendimiento de cada etapa de la DA de SAR.	41

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Caracterización de los SAR y el EB.....	50
ANEXO B. Protocolo de recolección de SAR.....	51
ANEXO C. Volumen de metano normalizado.	54
ANEXO D. Registro fotográfico.....	55

NOMENCLATURA

DA	Digestión Anaerobia
SAR	Sobrantes Alimenticios de Restaurante
EB	Estiércol Bovino
CO	Carga orgánica (gSV/L)
VCO	Velocidad de carga orgánica (gSV/L*día)
SV	Sólidos Volátiles (gSV/kg)
ST	Sólidos Totales (gST/kg)
AGV's	Ácidos Grasos Volátiles (mg ácido acético/L)
AT	Alcalinidad Total (mg CaCO ₃ /L)
CB	Capacidad Buffer (mg ácido acético/mg CaCO ₃)
RIS	Relación inóculo-sustrato en términos de sólidos volátiles

RESUMEN

TÍTULO: DIGESTIÓN ANAEROBIA DE SOBRESALIENTES ALIMENTICIOS DE RESTAURANTE EN UN REACTOR TUBULAR A TEMPERATURA AMBIENTE.*

AUTORES: ANA MARÍA GÓMEZ IBÁÑEZ, IVÁN RICARDO GÓMEZ OSORIO.**

PALABRAS CLAVE: Digestión anaerobia, sobrasalientes alimenticios de restaurante, reactor tubular, velocidad de carga orgánica, ácidos grasos volátiles, biogás.

DESCRIPCIÓN: En la actualidad los biocombustibles han surgido como una alternativa para contrarrestar la problemática energética en todo el mundo y disminuir la contaminación debida al uso de combustibles fósiles. El biogás es un biocombustible formado a partir de un proceso de degradación biológica conocido como Digestión Anaerobia. En ella, se toman como materias primas un residuo altamente biodegradable y una fuente de microorganismos para producir una mezcla de gases combustibles, y un lodo digerido con alto contenido de nutrientes. En la Universidad Industrial de Santander se generan 3,9 m³ mensuales de sobrasalientes alimenticios de restaurante que, son un sustrato que se fermenta rápidamente. Este proyecto consistió en estudiar la digestión anaerobia de residuos alimenticios de restaurante, utilizando como inóculo un lodo estiércol bovino estabilizado en un reactor tubular a temperatura ambiente con el objetivo de analizar la acidificación del medio debida a la rápida fermentación del sustrato. Se inició el proceso con una única carga basada en una relación inóculo-sustrato de 2 y una operación en discontinuo. Después de estabilizado el proceso se inició la operación en semi-continuo con un aumento gradual en la velocidad de carga orgánica de 1, 3 y 5 g de Sólidos Volátiles/L*día hasta alcanzar la acidificación en el reactor. Se obtuvieron rendimientos de 0,89, 0,96 y 0,40 m³ de biogás/kg de Sólidos Volátiles consumidos, respectivamente. Se concluyó que la carga óptima para operar en estas condiciones fue la de 3 g de Sólidos Volátiles/L*día.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Directores: Humberto Escalante Hernández, Ing. Químico, M. SC, Ph. D.; Liliana Castro Ing. Química, Ph. D.; Luis Lambis Ing. Químico.

ABSTRACT

TITLE: ANAEROBIC DIGESTION OF RESTAURANT FOOD WASTES IN A TUBULAR REACTOR AT AMBIENT TEMPERATURE.*

AUTHORS: ANA MARÍA GÓMEZ IBÁÑEZ, IVÁN RICARDO GÓMEZ OSORIO.**

KEYWORDS: Anaerobic digestion, restaurant food wastes, tubular reactor, organic loading rate, volatile fatty acids, biogas.

DESCRIPTION: The world community is now facing two different but related issues about energy, the deprecation of fossil fuel reserves and the pollution generated by their use. In this way, research in sustainable alternatives such as biogas become attractive to both science and industry. The biogas is a sustainable fuel formed by biological processes known as anaerobic digestion. The anaerobic digestion process fixes a high-degradable reactan by microorganisms, ending up in the production of fuel gas as the main product and rich-nutrient digested mud as a side product. Currently, the Universidad Industrial de Santander generates 3.9 m³ per month of food waste prompted to fast degradation. Here we studied the anaerobic digestion of food waste using cattle manure stabilized by inoculum in a tubular reactor at room temperature. By doing this, we aimed to understand the system's acidification as a consequence of fast substrate's degradation. The tubular reactor was initially loaded with an inoculum-substrate ratio of 2, followed by a stabilization period up to 30 days. Then, a semi-continuum process started at an increasing organic load rate of 1, 3 and 5 g of Volatile solid per liter per day, until the reactor got acidified. The obtained process yield was 0.89, 0.96 and 0.40 m³ of biofuel per kilogram of volatile solid, respectively. We found that the optimal load rate was 3 g of volatile solid per liter per day.

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Directores: Humberto Escalante Hernández, Ing. Químico, M. SC, Ph. D.; Liliana Castro Ing. Química, Ph. D.; Luis Lambis Ing. Químico.

INTRODUCCIÓN

En Colombia se producen 27.300 toneladas de basura de las cuales 65% son residuos orgánicos (Cardona et al., 2004). Sólo un 40% de los residuos tiene un manejo adecuado, el resto se acumula en rellenos sanitarios, generando grandes cantidades de gases contaminantes y lixiviados (Cuervo et al., 2007). Los residuos sólidos urbanos están compuestos en gran medida por sobrantes alimenticios que corresponden a los productos dirigidos a la alimentación humana y que por alguna razón salen de la cadena de producción y consumo.

Aproximadamente un tercio de las partes comestibles de los alimentos producidos para el consumo humano se desperdicia en todo el mundo, lo que equivale a 1.300 millones de toneladas por año (FAO, 2011). En Colombia, se producen 2,2 millones de toneladas anuales de residuos alimenticios (FAO, 2012). Actualmente la Universidad Industrial de Santander (UIS) beneficia a 4.268 estudiantes con el servicio de comedor universitario, generando 3,9 m³ mensuales de sobrantes alimenticios de restaurante (SAR) (Álvarez et al., 2014), ocasionando un grave problema de gestión de desechos para la Universidad. Una alternativa sostenible para la disposición de estos residuos es la digestión anaerobia (DA), proceso fermentativo en el cual se lleva a cabo una volatilización biológica de la materia orgánica, obteniendo como producto biogás y un digestato con potencial fertilizante llamado biol.

En la DA más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en producto principal, consumiéndose sólo un 10% de la energía en el crecimiento bacteriano (Acosta et al., 2005), convirtiéndola en una tecnología autónoma y autosuficiente. Además, la combustión del biogás no produce humos visibles, su carga es infinitamente menor que el humo proveniente de la quema de madera y sólo genera monóxido de carbono (CO) y vapor de agua (Marti, 2008).

El biogás es una fuente energética renovable, segura y de fácil manejo (Cardona et al., 2004) compuesta principalmente de metano (CH_4) con porcentajes entre 70 y 50%, y dióxido de carbono (CO_2) entre 30 y 50%, y que contiene pequeñas cantidades de N_2 , O_2 , H_2 y H_2S . El digerido consiste en un lodo estabilizado con mayor contenido mineral y menor contenido de materia orgánica, que tiene principal aplicación como bio-abono o biofertilizante debido al alto contenido de nutrientes especialmente N y P (Acosta et al., 2005; Mata-Álvarez, 2003).

La DA se lleva a cabo en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Durante las dos primeras etapas ocurre la reducción de las macromoléculas presentes en el sustrato y su transformación a ácidos grasos volátiles (AGV's), y durante las dos últimas etapas es llevada a cabo la producción del metano a partir del consumo de los AGV's. A pesar de que es indispensable que la materia orgánica a digerir sea fácilmente biodegradable, el problema radica en que las dos primeras etapas de la DA se llevan a cabo demasiado rápido y se genera un desbalance en el proceso conducente a un punto crítico en el que se produce más producto intermedio del que se puede consumir (Vannecke et al., 2015). Lo anterior, conduce a reducir la actividad metanogénica en el sistema por acidificación del medio (Cheng et al., 2010). De acuerdo con la caracterización fisicoquímica de los SAR, estos son un sustrato con alto contenido de humedad (83,81%) y materia orgánica soluble que es fácilmente hidrolizable (Jayalakshmi et al., 2009). Por consiguiente, la acidogénesis es la etapa limitante de la DA de los SAR.

Para mejorar la acidificación durante la DA, se recomienda modificar el diseño del reactor (Boallagui et al., 2003) y recircular parte del efluente para generar un efecto buffer amortiguando los ácidos en la primera sección cercana a la alimentación y además, se evita el lavado celular (Xiaowei et al., 2016).

La DA de SAR requiere que el proceso se lleve a cabo en un reactor continuo que permita el desarrollo en simultaneo de todas las etapas de la DA pero que evite la acumulación de ácidos en su interior (Lui et al., 1997). Dada su geometría específica los reactores tubulares permiten que las etapas de producción y consumo de AGV's en la DA sean separadas por secciones, pero coexistiendo en su interior generando que los reactivos se consuman a lo largo de la trayectoria del flujo, concibiendo una condición que puede llevar a mejoras en la eficiencia y estabilidad del proceso (Namsree et al., 2012).

La temperatura de operación en el digester es considerada uno de los principales parámetros de diseño (Martí, 2008). En la DA es posible trabajar en un amplio rango de temperatura, en el cual aparecen dos zonas definidas correspondientes a dos grupos de bacterias: la zona mesofílica (25-40°C) y la zona termofílica (40-65°C). La literatura reporta que el rango mesofílico es el más favorable para la DA porque la biomasa que en él se genera corresponde a bacterias con alta velocidad de producción de metano (Bermúdez et al., 1988). Debido a que la temperatura ambiente de la ciudad de Bucaramanga (25-30°C) oscila dentro del rango mesofílico, se aprovecha esta condición para ahorrar el consumo energético dedicado a esta función.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue diseñar y evaluar el desempeño y la operación de un reactor tubular a escala laboratorio para la DA de SAR provenientes del restaurante universitario de la UIS, a temperatura ambiente.

1.1. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La DA es un proceso biológico llevado a cabo por un consorcio microbiano que actúa en condiciones netamente anaerobias, degradando material orgánico fácilmente biodegradable y con alto contenido de materia hidrolizable como proteínas, carbohidratos y lípidos, y convirtiéndolo en una mezcla de gases compuesta principalmente por CH₄ y CO₂ (Angelidaki et al., 2009). Se lleva a cabo

en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis; ilustradas en la figura 1.

Figura 1. Etapas de la DA.

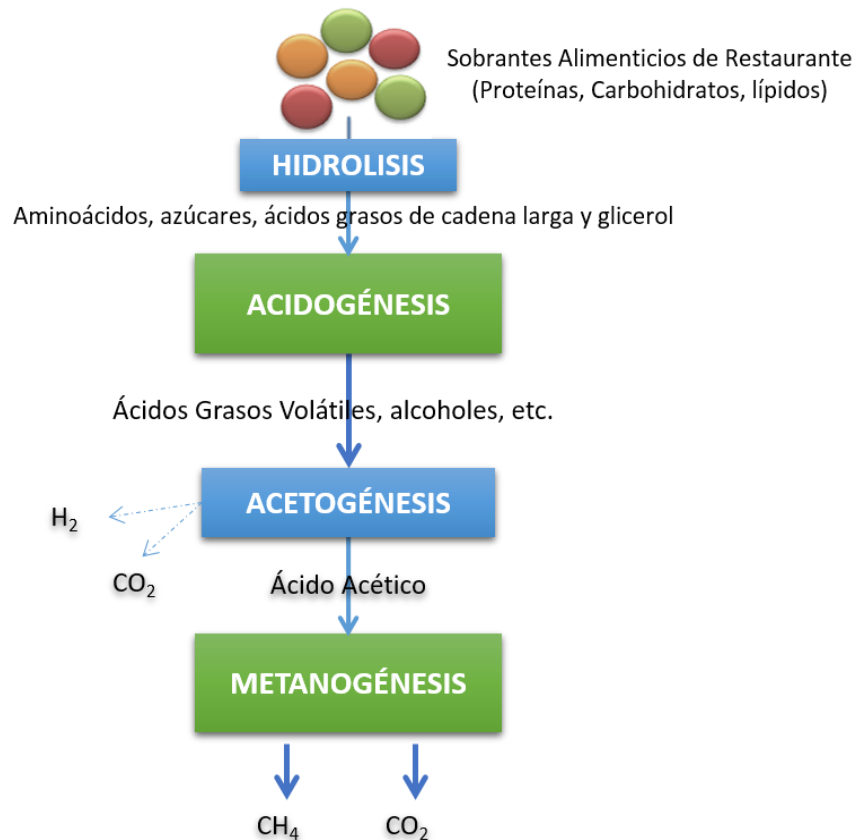


Figura tomada de: Angelidaki et al., 2011.

1.1.1. Etapas de la DA

- **Hidrólisis:**

En esta etapa, mediante transformación enzimática se consigue la ruptura de las macromoléculas complejas (carbohidratos, lípidos, proteínas y grasas) en compuestos simples y solubles (monosacáridos, disacáridos, aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga y corta, y glicerina). Estas reacciones enzimáticas son llevadas a cabo por bacteroides, clostridium y algunos microorganismos facultativos como los estreptococos (Yadvica et al., 2004).

- **Acidogénesis:**

En esta etapa los productos solubles que se formaron en la hidrólisis son transformados en AGV's y en algunos alcoholes, todo esto por la intervención de una amplia gama de microorganismos, entregando como productos: ácido acético, propiónico y butírico (Angelidaki et al., 2009).

- **Acetogénesis:**

La tercera etapa consiste en la síntesis del acetato a partir de AGV's. Las bacterias presentes en esta etapa compiten con los microorganismos metanogénicos por algunas fuentes de carbono tales como metanol y formiato para la producción de CO_2 y H_2 (Angelidaki et al., 2009).

- **Metanogénesis:**

En la última etapa el H_2 , CO_2 y acetato se transforman en CH_4 y CO_2 por acción de las bacterias metanogénicas. Esta etapa requiere de condiciones estrictas como pH entre 6 y 7, para que los microorganismos puedan realizar la DA (Chen et al., 2008).

1.2. ACIDIFICACIÓN E INHIBICIÓN

La inhibición en un sistema de DA con SAR está ligada directamente a la producción y consumo de AGV's debido a la alta biodegradabilidad del sustrato (Boallagui et al., 2003; Yuan et al., 2016). La estabilidad del sistema se deteriora como resultado de la disminución del pH que a su vez es reflejo del aumento de los ácidos en el sistema (Liu and Ghosh, 1997). Durante la acidificación, la producción de ácidos conlleva a pH por debajo de 6. Las elevadas concentraciones de ácidos inhiben los consorcios microbianos dando lugar a disminución de la producción de metano y calidad del biogás (Chen et al., 2008).

1.3. REACTORES TUBULARES

La literatura ha reportado en varias ocasiones la DA de SAR en diversos sistemas de operación, concluyendo que la acidificación por acumulación de AGV's es la causa más común de inhibición para estos casos (Liu and Gosh, 1997; Yadvika et al., 2004). Se ha establecido que uno de los factores más importantes para lidiar con este problema es el diseño del reactor.

Según Chu et al. (2008) y Liu et al. (2012) es conveniente separar en dos fases la DA. La primera corresponde a la producción de AGV's y la segunda al consumo de los mismos. Esta estructura, permite adquirir más estabilidad y el sistema soporta la adición de mayores cantidades de materia orgánica.

La propuesta de la utilización de un reactor tubular para la DA de SAR aún no ha sido estudiada, pero en casos con sustratos similares como residuos de frutas y verduras se concluyó que la implementación de este tipo de reactor es una intensificación al proceso pues aumenta la estabilidad y disminuye costos (Boallagui, et al., 2003). Esto porque proporcional al sistema la habilidad de separar las fases a lo largo de un sólo reactor a medida que todo el material que se encuentra en él tiene el mismo tratamiento debido al flujo axial (Jayalakshmi et al., 2009; Liu and Gosh, 1997; Martí, 2008). Además, los estudios de Martí (2008), muestran una operación exitosa a para DA a temperatura ambiente en ciudades con condiciones climáticas similares a Bucaramanga.

2. OBJETIVOS

2.2. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la digestión anaerobia de SAR en un reactor tubular a escala laboratorio y operando a temperatura ambiente.

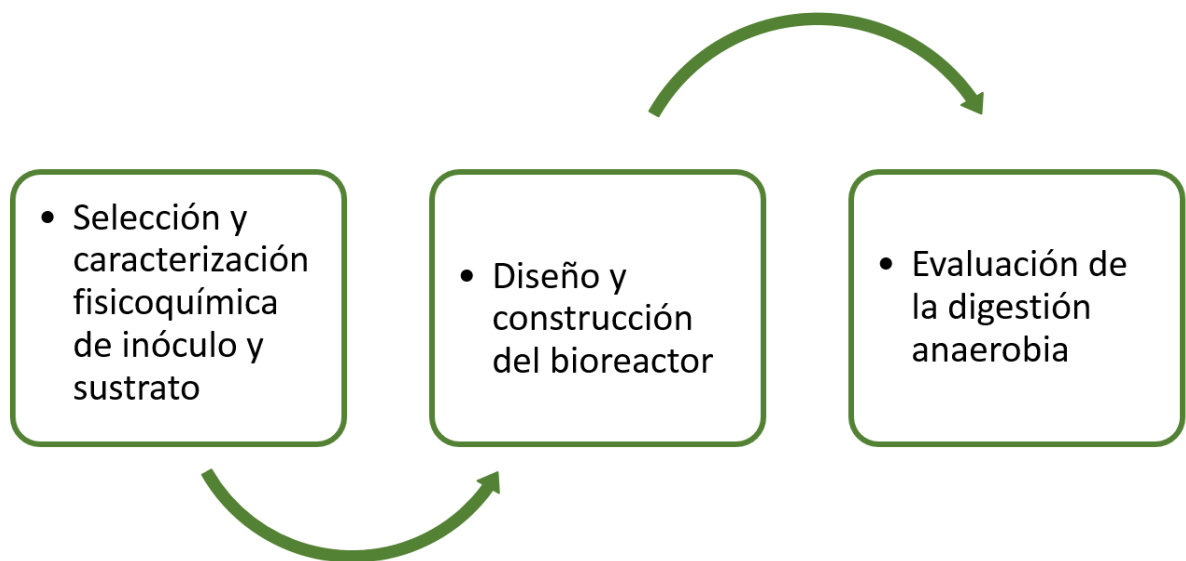
2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un reactor tubular a escala laboratorio.
- Iniciar el proceso de DA de SAR en un reactor tubular a escala laboratorio en operación discontinua.
- Llevar a cabo el proceso de DA de SAR en un reactor tubular en operación semi-continua.

3. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico de la investigación se resume en la figura 2, que indica las etapas llevadas a cabo para la puesta en marcha y posterior operación del reactor tubular para DA de SAR.

Figura 2. Metodología para la DA de SAR en un reactor tubular.



- **Selección y caracterización fisicoquímica del inóculo y sustrato**

La primera etapa consistió en la selección y caracterización fisicoquímica del inóculo y sustrato. El inóculo elegido fue estiércol bovino, conveniente para el sistema debido a que se han reportado estudios que lo definen como adecuado (Alzate et al., 2016; Álvarez et al., 2014) y a la disponibilidad en la región.

- **Diseño y construcción del bioreactor**

El diseño del reactor fue hecho con el objetivo de dar más estabilidad al sistema, aumentar el rendimiento de biogás y permitirle soportar cargas orgánicas superiores a las reportadas en sistemas de operación discontinua como las obtenidas por Álvarez et al. (2014) y Zhang et al. (2007); o en operación continua

como las obtenidas por Beltrán et al. (2016); Nagao et al. (2012) y Liu and Gosh (1997). La construcción del bioreactor fue hecha basada en estudios realizados por Martí (2008).

- **Evaluación de la DA**

Para la evaluación de la DA de SAR se llevaron a cabo los siguientes pasos. Lo primero fue la adecuación del lodo al medio permitiéndole estar a las condiciones a las que iba a operar el proceso. Este paso buscó adaptar los microorganismos presentes en el inóculo a las condiciones del proceso y permitir al consorcio degradar la materia orgánica presente por medio de su metabolismo endógeno (Angelidaki et al., 2009). En el siguiente paso se adicionaron SAR al sistema en una operación de un único lote, con una relación de inóculo-sustrato (RIS) igual a 2, reportada en la literatura como estable (Kawai et al., 2014), y que representa una carga orgánica (CO) de 12 gSV/L en el reactor, con el fin de ajustar el metabolismo del consorcio al sustrato y evaluar su primera respuesta a este.

Finalmente se evaluó la respuesta del digestor operando en semi-continuo a diferentes VCO. Se utilizaron tres tipos de VCO según el barrido bibliográfico: baja, media y alta, tomando como alta una de las que reportaba inhibitoria para un sistema similar (Chen et al., 2008), como baja la mínima que reportó estabilidad (Parra Orobio, et al., 2014) y como media una aleatoria que reportó estabilidad según Banks et al. (2012). Inicialmente se realizó la carga baja de 1 gSV/L*día y se le permitió continuar con estas condiciones hasta observar la estabilización del proceso; luego se realizó la carga media de 3 gSV/L*día que buscó mejorar la producción de biogás y finalmente se realizó la carga alta de 5 gSV/L*día que según (Gou et al., 2014) registró inhibición por acidificación.

3.1. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.1. Origen del inóculo y el sustrato

Se seleccionó como inóculo para la DA de los SAR los microorganismos presentes en un lodo estiércol bovino (EB). El EB se recolectó de los establos del frigorífico Vijagual, Rionegro-Santander, y fueron transportados en recipientes herméticos por personal del laboratorio.

Con el fin de obtener un lodo estabilizado y potencializado, se recolectaron 18 Litros de estiércol fresco y se introdujeron en un reactor de 23 Litros de capacidad durante tres meses para agotar la materia orgánica endógena presente hasta una concentración de 20 gSV/L. La temperatura se mantuvo a temperatura ambiente. El sistema se sometió a agitación automática cada 30 minutos y se realizó un control semanal de SV. El inóculo fue sometido a una caracterización fisicoquímica en donde se determinaron las variables: Sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), pH y carga orgánica fácilmente oxidable.

Los SAR se recolectaron en el restaurante de bienestar universitario de la UIS y se homogenizaron en un procesador de alimentos, fueron empacados en bolsas y congelados para preservar sus propiedades. El protocolo utilizado para este procedimiento se presenta en el anexo B. Se realizó una caracterización fisicoquímica de los SAR en donde se evaluaron los siguientes parámetros: sólidos volátiles (SV), sólidos totales (ST), pH, humedad, relación C/N, proteínas, carbohidratos, lípidos y lignina.

3.1.2. Diseño y Construcción del reactor tubular

El reactor que se utilizó para el experimento se construyó en acrílico, con unas dimensiones de 0,7 m de largo, 0,1 m de diámetro y un volumen total de 6 L, conservando una relación longitud / diámetro igual a 7,7, apropiada según Martí (2008), además presentó un desnivel de 5 grados que favoreció el flujo axial en el interior del reactor y que se ha sugerido en otras investigaciones (Jayalakshmi et

al., 2009; Martí, 2008). El reactor se ilustra en la figura 3. La temperatura se mantuvo dentro del rango mesofílico a condiciones ambiente en la ciudad de Bucaramanga ($25 \pm 3^{\circ}\text{C}$) para evitar el consumo energético. Las especificaciones de diseño del reactor tubular se presentan en la tabla 1.

Figura 3. Reactor tubular.

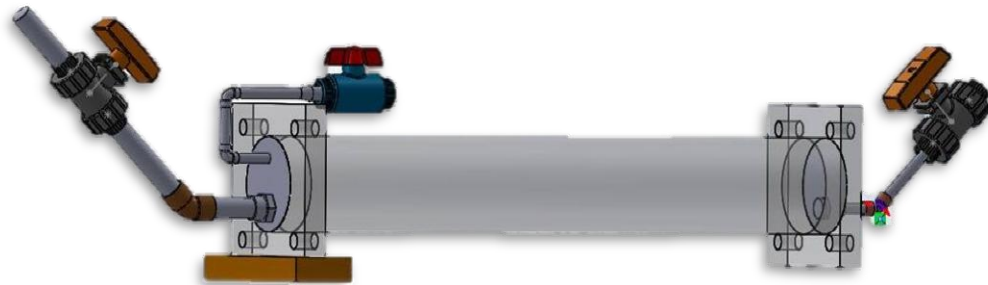


Tabla 1. Especificaciones de diseño del reactor tubular.

Parámetro	Valor
Volumen	6 L
Diámetro	0,1 m
Longitud	0,77 m
Relación longitud/diámetro	7,7
Tapas	2
Varillas Roscadas	4
O'Rings	2
Válvulas de compuerta	3
Inclinación	5°

3.1.3. Evaluación de la DA

- **Pretratamiento**

Se agregaron 3 litros de inóculo en el reactor a condiciones atmosféricas de temperatura y presión, se hizo una purga con N_2 para garantizar anaerobiosis, y

como el proceso requería durante esta primera etapa, de agitación intermitente para evitar sedimentación de sólidos en el fondo, esta se hizo tres veces al día manualmente. Este procedimiento se llevó a cabo durante 30 días con el propósito de acondicionar el consorcio microbiano a la temperatura ambiente ($25 \pm 3^\circ\text{C}$). Como variable de respuesta a este proceso se realizaron mediciones de los SV y ST que permitieron conocer la concentración de materia orgánica disponible y monitorear su consumo durante el proceso. Se monitorearon los AGV's y la capacidad buffer (CB) como respuesta de estabilidad.

- **Operación discontinua**

Tabla 2. Condiciones de operación discontinua.

Parámetro	Valor
Volumen	6 L
Volumen de Operación	3,5 L
Temperatura	$25 \pm 3^\circ\text{C}$
Agitación	Intermitente
RIS	2
CO	12 gSV/L
Inóculo	3,3 L
SAR	0,2 L

Con el fin de adecuar el inóculo al sustrato se configuró una RIS de 2 para operar con una única carga orgánica en discontinuo, estable según Kawai et al. (2014). Está correspondió a 200 mL de SAR a una concentración de 164,44 gSV/L. En la tabla 2 se presentan las condiciones de operación del biodigestor durante la operación en discontinuo. Esta etapa finalizó cuando el sistema estabilizó su capacidad buffer en un rango de 0,1 a 0,3 (Marin Batista et al., 2015). Se verificó

que el pH se mantuviera oscilando entre 7 y 8 unidades de pH, rango adecuado para la DA con SAR (Sharma et al., 2000).

- **Operación semi-continua**

Posteriormente se inició la operación del reactor en semi-continuo con diferentes VCO. En la tabla 3 se presenta la clasificación de las VCO utilizadas en cada etapa.

Tabla 3. Clasificación de las VCO.

Rango	Categoría	VCO [gSV/L*día]	Referencia
$0,5 \leq VCO \leq 2,5$	Baja	1	(Parra Orobio et al., 2014)
$3 \leq VCO \leq 4$	Media	3	(Banks et al., 2012)
$VCO \geq 5$	Alta	5	(Chen et al., 2008)

La alimentación al reactor se realizó tres veces al día en porciones iguales. Previamente a la alimentación se retiró igual cantidad de digerido en volumen, con el objetivo de mantener el volumen dentro del reactor constante. El aumento de la VCO fue realizado cuando el sistema exhibía un comportamiento de CB estable (Parra Orobio et al., 2014) y (Sharma et al., 2000); la operación finalizó cuando el reactor presentó acidificación.

Tabla 4. Condiciones de operación en semi-continuo.

Parámetro	Valor		
	VCO Baja	VCO Media	VCO Alta
Volumen	6 L	6 L	6 L
Volumen de Operación	3,5 L	3,5 L	3,5 L
Temperatura	25 ± 3 °C	25 ± 3 °C	25 ± 3 °C
Agitación	No	No	No

VCO	1 gSV/L*día	3 gSV/L*día	5 gSV/L*día
SAR	186,5 gSV/kg	200,7 gSV/kg	188,85 gSV/kg

Las condiciones de operación del biodigestor durante la operación en semi-continuo son presentadas en la tabla 4. Las condiciones denominadas de acidificación para la DA se presentan en la tabla 5 y son tomadas de estudios anteriores (Chen et al., 2008).

Tabla 5. Condiciones de acidificación de la DA de SAR.

Parámetro	Valor
pH	> 6
CB	< 1
AGV's	< 200 mg ácido acético /L

3.2. VARIABLES DE RESPUESTA DE LA DA CON SAR

El desempeño y rendimiento del reactor se evaluó a partir de: a) el biogás producido (medido por desplazamiento volumétrico cada 24 horas), b) los AGV's, c) la CB expresada como la relación AGV's / Alcalinidad total (AT) y e) el pH. La tabla 6 presenta las variables que se monitorearon con sus respectivas unidades, su periodicidad y finalmente el método utilizado basado en el *Standard Methods* (APHA, 2005).

Tabla 6. Variables de respuesta de la DA de SAR.

Variable Monitoreada	Unidades	Periodicidad	Método
AGV'S	mg ácido acético/L	Cada 3 días	Titulación
AT	Mg CaCO ₃ /L	Cada 3 días	Titulación
pH	-----	Diario	Potenciométrico

Volumen de Biogás	mL	Diario	Desplazamiento Volumétrico
-------------------	----	--------	----------------------------

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO Y EL INÓCULO

Tabla 7. Caracterización fisicoquímica del inóculo.

Parámetro	Unidades	Valor
ST	gST/kg	28,2
SV	gSV/kg	20,00
pH	-	7,6
SV/ST	%	65

Tabla 8. Caracterización fisicoquímica del sustrato.

Parámetro	Unidades	Valor
Sólidos Totales (ST)	g/kg	220,8
Sólidos Volátiles (SV)	g/kg	165,22
Humedad	%p/p	77,92
pH	-	4,09
Relación C/N	-	15
Proteínas	g/kg	3,11
Carbohidratos	g/kg	112,45
Lípidos	g/kg	26,37

Caracterizaciones tomadas de: Alzate et al., 2016.

Las tablas 7 y 8 resumen la caracterización fisicoquímica del inóculo y el sustrato. Los SAR poseen una elevada cantidad de materia orgánica disponible representada en valores de 220,8 y 165,22 g/kg equivalentes a 22,08 %p/p de sólidos totales y 74,83 %p/p de sólidos volátiles, en comparación con el lodo de

estiércol bovino activado que presenta 28,2 y 20 g/kg equivalentes a 47,41 %p/p de sólidos totales y sólo un 20 %p/p de sólidos volátiles que según lo reportado por Kumar (2008) se denomina como lodo agotado disponible para degradar materia orgánica. Además, es necesario resaltar que la humedad (77,92 %) y las características generales presentadas por los SAR los convierten en altamente atractivos para realizar DA.

Los SAR se caracterizan por su bajo pH (4,09) el cual es debido a la gran cantidad de ácidos grasos presentes. El elevado contenido de AGVs, puede generar un efecto inhibitorio en las dos últimas etapas de la DA reduciendo la actividad metanogénica del sistema (Chen et al., 2008). En este estudio, el efecto nocivo de la carga de AGV's lo consigue regular el inóculo utilizado; ya que al tener un pH de 7,6 actúa como buffer amortiguando la acidez. La regulación de la acidez permite condiciones favorables para el arranque del biodigestor. Además, la alcalinidad total que posee el inóculo evita los efectos inhibitorios asociados a los ácidos grasos volátiles (Lorenzo et al., 2005; Raposo et al., 2011).

4.2. EVALUACIÓN DE LA DA

4.2.1. Estabilización del Inóculo

En la figura 4 se presenta la dinámica de los SV durante el periodo de 30 días que tomó la adaptación del inóculo. La carga inicial de SV fue de 24 gSV/kg, con el tiempo se observa el consumo de la materia orgánica finalizando en 7 gSV/kg, es decir que el consumo de SV fue de 70,83 %. Durante los 5 primeros días se observa un consumo más rápido exhibiendo una tendencia lineal y después, una estabilización, es decir, una adaptación al medio con variaciones de consumo y producción. Esta tendencia, más notoria en el día 15 es debida a la lisis celular de aquellos microorganismos que no consiguieron adaptarse al medio pero que se convierten nuevamente en materia orgánica disponible para consumo (Alzate et al., 2016).

Figura 4. Reducción de la carga de SV durante el pretratamiento.

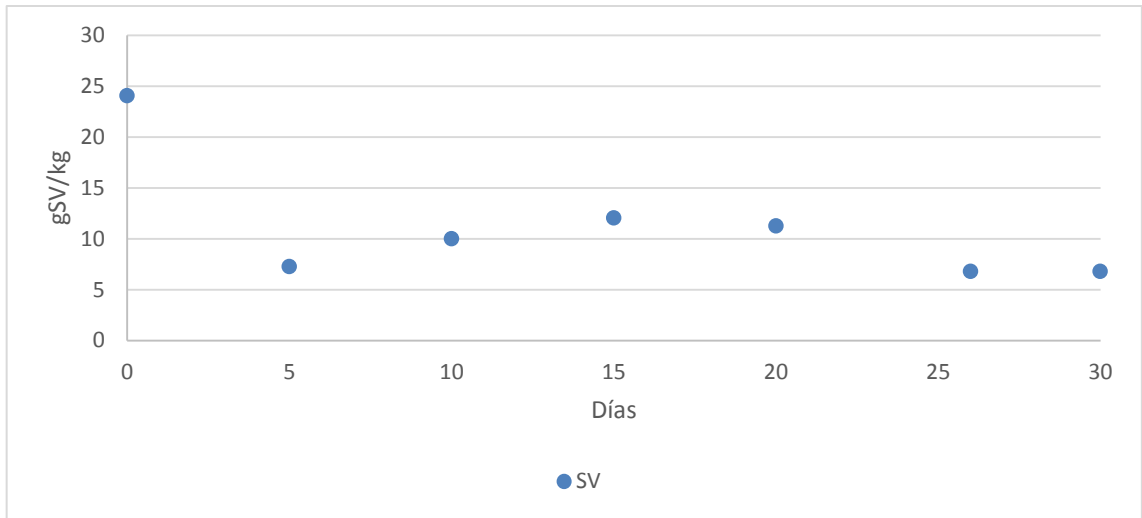
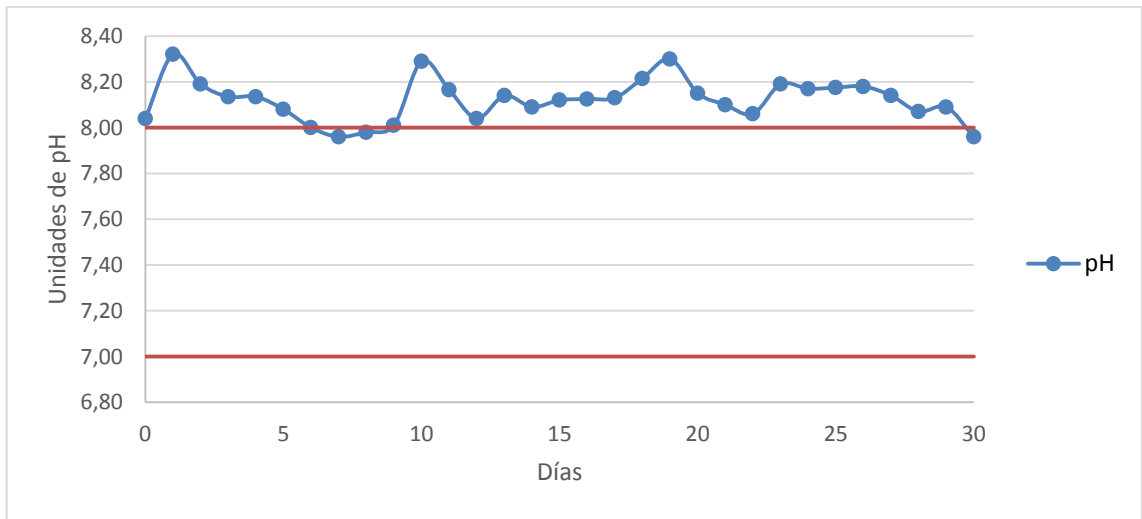


Figura 5. Comportamiento del pH durante el pretratamiento.



En la figura 5 se presenta el pH monitoreado durante esta etapa de la operación, cabe resaltar que los valores presentados son superiores al rango de operación seleccionado como adecuado para la DA y que está determinado entre 7 y 8 según lo reportado en estudios anteriores (Parra Orobio et al., 2014), esto permite asumir una alta alcalinidad del inóculo para soportar ácidos grasos.

En la figura 6 se evidencia que los ácidos grasos permanecieron oscilando en valores cercanos a los 400 mg ácido acético/L el cual se denomina un valor bajo y es consecuencia de la baja concentración de materia orgánica disponible (Cirne et al., 2007), además se debe comparar con la figura 7 que en el mismo tiempo mantuvo valores entre 0,1 y 0,3, siendo estos bajos en comparación a otros estudios desarrollados anteriormente en sistemas similares que han reportado valores de estabilidad que oscilan entre 0,1-0,8 (Yadvika et al., 2004).

Figura 6. Comportamiento de los AGV's durante el pretratamiento.

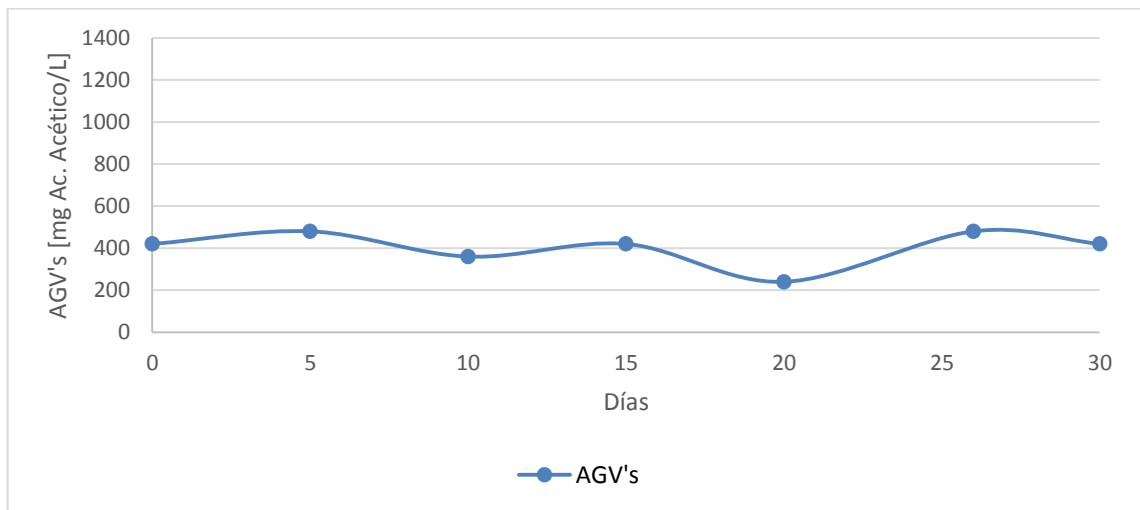
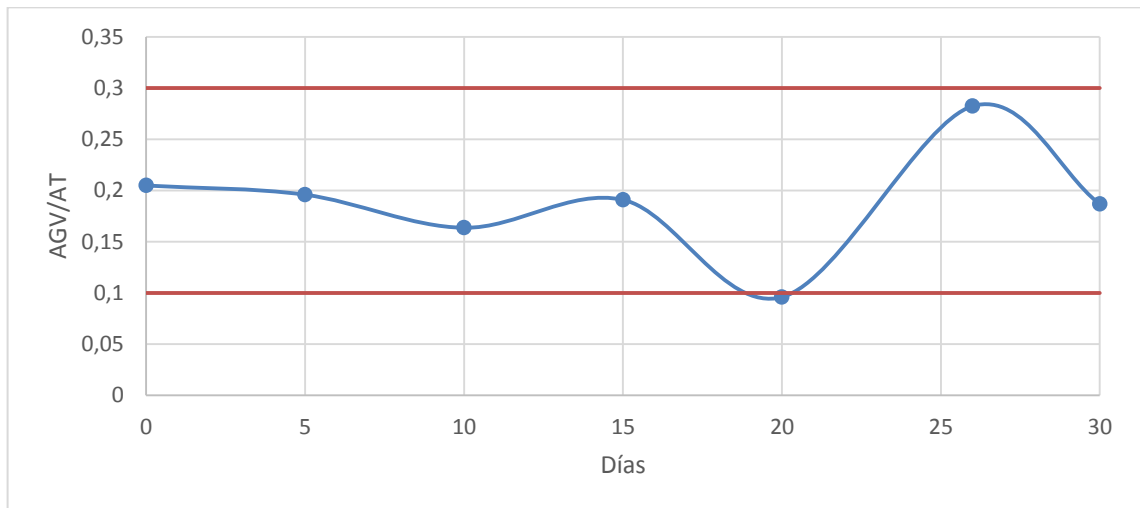


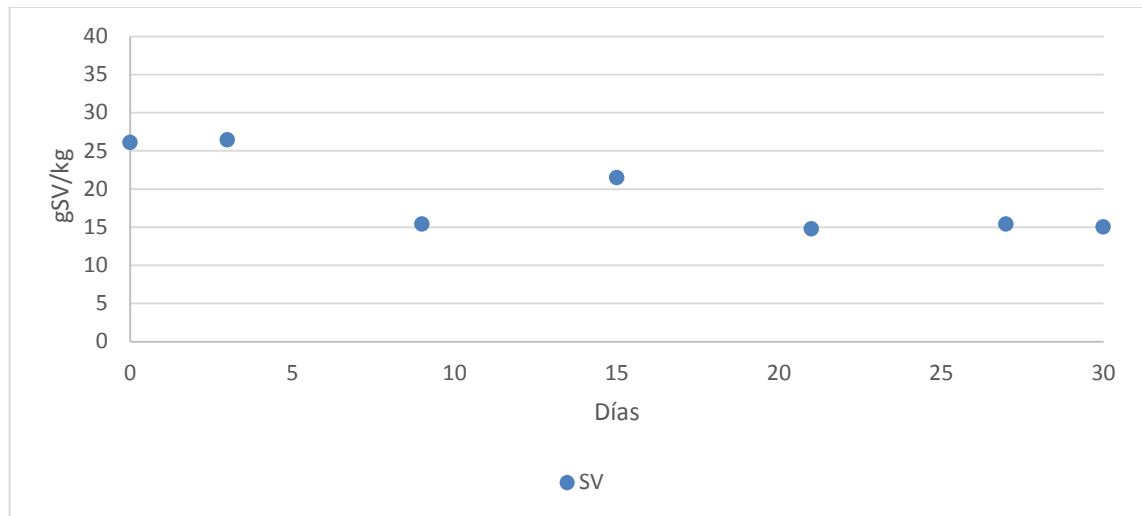
Figura 7. Comportamiento de la CB durante el pretratamiento.



4.2.2. Operación discontinua y semi-continua

Inicialmente se realizó una operación en discontinuo para evaluar la respuesta del inóculo al sustrato, esta etapa se realizó por un tiempo de 30 días. En la figura 8 se presenta el consumo de SV durante los días de operación discontinua.

Figura 8. Consumo de SV en operación discontinua.



Los SV evidencian la respuesta del inóculo al consumo de materia orgánica, se observa en la gráfica que al día 30, el consumo de SV fue del 42,31 % p/p desde unos SV iniciales de 26 g/kg hasta 15 g/kg. Al realizar una comparación con los estudios de Zang et al. (2015) y con Kondusamy et al. (2014) que obtuvieron consumos de SV de 77,3 % p/p y 60 % p/p en procesos de DA discontinua; se concluye que el inóculo logró una adaptación exitosa al sustrato y obtuvo rendimientos satisfactorios.

En las figuras 9 y 10 se presentan el comportamiento del pH y la concentración de AGV's durante la operación del reactor, el pH reportó valores estables entre 7-8 durante las primeras tres etapas. Después del noveno día de VCO de 5 gSV/L*día el reactor empezó a presentar señales de acidificación llegando a tener valores de pH hasta de 5,2, considerados ácidos para una operación de DA de SAR.

Figura 9. Comportamiento del pH durante la DA de SAR.

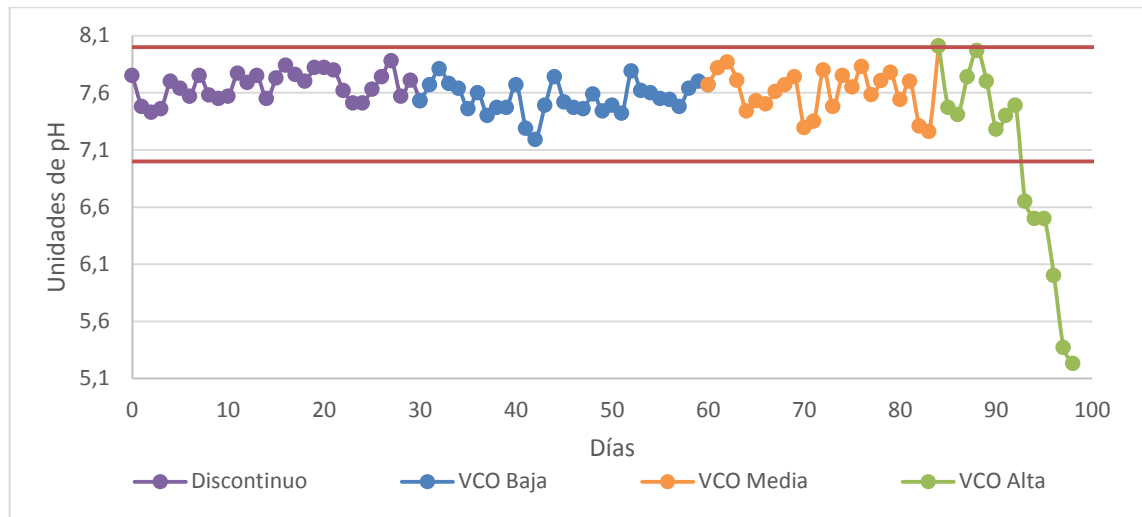
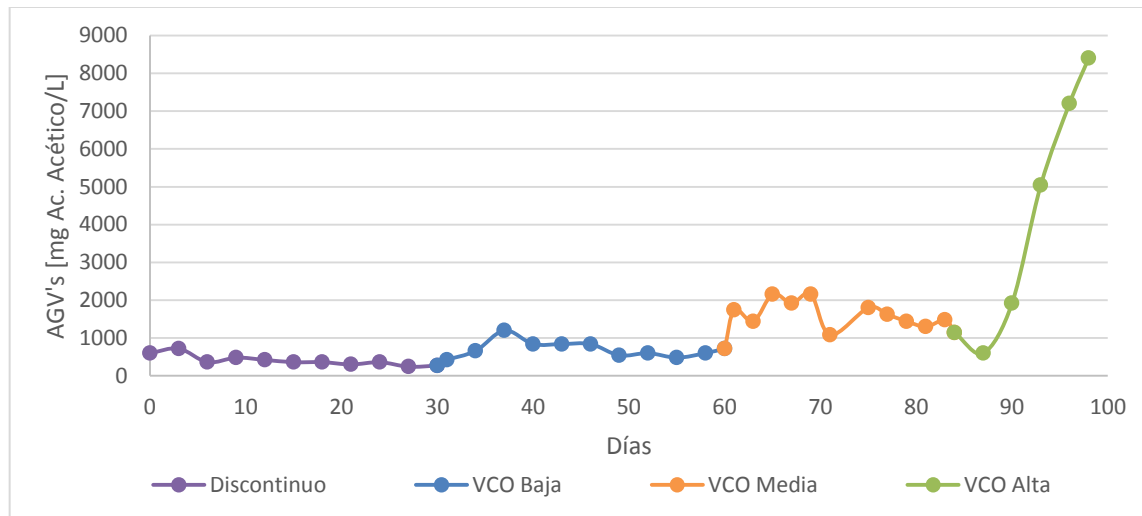


Figura 10. Comportamiento de los AGV's durante la DA de SAR.

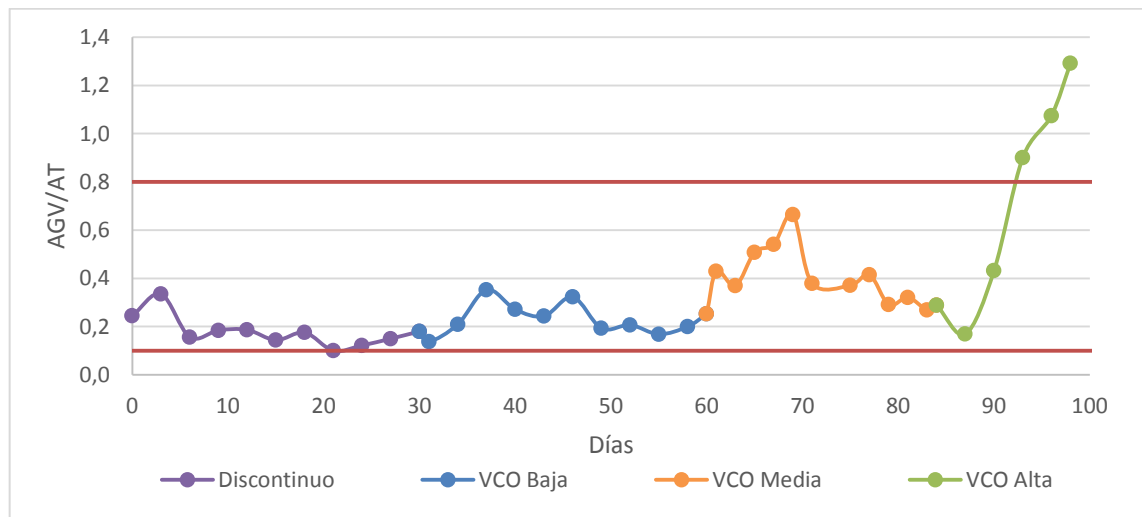


Simultáneamente se presenta en la figura 10 el comportamiento de los AGV's durante la operación del reactor tubular, se observa que en el proceso discontinuo y la VCO de 1 gSV/L*día el reactor responde de forma eficiente (Owamah et al., 2015) y el rango de los valores son inferiores a 1000 mg ácido acético/L y que según lo reportado por Parra Orobio et al. (2014), son bajos. En la VCO de 3 gSV/L*día los AGV's sufren un aumento y empiezan a oscilar en valores de 1.000

a 2.000 mg ácido acético/L que son soportados por la capacidad alcalina que posee el inóculo (Kumar, 2008). Finalmente se realizó la carga de 5 gSV/L*día denominada como alta (Chen et al., 2008) y describe un rango entre 2.000 y 8.000 mg ácido acético/L. Los AGV's acumulados que superan valores de 4000 mg ácido acético/L inhiben la producción de metano y acidifican el medio (Liu et al., 2016).

La figura 11 describe el comportamiento de la CB durante la DA de SAR. En el transcurso de la operación discontinua y la VCO baja este parámetro se mantuvo en un rango de valores de 0,1 a 0,3, siendo los más bajos del proceso y son consecuencia de la baja concentración de AGV's. Además, se puede observar que el proceso presentaba estado estable debido a que su relación AGV/AT, se encontraba entre 0,1 y 0,8 (Yadvika et al., 2004).

Figura 11. Comportamiento de la CB durante la DA de SAR.



En la VCO media el reactor presentó un aumento en la CB reportando valores entre 0,3 y 0,7, que según estudios anteriores son valores dentro del estado estable y que al mismo tiempo significa un buen desempeño del proceso pues hay

una concentración de AGV's considerable, pero sin alcanzar valores de acidificación (Parra Orobio et al., 2014).

Finalmente se realiza la VCO alta y los resultados aumentaron de forma crítica pues llegó a presentar valores de CB de hasta 1,2 que son consecuencia de un medio en acidificación (Yadvika et al., 2004). Esto ocurre debido a que la concentración de ácidos grasos es tan alta que logra afectar la alcalinidad del medio y romper la estabilidad que este presentaba.

El desempeño del reactor en términos de biogás producidos se vio afectado por las variaciones de VCO, los tiempos de retención y el consumo de materia orgánica según lo reportado por (Owamah et al., 2015).

En la figura 12 se presenta la producción de biogás reportada durante toda la investigación, es decir en la etapa discontinua y luego utilizando las diferentes velocidades de carga orgánicas. Durante los primeros 30 días se observa que el reactor presenta producción de biogás, pero en los últimos días la producción disminuye como consecuencia de la baja concentración de carga orgánica disponible en el reactor (Angelidaki et al., 2009).

Durante la primera VCO se presentan producciones de biogás que varían entre los 1.200 y los 2.000 mL/día, además después del día 50 se presenta una tendencia de producción estable pues la operación dura aproximadamente 30 días, tiempo que según estudios anteriores es suficiente para alcanzar una operación estable en el biodigestor (Martí, 2008).

Posteriormente se realiza la VCO de 5 gSV/L*día y se puede observar que el intervalo de producción del digestor aumenta y la cantidad de biogás medida se encuentra en intervalos de 1.600 a 2.700 mL presentado un mejor desempeño, pero durante este proceso no se alcanzan flujos estables debido a que después de alterar el digestor este requiere de un tiempo para lograr la estabilización.

Figura 12. Producción de biogás durante la operación de DA.

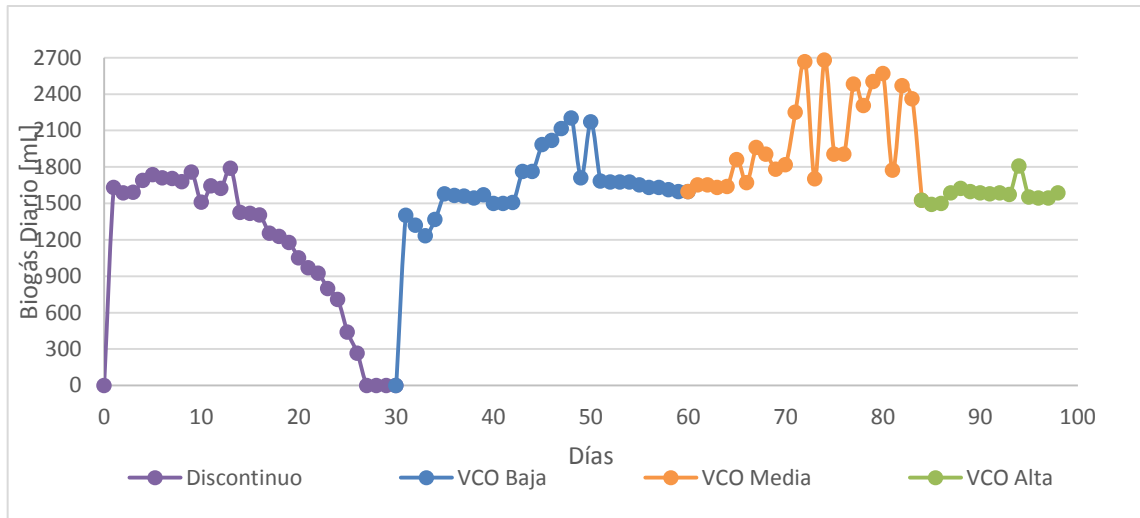
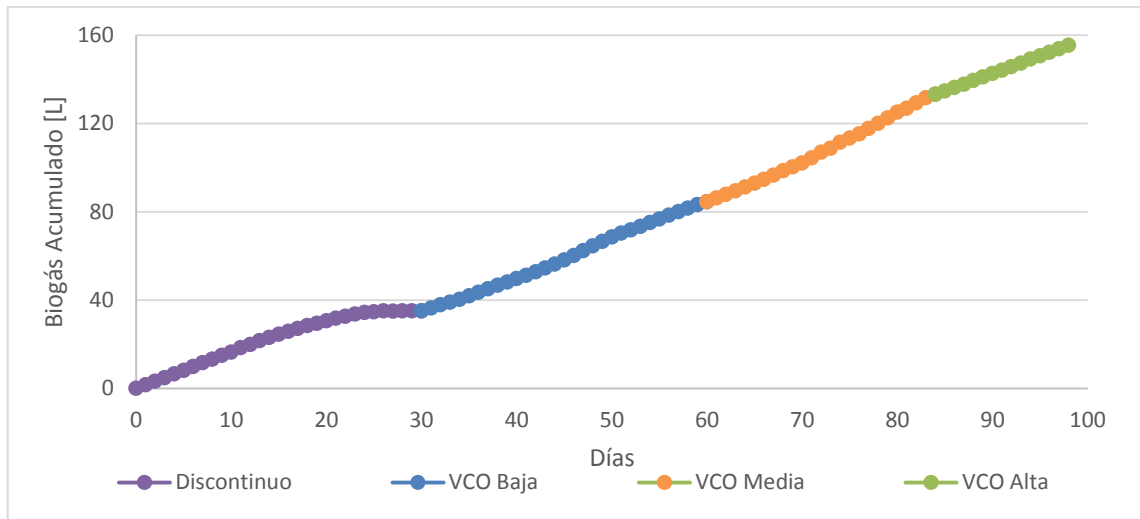


Figura 13. Biogás acumulado durante operación de DA.



A partir del día 84 se operó con una VCO de 5 gSV/L*día, en esta etapa se evidencia una producción estable cercana a los 1.600 mL de biogás/día que al ser comparada con las cargas anteriores presenta un desempeño aceptable. Sin embargo, realizando un análisis comparativo con la concentración de AGV's y la capacidad de estabilización se deduce que para ese nivel de acidez el biogás obtenido es pobre en metano y con altas concentraciones de CO₂, según estudios reportados anteriormente (Niu et al., 2013).

La figura 13 presenta el biogás acumulado producido durante toda la operación de DA, en ella se evidencian los cambios en la pendiente de la curva dependiendo de la VCO que se estuviese llevando a cabo en ese momento, además se reporta un valor acumulado final de 158 L en 96 días de operación.

En la tabla 9 se presenta un consolidado del desempeño de la DA de los SAR, bajo las diferentes condiciones de carga orgánica.

Se puede observar que para una VCO de 3 gSV/L*día el reactor alcanzó el mayor rendimiento en producción de biogás (0,96 m³ de biogás/kg SV consumidos), y que al revisar trabajos previos de DA tales como Liu and Gosh (1997) y Namsree et al. (2016) que obtuvieron rendimientos de 0,43 y 0,61 m³ de biogás/kg SV se determina que el proceso de digestión anaerobia de SAR alcanzó un rendimiento mayor, que puede ser justificado debido a la alta concentración de materia orgánica disponible en los SAR en comparación con diferentes tipos de residuos alimenticios tales como la pulpa de piña entre otros.

Tabla 9. Rendimiento de cada etapa de la DA de SAR.

Tipo de Operación	Unidades	Rendimiento
Discontinuo	m ³ de biogás/kg SV	0,82
VCO 1	m ³ de biogás/kg SV	0,89
VCO 2	m ³ de biogás/kg SV	0,96
VCO 3	m ³ de biogás/kg SV	0,40

CONCLUSIONES

- Es viable la digestión anaerobia de los sobrantes alimenticios del restaurante universitario de la UIS, en un bioreactor tubular a escala laboratorio a condiciones de temperatura ambiente.
- La operación del reactor tubular, para la digestión anaerobia de los sobrantes alimenticios del restaurante de la universidad, conlleva en principio una etapa de estabilización del inóculo, hasta alcanzar rendimiento de $0,82 \text{ m}^3$ de biogás/kg de SV consumidos.
- Una vez estabilizado el inóculo, es viable la digestión anaerobia de los sobrantes alimenticios del restaurante de la universidad en operación semi-continua del reactor tubular, con una carga de $3 \text{ gSV/L} \cdot \text{día}$, alcanzándose un excelente rendimiento expresado como $0,96 \text{ m}^3$ de biogás/kg de SV consumidos.

BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA, Y., OBAYA, M. *La digestión anaerobia: Aspectos teóricos. Parte I.* ICIDCA: Sobre los derivados de la caña de azúcar, 1, 2005, 35-48.
- ALZATE MONCADA, M. S., QUINTERO SILVA, M. *Caracterización de los grupos tróficos durante un proceso de digestión anaerobia con lodo estiércol bovino usando un método de bajo costo.* Revista ION. 2016 En proceso de publicación.
- ÁLVAREZ, E., CALDERÓN, D. *Modelamiento del rendimiento de metano de los residuos sobrantes del restaurante UIS. Trabajo de grado Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2014.*
- ANGELIDAKI, I., ALVES, M., BOLZONELLA, D., BORZACCONI, L., CAMPOS, J. L., GUWY, A. J., VAN LIER, J. B. *Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays.* Water Science & Technology, 2009, 927-934.
- ANGELIDAKI I., KARAKASHEV D., BATSTONE D., PLUGGE C., STAMS A. *Biomethanation and Its Potential.* Methods in Enzymology, 494, 2011, 327-351.
- APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater.* Washington: American Public Health Association. 2005.
- BANKS, C. J., ZHANG, Y., JIANG, Y., HEAVEN, S. *Trace element requirements for stable food waste digestion at elevated ammonia concentrations.* Bioresource Technology, 104, 2012, 127-135.

- BERMÚDEZ, J.J., CÁNOVAS, M., MANJÓN, A., IBORRA, J.L., HOWELL, J.A. *La Digestión Anaerobia*. Murcia: Universidad de Murcia, 1988.
- BOALLAGUI, H., BEN CHEIKH, R., MAROUANI, L., HAMDI, M. *Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester*. *Bioresource Technology*, 86, 2003, 85-59.
- CARDONA, C., SÁNCHEZ, O., RAMÍREZ, J., ALZATE, L. *Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 2, 2004, 78-89.
- CHEN, Y., CHENG, J. J., CREAMER, K. S. *Inhibition of anaerobic digestion process: A review*. *Bioresource Technology*, 99, 2008, 4044-4064.
- CHENG, H., HU, Y. *Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China*. *Bioresource Technology*, 101, 2010, 3816-3824.
- CHU, C.-F., LI, Y.-Y., XU, K.-Q., EBIE, Y., INAMORI, Y., KONG, H.-N. *A pH- and temperature-phased two-stage process for hydrogen and methane production from food waste*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 2008, 4739-4746.
- CIRNE, D., PALOUMET, X., BJÖRNSSONA, L., ALVES, M., MATTIASSON, B. *Anaerobic digestion of lipid-rich waste-Effects of lipid concentration*. *Renewable Energy*, 32, 2007, 965-975.
- CUERVO, A., CARDOZO, R., PIÑEROS, N. *Dimensionamiento de un biodigestor para el manejo de los residuos sólidos orgánicos generados en la central de*

mercado Plaza Kennedy en Bogotá. Trabajo de grado en Ingeniería Ambiental. Bogotá: Universidad Manuela Beltrán. 2007.

DÍAZ-BÁEZ, M.C., ESPITIA, S., MOLINA, F. *Digestión anaerobia: Una aproximación a la tecnología.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 2002.

FAO. El estado mundial de la agricultura y la alimentación: *Las mujeres en la agricultura: Cerrar la brecha de género en aras del desarrollo.* Roma. 2011.

FAO. El estado mundial de la agricultura y la alimentación: *Invertir en la agricultura para construir un mejor futuro.* Roma. 2012.

GOU, C., YANG, Z., HUANG, J., WANG, H., XU, H., & WANG, L. *Effect of temperature and organic loading rate on the performance and microbial community of anaerobic co-digestion of waste activated sludge and food waste.* Chemosphere, 105, 2014, 146-151.

JAYALAKSHMI, S., KURIAN, J., SUKUMARAN, V. (2009) *Bio hydrogen generation from kitchen waste in an inclined plug flow reactor.* International Journal of hydrogen energy, 34, 8854-8858.

KAWAI, M., NAGAO, N., TAJIMA, N., NIWA, C., MATSUYAMA, T., TODA, T. (2014) *The effect of the labile organic fraction in food waste and the substrate/inoculum ratio on anaerobic digestion for a reliable methane yield.* Bioresource Technology, 157, 174-180.

KONDUSAMY, D., KALAMDHAD, A. S. *Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production-A review.* Journal of Environmental Chemical Engineering, 2, 2014, 1821-1830.

- KREITH, F., GOSWAMI, Y. *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*. Colorado: CRC Press. 2007.
- KUMAR, S. *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production. Principles and Applications*. Estados Unidos: Blackwell Publishing. 2008.
- LIU, C., ZHANG, Y., CHEN, Q. *Characterization of methanogenic activity during higt-solids anaerobic digestion of sewage sludge*. *Biochemical Engineering Journal*, 109, 2016, 96-100.
- LIU, T., GHOSH, S. *Phase separation during anaerobic fermentation of solid substrates in an innovative plug-flow reactor*. *Water Science and Technology*, 36, 1997, 303-310.
- LORENZO ACOSTA, Y., OBAYA ABREU, M. *La Digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos. Parte I*. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar., 2005, 35-48.
- MARIN-BATISTA, J., ESCALANTE, H., CASTRO, L. *Efecto de la carga orgánica de la gallinaza de jaula en el potencial de biometanización*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 17, 2015, 18-23.
- MARTÍ HERRERO, J. *Biodigestores familiares: guía de diseño y manual de instalación*. La Paz, Bolivia: GTZ-Energía. 2008.
- MATA-ÁLVAREZ, J. *Biomethanization of the organic fraction*. España: IWA Publishing. 2003.

- MAVDT. *Seminario sobre el aprovechamiento y manejo de los residuos sólidos*. Manizales: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. 2004.
- NAMSREE, P. *Anaerobic digestion of pineapple pulp and peel in a plug-flow reactor*. *Journal of Environmental Management*, 110, 2012, 40-47.
- NIU, Q., QIAO, W., QUIANG, H., HOJO, T., LI, Y-Y. *Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: Stability, inhibition and recovery*. *Bioresource Technology*, 137, 2013, 358-367.
- OWAMAH, H. I., IZINYON, O. C. *The effect of organic loading rates (OLRs) on the performances of food wastes and maize husks anaerobic co-digestion in continuous mode*. *Sustainable energy technologies and Assessments*, 11, 2015, 71-76.
- PARRA OROBIO, B. A., TORRES LOZADA, P., MARMOLEJO REBELLÓN, L. F., CÁRDENAS CLEVES, L. M., VÁSQUEZ FRANCO, C., TORRES LÓPEZ, W. A., ORDÓÑEZ ANDRADE, J. A. *Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal*. U.D.C.A. *Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2), 2014, 553-562.
- PIPATTI, C. SHARMA, M. YAMADA, J. W. SILVA , Q. GAO. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Waste Generation, Composition and Management Data*. Hayama, Japan: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006.
- RAPOSO, F., DE LA RUBIA, M. A., FERNÁNDEZ CEGRÍ, V., BORJA , R. *Anaerobic Digestion of Solid Organic Substrates in Batch Mode: An*

Overview Relating to Methane Yields and Experimental Procedures.
Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 2011, 861-877.

SEVERICHE, C., ACEVEDO, R. *Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación.* INGENIUM Revista de la Facultad de Ingeniería, 28, 2013, 6-15.

SHARMA, V., TESLA, C., LASTELLA, G., COMPARATO, M., CORNACCHIA, G. *Inclined plug-flow type reactor for anaerobic digestion of semi-solid waste.* Applied Energy, 65, 2000, 173-185.

TEJEDA, L., TEJADA, C., VILLABONA, A. *Producción de bioetanol a partir de la fermentación alcohólica de jarabes glucosados derivados de cáscaras de naranja y piña.* Revista Educación en Ingeniería, 2010, 120-125.

VANNECKE, T.P.W., LAMPENS, G.A., EKMAB, G.A., VOLCKE, E.I.P. *Evaluation of the 5 and 8 pH point titration methods for monitoring anaerobic digesters treating solid waste.* Environmental Technology, 36, 2015, 861-869.

XIAOWEI, P., IVO ACHU, N., JING, L. *Improving methane production from wheat straw by digestate liquor recirculation in continuous stirred tank processes.* Renewable Energy, 85, 2016, 12-18.

YADVIKA, S., SREEKRISHNAN, T. R., KOHLI, S., RANA, V. *Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques-a review.* Bioresource Technology, 95, 2004, 1-10.

YUAN, H., ZHU, N. *Progress in inhibition mechanisms and process control of intermediates and by-products in sewage sludge anaerobic digestion.* Renewable and Sustainable Energy Reviews , 58, 2016, 429-438.

ZANG, W., ZHANG, L., LI, A. *Enhanced anaerobic digestion of food waste by trace metal elements supplementation and reduced metals dosage by green chelating agent [S,S]-EDDS via improving metals bioavailability. Water Research, 84, 2015, 266-277.*

ANEXOS

ANEXO A. Caracterización de los SAR y el EB.

PARÁMETROS	UNIDADES	SAR	EB
pH	-	4.095	7.6
ST	g / kg	220.80	47.41
SV	g / kg	165.22	20.00
SST	g SST /L	N.D.	5.44
SSV	g SSV /L	N.D.	4.92
AGV	g AGV /L	3.41	1.20
AT	gCaCO ₃ /L	1.90	5.66
DQO	g O ₂ /kg	1257.25	N.D.
Proteínas	g /kg	3.115	N.D.
Lípidos	g /kg	26,37	N.D.
Carbohidratos	g /kg	112,45	N.D.
Holocelulosa	% p/p	6.165	N.D.
Lignina	% p/p	< 0.01	N.D.
C	% p/p	43.28	N.D.
H	% p/p	5.19	N.D.
O	% p/p	36.345	N.D.
N	% p/p	3.115	N.D.
S	% p/p	0.45	N.D.
Poder calorífico inf.	Kcal /kg	783.5	N.D.
Fórmula empírica	-	C ₁₆ H ₂₃ O ₁₀ N	-

*N.D. No Determinado

Caracterización tomada de: Alzate et al., 2016.

ANEXO B. Protocolo de recolección de SAR.

El restaurante universitario produce un gran volumen de residuos alimenticios post cocción, los cuales no son provistos de una buena disposición para un aprovechamiento dentro de la universidad. La recolección de estos debe hacerse de manera eficaz, efectiva y rápida para evitar olores ofensivos a la comunidad. Durante el proceso de muestreo, los cúmulos de elementos post cocción deben estar previamente separados para que la muestra sea lo más representativa en cuanto al estudio se refiere. El almacenamiento masivo de SOLO nuestro material de interés requiere un muestreo uniforme que tenga en cuenta las partes diferenciales que se pueden formar en la deposición del material.

Procedimiento

- Ubicar la fuente de la muestra, se estima volumen (TOTAL).
- Mediante una agitación, traqueteo oscilatorio se unifica toda la fuente para homogenizarla y se realiza la fase exploratoria de forma manual.
- La extracción de la muestra piloto debe hacerse en un ambiente seco aireado y con una temperatura no mayor los 22°-23°c para evitar la estimulación de la muestra y su propio consorcio microbiano presente.
- Hacer dos tomas de 2000 g desde el fondo de los recipientes de almacenamiento para asegurar una muestra representativa que permita la repetitividad del experimento.
- Licuar las muestras tomadas para homogenizar y disminuir el tamaño de partícula, y por ende mejorar la solubilidad de la carga orgánica.
- Mezclar los batidos por semanas, y finalmente mezclar las muestras representativas de las semanas.
- Cuando se tenga el concentrado final (batido) se somete a cadena de frío intenso para mantener las propiedades y detener cualquier actividad microbiología que pueda afectarlas para su correcta caracterización.
- Caracterización fisicoquímica y organoléptica.

Caracterización de la muestra

Características organolépticas

Se debe realizar una caracterización cualitativa de las condiciones de los residuos de comida tomados de bienestar universitario de la universidad, tales como su color, su olor y su textura para así tener una idea general de si está en buenas condiciones para realizar un experimento reproducible, es importante que a simple vista las muestras tengan apariencias cualitativas similares como primer filtro de análisis.

Características fisicoquímicas

Luego del análisis cualitativo se efectúa un estudio más detallado y de orden cuantitativo, para conocer cómo se comportan los valores de algunas variables, que permiten ser evaluadas en el laboratorio de biotecnología de ingeniería química como lo son: la humedad de la muestra, la densidad, los sólidos totales (ST) y los sólidos volátiles (SV) las cuales deben cuantificadas y controladas periódicamente para determinar si existen diferencias significativas en los residuos producidos.

Posteriormente se procede a estudios más detallados concernientes a composición química de las muestras que han sido almacenadas en frío (0°C), en estas se miden la cantidad de lípidos, carbohidratos y proteínas presentes en la muestra, además de sustancias importantes como carbono total, carbono orgánico oxidable, nitrógeno total, hidrogeno y oxígeno, con el fin de conocer la relación C/N promedio del residuo, permitiendo obtener un cálculo del rendimiento teórico. Todo el análisis entrega una idea de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV's) en el proceso de digestión anaerobia (DA) haciendo evidente la probabilidad de problemas de inhibición por pH en los primeros días del montaje. Por las mismas razones también es importante hacer mediciones tanto de los AGV's iniciales como de la capacidad buffer del residuo de comida o alcalinidad total (AT), siendo estas dos últimas realizadas en el laboratorio de biotecnología.

Se deben tener en cuenta las concentraciones de algunos nutrientes que pueden ser inhibitorias como lo son el calcio (Ca), el magnesio (Mg) el sodio (Na) y el potasio (K) (Angelidaki, et al., 2009). Por último se debe hacer una medición de la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO) para tener el punto de referencia de la reducción de la materia orgánica que se convirtió en biogás.

Protocolo tomado de: Álvarez, *et al.*, 2014.

ANEXO C. Volumen de metano normalizado.

Para poder comparar las producciones de metano y por lo tanto el rendimiento, es necesario llevar el volumen de metano a condiciones normalizadas. Este procedimiento se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$V_{NTP} = V \cdot \frac{P_0 - P_v \cdot T_0}{P_{atm} \cdot T}$$

V_{NTP} Volumen de gas en condiciones normales (mL)

V Volumen de gas generado (mL)

P_0 Presión de metano en condiciones normales (1013,25 mbar)

P_v Presión de vapor del agua (mbar).

$$P_v \text{ mbar} = 10 \cdot e^{16,573 \cdot \frac{3988,842}{T \text{ K} - 3847}}$$

T_0 Temperatura estándar 273,15 (K)

T Temperatura al momento de realizar la medición (K)

Protocolo tomado de: Díaz-Báez, et al., 2002.

ANEXO D. Registro fotográfico.

1. Menú del restaurante universitario de la UIS y SAR listos para ser alimentados al reactor.



2. Estiércol bovino fresco y reactor de estabilización.



3. Reactor tubular para DA de SAR.



4. Equipos utilizados para medición de pH, AGV's, AT y CB.



5. Dispositivo utilizado para medición de biogás a través de desplazamiento de solución salina.

