

ESTUDIO DE LA RELACIÓN DE MEZCLA DE COSUSTRATOS PARA LA  
CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE SOBRESALIENTES ALIMENTICIOS DE  
RESTAURANTE CON ESTIÉRCOL BOVINO

ELIBERTO MORENO CORREDOR  
ZULLY JOHANNA PORRAS BADILLO

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

2016

ESTUDIO DE LA RELACIÓN DE MEZCLA DE COSUSTRATOS PARA LA  
CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE SOBRANTES ALIMENTICIOS DE  
RESTAURANTE CON ESTIÉRCOL BOVINO

ELIBERTO MORENO CORREDOR

ZULLY JOHANNA PORRAS BADILLO

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar el título de

Ingeniero Químico

**DIRECTOR**

HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ

Ingeniero Químico, M. Sc., PhD

**Codirectores**

LILIANA DEL PILAR CASTRO MOLANO

Ingeniera Química, PhD

LUIS ENRIQUE LAMBIS BENITEZ

Ingeniero Químico, M. Sc. (c)

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

2016

## DEDICATORIA

*A Dios por haberme permitido llegar hasta aquí, por darme fortaleza, motivación y perseverancia para alcanzar esta meta en mi vida.*

*A mi mamá Eduviges, por haberme enseñado a salir adelante a pesar de las dificultades, por brindarme el amor y la confianza suficiente, también por estar ahí en los momentos más difíciles, todos estos logros son principalmente para ti.*

*A mi padre que a pesar que ya no esté en este mundo, un campesino amante de su tierra y de las tradiciones, a quien siempre admiraré.*

*A mis hermanos Florinda, Clodomiro y John Jairo, por ese apoyo incondicional que me han brindado y especialmente a Clodomiro por ser el apoyo moral y económico, que tuve siempre en esta etapa que casi culmina.*

*A mis padrinos Jaime Ramírez y Heladio Castellanos, por la ayuda brindada y a ti principalmente madrina Cecilia Vargas por tu confianza y por tu amor.*

*A toda mi familia, compañeros y amigos, por estar ahí para animarme.*

*A todos los campesinos que trabajan la tierra y a los de mi vereda, por la admiración, el respeto y las enseñanzas.*

***Eliberto Moreno Corredor***

## DEDICATORIA

*A Dios por ser el aliento y amparo en cada momento de mi vida.*

*A mis padres, Gladys y Héctor por su dedicación y apoyo incondicional, uds son el motivo y la inspiración para luchar en todas las batallas.*

*A mi hermano, Jhonattan, amigo y cómplice incondicional.*

*A mis amigos y compañeros en esta carrera, Paula y Helmuth, y muchos otros, quienes a pesar de las dificultades y los desacuerdos siempre supieron sacar sonrisas.*

*A mis familiares y amigos, que en la distancia han sabido dar apoyo y cariño.*

**Zully Johanna Porras**

*“La vida es como una bicicleta. Para mantener el equilibrio tienes que seguir adelante”.-  
Albert Einstein*

## **AGRADECIMIENTOS**

A los doctores Humberto Escalante y Liliana del Pilar Castro, por brindarnos la oportunidad de hacer parte del grupo de digestión anaerobia.

Al ingeniero Luis Lambis, por todas sus enseñanzas, su paciencia y sus consejos, que fueron y serán de gran ayuda para nuestro crecimiento personal.

A don Guillermo, don Wilson y don Eduardo, por toda su colaboración y tiempo en el desarrollo de este proyecto.

A todos los compañeros del grupo de investigación, por compartir con nosotros sus experiencias y conocimientos.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Química, por contribuir a nuestra formación integral.

## TABLA DE CONTENIDO

pág.

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	15
1.1. BIOQUÍMICA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA. ....	19
1.2. PARÁMETROS DE ESTABILIDAD DE LA DA .....	22
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	24
2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS SAR, DEL EB Y DEL INÓCULO .....	24
2.2. PERFIL DE BIODEGRADABILIDAD EN FUNCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA Y LA RELACIÓN DE MEZCLA. ....	25
2.2.1. <i>Diseño de Experimentos 2<sup>n</sup></i> .....	25
2.2.2. <i>Diseño Central Compuesto</i> .....	27
<b>3. RESULTADOS</b> .....	29
3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS SAR, DEL EB Y DEL INÓCULO .....	29
3.2. PERFIL DE BIODEGRADABILIDAD EN FUNCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA Y LA RELACIÓN DE MEZCLA. ....	32
3.2.1 <i>Diseño de experimentos factorial 2<sup>2</sup></i> .....	32
3.2.2 <i>Diseño de experimentos diseño central compuesto</i> .....	37
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	44
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	45

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Bioquímica de la digestión anaerobia .....	21
Figura 2. Diseño central compuesto .....	27
Figura 3. Rendimientos de metano obtenidos, para la codigestión de SAR y EB con carga orgánica 10 gSV/l y relación de mezcla 90:10, y la monodigestión de SAR y EB a 10 gSV/l .....	33
Figura 4. Rendimientos de metano obtenidos, para la codigestión de SAR y EB con carga orgánica 18 gSV/l y relación de mezcla 90:10, y la monodigestión de SAR y EB a 18 gSV/l .....	33
Figura 5. Rendimientos de metano obtenidos, para la codigestión de SAR y EB con carga orgánica 10 gSV/l y relación de mezcla 50:50, y la monodigestión de SAR y EB a 10 gSV/l .....	34
Figura 6. Rendimientos de metano obtenidos, para la codigestión de SAR y EB con carga orgánica 18 gSV/l y relación de mezcla 50:50, y la monodigestión de SAR y EB a 18 gSV/l .....	34
Figura 7. Evaluación de la estabilidad del proceso centrada en el pH.....	36
Figura 8. Variación del pH en el tiempo para los sistemas estudiados.....	39
Figura 9. Variación de la relación AGV/AT en el tiempo para los sistemas estudiados. ....	40
Figura 10. Rendimiento y volumen acumulado de metano para los sistemas de mono-digestión de estiércol bovino.....	40
Figura 11. Rendimiento y volumen acumulado de metano para los sistemas de mono-digestión de SAR .....	41
Figura 12. Rendimiento y producción acumulada de metano para los diferentes sistemas de co-digestión evaluados. ....	41

Figura 13. Superficie de respuesta del rendimiento de metano para la co-digestión de SAR y EB.....43

Figura 14. Comportamiento del rendimiento de metano para la co-digestión de SAR y EB.....43

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Diseño de experimentos para evaluación de efectos.....	26
Tabla 2. Caracterización de sustratos e inóculo. ....	29
Tabla 3. Caracterización elemental de sustratos. ....	30
Tabla 4. Resultados del análisis ANOVA.....	36

## LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo A. Producción acumulada de metano, capacidad Buffer y pH de monodigestión y codigestión para cada carga orgánica estudiada.....	51
Anexo B. Método volumétrico - Desplazamiento alcalino .....	54
Anexo C. Normalización de la producción diaria de biogás a condiciones de temperatura y presión estándar (273.15 K y 1 atm).....	55
Anexo D. Método gravimétrico – Determinación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF) en muestras sólidas y semisólidas .....	56
Anexo E. Método titrimétrico para la medición de AGV y alcalinidad.....	58

## NOMENCLATURA

AGV: Ácido Graso Volátil.

AT: Alcalinidad Total

CoDA: Codigestión Anaerobia

EB: Estiércol Bovino

PBM: Potencial de Biometanización

RIS: Relación Inóculo Sustrato

SAR: Sobrantes Alimenticios de Restaurante

SF: Sólidos Fijos

ST: Sólidos Totales

SV: Sólidos Volátiles

VNTP: Volumen a condiciones estándar

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO DE LA RELACIÓN DE MEZCLA DE COSUSTRATOS PARA LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE SOBRANTES ALIMENTICIOS DE RESTAURANTE CON ESTIÉRCOL BOVINO\*

**AUTORES:** ELIBERTO MORENO CORREDOR  
ZULLY JOHANNA PORRAS BADILLO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Sobrantes alimenticios de restaurante, estiércol bovino, digestión anaerobia, codigestión anaerobia, ácidos grasos volátiles.

**CONTENIDO:** La generación mundial de sobrantes alimenticios de restaurante (SAR) sobrepasa actualmente los 670 millones de toneladas al año y gestionarlos ha causado una problemática relacionada con la contaminación de aguas subterráneas, la generación de malos olores, entre otras. Por lo tanto, han surgido estrategias como la digestión anaerobia (DA), que además de permitir estabilizar el residuo lo valoriza al convertirlo en una fuente de energía como lo es el biogás. Sin embargo, las características de los SAR, tales como una alta biodegradabilidad y un desbalance nutricional en términos de micro y macronutrientes, genera inestabilidades en los sistemas de DA llevándolos al fracaso, cuando se emplean valores pequeños de relación inóculo sustrato (RIS).

Para evitar esta inestabilidad se emplea la codigestión anaerobia (CoDA), digestando simultáneamente los SAR y el estiércol bovino (EB), con el fin de aprovechar sus características complementarias. Por consiguiente y para alcanzar los mejores rendimientos posibles bajo la gestión de SAR por CoDA con EB, en esta investigación se evaluaron los efectos de las variables relación de mezcla y carga orgánica, sobre el rendimiento y la estabilidad del proceso. Inicialmente se realiza un estudio de los efectos mediante un diseño de experimentos  $2^2$ , en donde se encontró que tanto las variables como su interacción, tienen un efecto significativo sobre el comportamiento del sistema y luego se realiza a través de un diseño central compuesto, un estudio de la curvatura y de regiones de mayor rendimiento.

Durante la experimentación se monitoreó la concentración de ácidos grasos volátiles, la alcalinidad total, el pH y la producción diaria de biogás. Los resultados mostraron que a una carga orgánica de 22 gSV/l y relación de mezcla 83:17 se obtienen los mayores rendimientos.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Humberto Escalante Hernández Ing. Químico M. Sc, PhD. Codirector Liliana del Pilar Castro Molano Ing. Química PhD Codirector Luis Enrique Lambis Benitez M. Sc. (c).

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF MIXING CO-SUBSTRATES FOR ANAEROBIC CO-DIGESTION RESTAURANT FOOD WASTE WITH CATTLE MANURE\*

**AUTHORS:** ELIBERTO MORENO CORREDOR

ZULLY JOHANNA PORRAS BADILLO\*\*

**KEYWORDS:** Restaurant food waste, cattle manure, anaerobic digestion, anaerobic co-digestion, volatile fatty acids.

**CONTENT:** The global generation of restaurant food waste (RFW) now exceeds 670 million tons per year and manage them has caused problems related to pollution of groundwater, generating odors, among others. Therefore, strategies have emerged as anaerobic digestion (AD), which in addition to allowing stabilize the residue which is measured at turning it into an energy source as it is biogas. However, the characteristics of the RFW, such as high biodegradability and nutritional imbalance in terms of micro and macronutrients, generates instabilities in AD systems leading them to fail, when small values of inoculum substrate ratio (ISR) are used.

To avoid this instability anaerobic co-digestion (ACoD), digestando simultaneously SAR and cattle manure (CM), in order to exploit their complementary characteristics is used. Therefore, and to achieve the best possible returns under the management of RFW ACoD with CM, in this research the effects of variable mixing ratio and organic load on yield and process stability were evaluated. Initially, a study of the effects is performed by a design of experiments  $2^2$ , where it was found that both variables and their interactions have a significant effect on the system behavior and then is carried through a central composite design, a study curvature and performing regions.

During the experiment the concentration of volatile fatty acids, total alkalinity, pH and daily biogas production was monitored. The results showed that at an organic load of 22 gVS / l and mixture ratio of 83:17 higher yields are obtained.

---

\*Thesis

\*\* Faculty of Engineering Physic-Chemical. School of Chemical Engineering. Director Humberto Escalante Hernández Chemical Engineer M. Sc, PhD. Codirector Liliana del Pilar Castro Molano Chemical Engineer PhD. Codirector Luis Enrique Lambis Benitez Chemical Engineer M. Sc. (c).

## INTRODUCCIÓN

En el mundo se producen alrededor de 670 millones de toneladas de sobrantes alimenticios de restaurante (SAR) por año (Zaman, 2016). En Colombia para el año 2015 se generaron 2,03 millones de toneladas (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios-Superservicios, 2015). La mala disposición de estos residuos se refleja en la contaminación de aguas subterráneas, generación de olores, y riesgo de propagación de enfermedades (Javkhlan Ariunbaatar, y otros, 2015). Las estrategias tradicionales de gestión (rellenos sanitarios o la incineración) se hacen menos deseables debido a altos costos y regulaciones ambientales más estrictas. Por lo anterior, es apremiante la búsqueda de nuevas alternativas de gestión y valorización de estos desechos (Zhang, Su, Baeyens, & Tan, 2014).

La digestión anaerobia (DA) se ha posicionado como una estrategia eficiente de valorización energética y estabilización de residuos de distinta naturaleza (Velasquez Tamayo & Villamizar Jaimes, 2014) (Tellez Reyes & Vega Buitrago, 2012). Durante la DA, un consorcio microbiano inhibido por el oxígeno, degrada parte de los materiales orgánicos de un sustrato hasta convertirlos en biogás, estabilizando el residuo en un digestato rico en nutrientes (N,K,P). Los SAR constituyen un sustrato prometedor para esta tecnología dado su contenido en carbohidratos, lípidos, proteínas y elementos traza (Fisgativa, Tremier, & Dabert, 2016), además de su humedad entre 70 y 80% y su poco contenido lignocelulósico (Naroznova, Møller, & Scheutz, 2016). Se han reportado rendimientos de producción de metano por DA a partir de SAR cercanos a un promedio de  $0.46 \text{ m}^3/\text{kgSV}$  ( $4.6 \text{ kWh}/\text{kgSV}$ ) (Fisgativa, Tremier, & Dabert, 2016).

La biodegradación anaerobia ocurre en cuatro etapas, cada una con una cinética particular que debe estar en sincronía metabólica con las otras para asegurar la estabilidad del proceso. En este sentido la DA de los SAR es especialmente sensible a la inhibición por dos factores principalmente, el primero, la rápida

biodegradabilidad de los SAR que puede ocasionar un desbalance entre la producción y el consumo de compuestos previos al metano, como los ácidos grasos volátiles (AGVs), cuya acumulación puede causar acidificación en el proceso (Agyeman & Tao, 2014). En segundo término, el desequilibrio nutricional que presentan los SAR debido a la presencia de macro y micronutrientes. Es decir, mientras los macronutrientes (Na, K, etc) se encuentran en exceso, los micronutrientes (Zn, Fe, Mo, etc) son insuficientes para relaciones C/N que están fuera del rango óptimo (20-30), convirtiéndose en un factor limitante en la DA de SAR. Lo anterior, debido a que el correcto desempeño metabólico de los microorganismos, requiere concentraciones nutricionales específicas (El-Mashad & Zhang, 2010) (Zhang, et al., 2014).

En este sentido, la factibilidad de la DA como estrategia de gestión de los SAR depende de contrarrestar la inhibición para mejorar la estabilidad del proceso, en términos de la capacidad buffer y el equilibrio nutricional, para mitigar una acumulación de AGVs y favorecer el metabolismo microbiano. Una forma de superar las desventajas de la monodigestión, es digerir de manera simultánea sustratos con características complementarias, proceso denominado co-digestión anaerobia (CoDA). La CoDA permite aprovechar la sinergia de la mezcla de sustratos, ajustando la cantidad de nutrientes, la relación C/N, la humedad, entre otras, mejorando las dinámicas bioquímicas del sistema en términos de variables de desempeño y estabilidad como producción de biogás, capacidad buffer, pH, etc. (Campos, et al., 2012).

En el caso de los SAR, los estiércoles animales, como el estiércol bovino, han sido ampliamente recomendados como cosustrato dadas su buena capacidad buffer y su alto contenido de elementos traza, buscando obtener una mejor eficiencia y estabilidad en la volatilización anaerobia. Si bien, el EB y los SAR son residuos con alto contenido de materia orgánica, difieren en su capacidad buffer, biodegradabilidad y contenido nutricional, por ello es necesario conocer variables operacionales importantes del proceso, que permitan realizar ajustes para

alcanzar buenos desempeños. Teniendo en cuenta la estabilidad del inóculo a la temperatura, (+/- 39°C), la relación de mezcla y la carga orgánica de los cosustratos, son las variables más importantes del proceso. La relación de mezcla permite ajustar las características fisicoquímicas de los sustratos y la carga orgánica, determina la cantidad de materia orgánica que un sistema de digestión anaerobia puede resistir sin inhibirse.

De acuerdo con lo anterior, en la búsqueda de la estabilidad del sistema se hace necesario que los parámetros de estabilidad interactúen y se equilibren mutuamente, manteniéndose en rangos de operación convenientes, por lo que se requiere un estudio de los efectos combinados, que evalúe la interacción entre las variables más influyentes en el proceso y prediga regiones de operación óptimas.

Teniendo en cuenta que el comedor universitario de la Universidad Industrial de Santander genera 5850 kg de SAR por mes, y que la institución requiere de una alternativa para resolver este problema ambiental, se planteó como objetivo de este trabajo de investigación estudiar el efecto de la carga orgánica y la relación de mezcla de la codigestión de los sobrantes alimenticios del comedor de la UIS y el estiércol bovino.

### 1.1. BIOQUÍMICA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.

Cuando en 1776 Alessandro Volta identificó que el gas que se producía en los pantanos era inflamable no imaginó la importancia que éste tendría para la humanidad (Ahring, 2003). El metano ha adquirido especial importancia gracias a su contenido energético usado en la generación de electricidad y calor. De esta manera nació la digestión anaerobia (DA), la cual es un proceso biológico de óxido-reducción de monosacáridos y otros compuestos en el que el aceptor terminal de electrones es una molécula inorgánica diferente al oxígeno. Usando el proceso de digestión anaerobia es posible estabilizar distintos residuos de origen

vegetal, animal e incluso efluentes de industrias como la química y la alimentaria. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico. Como producto de la DA se obtiene el biogás que es una mezcla de gases compuesta principalmente de metano (50-70%) y dióxido de carbono (30-50%), y un lodo denominado digerido con alto contenido nutricional, usado generalmente como acondicionador de suelos. (Varnero Moreno, 2011)

La co-digestión anaerobia (CoDA) es la digestión simultánea de dos o más sustratos. La aplicación de la CoDA trae consigo ventajas de tipo ambiental y económico. Sin embargo, digerir más de un sustrato implica una cuidadosa selección de los mismos para garantizar una interacción eficiente. Lo que se busca con la coDA es alcanzar un balance nutricional en términos de relación C/N, y macro y micro nutrientes, así como la dilución de componentes potencialmente inhibidores.

La DA y coDA son procesos complejos que se llevan a cabo en cuatro etapas: a) hidrólisis, b) acidogénesis c) acetogénesis y d) metanogénesis (Ver Figura 1). La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos; dando lugar a aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga. La hidrólisis puede ser la etapa limitante cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, entre otras.

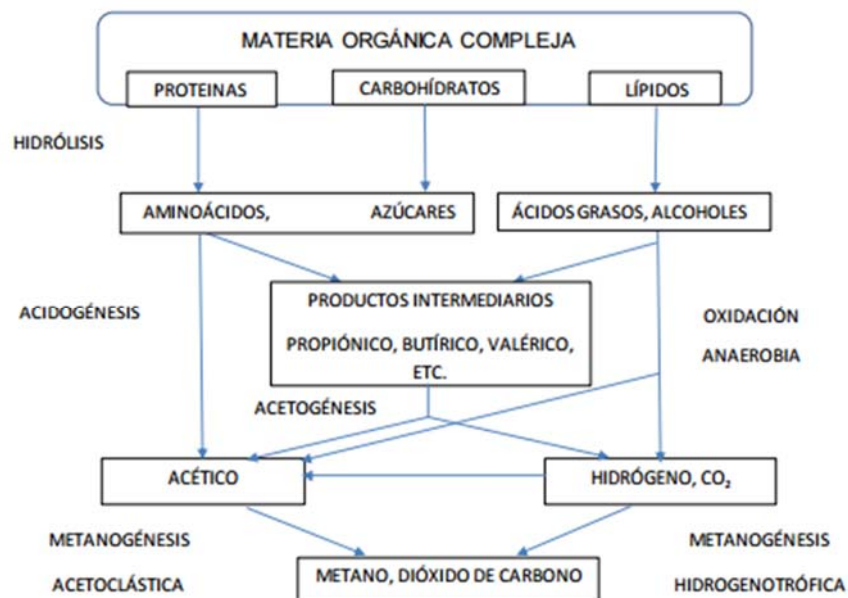
La segunda etapa es la acidogénesis, durante la cual tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (ácido acético, fórmico, H<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos más reducidos ácidos (propiónico, butírico, valérico y

láctico, y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso.

En la etapa de acetogénesis algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos ( $H_2$  y ácido acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato ( $CH_3COO^-$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ), a través de las bacterias acetogénicas

En la última etapa, la metanogénesis, las arqueas metanogénicas completan el proceso de digestión anaerobia mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato,  $H_2/CO_2$ , formiato, metanol y algunas metilaminas. Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen  $H_2/CO_2$  y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas.

Figura 1. Bioquímica de la digestión anaerobia



## 1.2. PARÁMETROS DE ESTABILIDAD DE LA DA

Debido a la complejidad de las reacciones que se llevan a cabo en la DA y la coDA su estabilidad puede verse afectada entre otros, por los siguientes parámetros.

**Ácidos grasos volátiles (AGV):** Los AGV son productos intermedios de la digestión, están constituidos por ácido acético, propiónico, butírico y valérico. Los AGV normalmente se convierten en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , por acción de las bacterias acetogénicas y metanogénicas.

La relación entre las concentraciones de ácido acético y ácido propiónico son de vital importancia ya que indican el desempeño de la DA, relaciones ácido acético/ácido propiónico superiores a 1.4 indican inhibición del sistema. (Zhang, et al., 2014)

El **pH** es un parámetro determinante en la digestión anaerobia ya que el consorcio microbiano requiere rangos muy específicos. Para el crecimiento metanogénico se requiere un pH en el rango 6.5-7.2 (Zhang, et al., 2014).

**Relación C/N:** La relación carbono-nitrógeno (C/N) es un indicador importante para el control de sistemas de tratamiento biológico. Si es demasiado baja, los microorganismos no podrán metabolizar la materia orgánica, y si es demasiado alta, hay un exceso de nitrógeno que se acumula en forma amoniacal y actúa como un inhibidor. Para una degradación óptima la relación debe estar entre 20 y 30.

**Micronutrientes y Macronutrientes:** Los micro y macronutrientes juegan un papel importante en la síntesis enzimática y en la actividad metabólica del consorcio microbiano anaerobio que se encarga de la digestión. En este sentido, al igual que los nutrientes elementales como: C, H, O, y N, los microorganismos requieren ciertas cantidades de macronutrientes (Na, K, Mg, Ca, Al) y micronutrientes (Cr, Co, Cu, Ni, etc) (Schattauer, et al., 2011). Para sustratos

como los sobrantes alimenticios, la concentración de micronutrientes suele ser insuficiente mientras la concentración de macronutrientes es demasiado elevada, por lo cual existe un desequilibrio nutricional que busca ser compensado mediante el uso de un co-sustrato que aporte los micronutrientes faltantes.

## 2. METODOLOGÍA

Este estudio se llevó a cabo en dos etapas metodológicas, en la primera se realizó una evaluación de las características físico-químicas de los sustratos y del inóculo para diagnosticar de manera preliminar su comportamiento durante la volatilización anaerobia, posteriormente se realizó el diseño experimentos y el montaje que permitió evaluar los efectos de las variables sobre la estabilidad del proceso. En la segunda etapa se evaluó la estabilidad del proceso estudiando las variables seleccionadas y se hizo el tratamiento estadístico de los datos, para generar una superficie de respuesta que contemplara simultáneamente los efectos de las variables claves en el proceso e identificara una región de posibles óptimos.

### 2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS SAR, DEL EB Y DEL INÓCULO

Inóculo: El inóculo empleado en el proceso fue un lodo anaerobio agotado adecuado en el laboratorio durante 6 meses en un biorreactor de 23 L, a temperatura ambiente y con agitación automática cada 30 minutos, con el fin de homogenizar la mezcla y potencializar la actividad metanogénica de los microorganismos. La fuente primaria se obtuvo de los establos del frigorífico Vijagual en el municipio de Rionegro, Santander, Colombia. El inóculo empleado presentó 20 gSV/L y una actividad metanogénica de 2 DQO/g SV\*día.

Los grupos tróficos de microorganismos presentes en el inóculo, son los siguientes: para la hidrólisis se observan poblaciones de bacterias fermentativas de glucosa (GFB) y de lactosa (LFB), para la acidogénesis poblaciones de GFB, para la acetogénesis bacterias propionato y butirato acetogénicas (PAB y BAB respectivamente), y arqueas metanogénicas acetoclásticas (AMA), y por último

para la etapa de metanogénesis se encuentran las arqueas metanogénicas hidrogenofílicas (HMA) (Alzate Moncada & Quintero Silva, 2016).

Sustratos: Los Sobrantes Alimenticios de Restaurante fueron recolectados diariamente del comedor estudiantil de la Universidad Industrial de Santander durante una semana, cada día mezclando y congelando la cantidad recolectada. Al finalizar el período de recolección se realizó un proceso de homogenización. Posteriormente, se caracterizó fisicoquímicamente las muestras recolectadas. Los parámetros caracterizados fueron SV, ST, pH, relación AGV/AT, humedad y contenido nutricional. Los sólidos volátiles (SV) se cuantificaron por métodos estándar (APHA, 1998), siguiendo la metodología del anexo D, la alcalinidad total (AT) y los ácidos grasos volátiles (AGV) por titulación con soluciones 0.1 N de HCl y NaOH respectivamente (ver anexo E), y el pH se cuantificó por el método potenciométrico con pHmetro metrohm 744.

## 2.2. PERFIL DE BIODEGRADABILIDAD EN FUNCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA Y LA RELACIÓN DE MEZCLA.

*2.2.1. Diseño de Experimentos 2<sup>n</sup>.* La evaluación de efectos se realizó mediante un diseño de experimentos 2<sup>n</sup> con n igual a dos, empleando como factores la proporción de mezcla y la carga orgánica (expresada en gSV/L). La tabla 1, presenta el diseño de experimentos. Como variables de respuesta se tuvieron en cuenta la producción de biogás y la relación AGV/AT. Los experimentos se realizaron a  $37 \pm 2^{\circ}\text{C}$  por triplicado, en botellas de 60 mL empleadas como biorreactores, las cuales se cerraron herméticamente con corchos de butilo y agrafes de aluminio luego de ser purgadas con nitrógeno para asegurar un sistema anaerobio. Para observar mejorías reales en el proceso por la adición de estiércol bovino, teniendo en cuenta que como lo reporta la literatura, una relación inóculo sustrato (RIS) de 1 o menos, es insuficiente para el buen desempeño de

sistemas con sustratos rápidamente degradables (Lü, et al., 2012) y además para mantener una carga orgánica que permitiera evaluar la co-digestión hasta valores que mostraran una curvatura en el rendimiento de biogás, pero sin saturar el biorreactor usado con la mezcla inóculo-sustrato, se empleó una RIS de 1 para todas las pruebas. La producción endógena de metano se determinó mediante un blanco y se utilizó un control de mono-digestión (solamente SAR como sustrato). La relación de ácidos grasos volátiles totales (AGVT) / alcalinidad total (AT) y el pH se usaron como variables de respuesta de estabilidad.

Tabla 1. Diseño de experimentos para evaluación de efectos

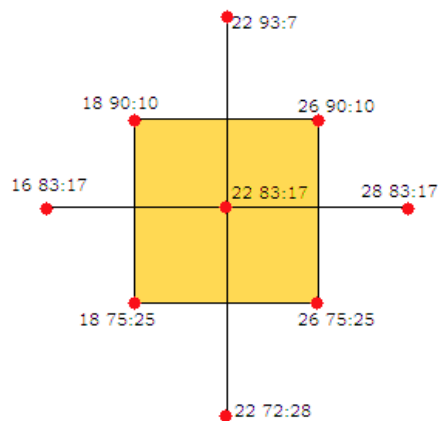
	A1	A2	B1	B2	CONTROL A	CONTROL B
<b>Carga orgánica (gVS/L)</b>	18	10	18	10	18	10
<b>Proporción de mezcla (%SV SAR: %SV EB)</b>	90:10	90:10	50:50	50:50	100:0	100:0

El propósito fue identificar una nueva concentración límite de carga orgánica, con la que sea posible generar una curvatura de quiebre para visualizar el efecto de la estabilidad lograda por la co-digestión y un modelo que genere una superficie de respuesta que permita analizar cómo varía el rendimiento con los cambios de la carga orgánica y la relación de mezcla, y así hallar regiones adecuadas para diferentes disponibilidades de sustrato, característica que no se puede lograr mediante el diseño factorial  $2^2$  y por la cual se recurre al diseño central compuesto. Entonces, para buscar estas regiones de mejor desempeño es necesario someter el sistema a condiciones de carga orgánica mayores a 18 gSV/l y a relaciones de mezcla que minimicen el uso de co-sustrato, pero que a su vez

permitan evaluar posibles cambios en los requerimientos nutricionales y capacidad de amortiguamiento.

*2.2.2. Diseño Central Compuesto.* Luego de realizar el estudio de efectos y analizando los resultados del paso anterior fue necesario aplicar un diseño central compuesto. Con el objetivo de evaluar puntos máximos e identificar regiones óptimas de operación. Para esta etapa, se realizó el diseño de las condiciones experimentales con la ayuda del software Minitab 17, empleando dos factores diferentes (carga orgánica inicial de sustrato y relación de mezcla), con cinco niveles cada uno para la co-digestión de SAR y estiércol bovino (EB). La relación de mezcla se tomó como los porcentajes de SAR y de EB de tal forma que sumaran 100% y la carga orgánica inicial de sustrato como el peso añadido en SV por litro de volumen. Se realizaron un total de 9 experimentos, con 8 puntos axiales y un punto central. Las respuestas seleccionadas para el análisis fueron la cantidad de metano producido, medido por desplazamiento alcalino, la variación del pH, la capacidad buffer establecida como la relación de AGVs y alcalinidad total (AT). Los niveles de los factores se muestran en la figura 2, sobre el diseño experimental planteado.

Figura 2. Diseño central compuesto



Los experimentos se realizaron en operación batch y por triplicado a  $37^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  durante 45 días. Se usaron muestras destructivas para realizar mediciones de variables de estabilidad. Se emplearon reactores con una capacidad de 60 mL, a los cuales se les agregó un volumen diferente de mezcla dependiendo de los requerimientos de los factores que se utilizaron en el diseño experimental, pero la misma cantidad de materia orgánica en términos de SV, con el fin de hacer comparables los rendimientos. También, se emplearon controles de monodigestión de SAR y EB, y blancos de inóculo, para cada una de las cargas orgánicas planteadas por el diseño experimental. Cada reactor se agitó durante 1 minuto antes de cada medición de metano, la cual se realizó diariamente. Los AGVs y el pH, se midieron en los días 5, 10, 20, 30 y en el día final.

El volumen de producción de metano fue cuantificado diariamente por el método del desplazamiento alcalino. El rendimiento de volumen de biogás y metano acumulado se calcularon después de la corrección a temperatura y presión estándar (STP), siguiendo el procedimiento presentado en los anexos B y C.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS SAR, DEL EB Y DEL INÓCULO

En las tablas 2 y 3 se muestra la caracterización fisicoquímica de los SAR, el estiércol bovino fresco y el inóculo empleados en el proceso, y los resultados obtenidos en el estudio realizado por Zhang *et al*, (2013).

Tabla 2. Caracterización de sustratos e inóculo.

Variable	Unidades	SAR <sup>EE</sup>	EB <sup>EE</sup>	INÓCULO <sup>EE</sup>	SAR <sup>Zhang</sup>	EB <sup>Zhang</sup>
Sólidos Totales <sup>a</sup> (ST)	% base húmeda	15	11.4	3.8	18.5	16.3
Sólidos Volátiles <sup>a</sup> (SV)	% base húmeda	13.09	8.5	2.0	17	13.2
SV /ST <sup>b</sup>	%	87	74	52	92	81
pH	-	5.5	8.2	8.2	5.2	9.2
Relación AGV/AT		1.79	0.8	0.86	-	-
Humedad <sup>b</sup>	%	86.2	77	96.2	81.5	83.7
Carbohidratos <sup>c</sup>	% base seca	69.2	47.7	-	-	-
Lípidos <sup>c</sup>	% base seca	16.1	2.44	-	-	-
Proteínas <sup>c</sup>	% base seca	3.11	9	-	-	-

a: % base húmeda; b: %; c: % base seca; d: %p/p EE Este Estudio

Tabla 3. Caracterización elemental de sustratos.

Elemento	Unidades	SAR <sup>EE</sup>	EB <sup>EE</sup>	SAR <sup>Zhang</sup>	EB <sup>Zhang</sup>
C <sup>c</sup>	%	43.28	39.89	46.5	26.7
N <sup>c</sup>	%	3.11	1.44	2.2	5.1
S <sup>c</sup>	%	0.45	0.19	-	-
K <sup>d</sup>	% p/p	0.14	0.44	0.12	0.08
Ca <sup>d</sup>	% p/p	0.03	0.12	0.0016	0.14
Mg <sup>d</sup>	%p/p	0.02	0.07	0.0086	0.31
P <sup>d</sup>	%p/p	0.06	0.08	-	-
Cu <sup>d</sup>	%p/p	0.0002	0.0002	-	-
Mn <sup>d</sup>	%p/p	0.0002	0.003	0.011	0.095
Fe <sup>d</sup>	%p/p	0.001	0.02	0.01	0.015
Zn <sup>d</sup>	%p/p	0.001	0.01	0.016	0.025
Na <sup>d</sup>	%p/p	0.40	0.11	0.19	0.09
Cd <sup>d</sup>	%p/p	0.03	0.55	-	-
Cr <sup>d</sup>	%p/p	<0.10	0.81	-	-
Ni <sup>d</sup>	%p/p	<0.10	1.14	-	-
Pb <sup>d</sup>	%p/p	1.32	3.26	-	-
Se <sup>d</sup>	%p/p	0.01	0.03	-	-
Al <sup>d</sup>	%p/p	14.66	0.01	-	-
V <sup>d</sup>	%p/p	0.36	6.62	-	-
Co <sup>d</sup>	%p/p	<0.10	<0.1	-	-

a: % p/p base húmeda; c: % p/p base seca; d: %p/p

La relación SV/ST para los SAR y el EB, encontrada en este estudio y cuyo valor corresponde a 87 y 74 respectivamente, es alta, lo que indica que la mezcla de sustratos tiene un alto contenido orgánico disponible para la digestión, siendo similares a las reportadas por Zhang, *et al.*, (2013) el cual presenta valores de 92 y 81 para la relación SV/ST en los SAR y el EB. Por otra parte, los SAR presentan un valor de pH de 5.5, que está por debajo del rango idóneo de 6.5-7.2 reportado

para el arranque de la DA (Zhang, et al., 2014), lo que indica susceptibilidad de este residuo a la acidificación. En contraste, el EB presenta un pH de 8.2 que podría compensar el bajo pH de los SAR una vez se mezclen. En el estudio realizado por Zhang *et al* (2013) el pH de los SAR y el EB, mostró la misma tendencia presentando valores de 5.2 y 9.2. La relación AGV/AT encontrada en este estudio para el EB fue de 0.8 que se ubica en el rango 0.2-0.8 reportado como estable en procesos de DA, mientras los SAR presentan un valor de 1.79 para la misma relación, lo que indica que la concentración de AGVs es mucho mayor que la alcalinidad del sustrato por lo cual hay un desequilibrio. Por lo tanto, el EB puede realizar un aporte de alcalinidad a los SAR en un sistema de co-digestión propenso a concentraciones altas de AGVs.

La humedad de 86.2 para SAR y 77 para EB muestra que ambos sustratos son adecuados para el desarrollo microbiano. Además, el contenido de macromoléculas como carbohidratos, proteínas y lípidos, de las que se obtiene la fracción orgánica fácilmente biodegradable, como los azúcares, los aminoácidos y los ácidos grasos de cadena larga, es mayor para los SAR que para el EB, lo que hace que sea un sustrato con mayor potencial para la digestión anaerobia. Por otra parte, la concentración de sodio de los SAR de este estudio es de 0.4 %p/p, valor superior como lo muestra la tabla 3 al reportado por Zhang, *et al.*, 2013 y que se encuentra cercano a la concentración de 350 mg/l que es adecuada para el desempeño de los microorganismos como lo reporta la literatura (Zhang, et al., 2014); mientras que otros elementos como Co, Cu, Zn, Cr, Ni, V, etc., necesarios para el correcto metabolismo del consorcio microbiano se muestran con diferentes concentraciones en cada uno de los sustratos, estando significativamente en menor proporción en los SAR elementos como Co, V, Ni, Cr, Cd, Fe, entre otros., para ambos estudios.

## 3.2. PERFIL DE BIODEGRADABILIDAD EN FUNCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA Y LA RELACIÓN DE MEZCLA.

3.2.1 Diseño de experimentos factorial 2<sup>2</sup>. La figura 3 muestra los rendimientos de metano obtenidos durante el proceso de DA para los sistemas estudiados.

Se observa en las gráficas 3,4,5 y 6, que para cada configuración el rendimiento alcanzado por los sistemas en co-digestión es mayor, en contraste con el rendimiento de las mono-digestiones de EB y SAR respectivamente. Se aprecia, en la figura 4 que el sistema de carga orgánica de 18 gSV/l y relación de mezcla 90:10, presenta un rendimiento específico de metano 4.5 veces mayor a la monodigestión de SAR y 1.8 veces mayor a la monodigestión de EB. Los demás sistemas muestran la misma tendencia, relacionada con diferentes incrementos en el rendimiento con respecto a las monodigestiones de SAR y EB así: el sistema de 10 gSV/l y relación de mezcla 90:10 de la figura 3 es mayor 2.36 y 1.60 veces, el sistema 18 gSV/l 50:50 de la figura 6 es mayor 3.54 y 1.42, y el sistema 10 gSV/l 50:50 de la figura 5 es mayor 2.07 y 1.41 veces. Además, es posible apreciar que para los sistemas que tienen la misma carga orgánica, ya sea 18 o 10 gSV/l, los mayores rendimientos se alcanzan cuando la relación de mezcla SAR/EB es 90:10, lo que es posible atribuir a que pequeñas cantidades de EB proporcionan un mejor balance en términos de micro y macronutrientes y una mejora en la capacidad buffer del sistema (Zhang, et al., 2014), que permite que el consorcio microbiano se pueda desempeñar a cargas orgánicas anteriormente inhibitorias.

Por consiguiente, el mejor rendimiento lo presentó la co-digestión de 18 gSV/l y relación 90:10. En condiciones de estabilidad se espera que los sistemas con mayor concentración de carga orgánica presenten los rendimientos más altos. Sin embargo, esta estabilidad es afectada y condicionada por la naturaleza del sustrato, ya que cada sistema puede funcionar hasta ciertas concentraciones límite sin inhibirse. Por ejemplo, sistemas de DA de estiércoles animales soportan concentraciones de carga orgánica más agresivas que los sistemas con SAR,

pues estos no tienen el soporte alcalino que compense su rápida biodegradabilidad.

Figura 3. Rendimientos de metano obtenidos, para la codigestión de SAR y EB con carga orgánica 10 gSV/l y relación de mezcla 90:10, y la monodigestión de SAR y EB a 10 gSV/l

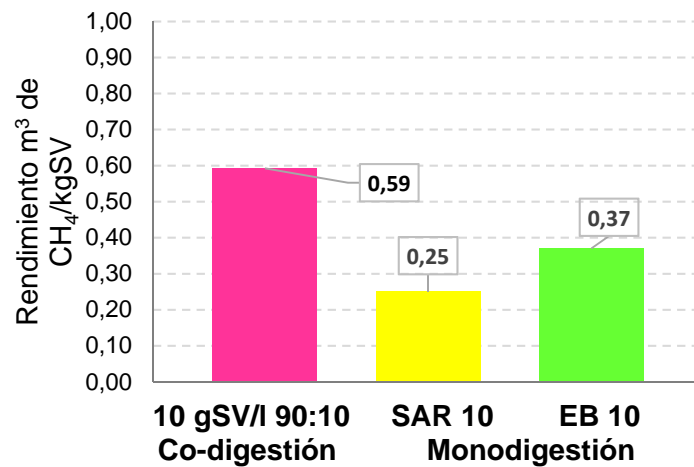


Figura 4. Rendimientos de metano obtenidos, para la codigestión de SAR y EB con carga orgánica 18 gSV/l y relación de mezcla 90:10, y la monodigestión de SAR y EB a 18 gSV/l

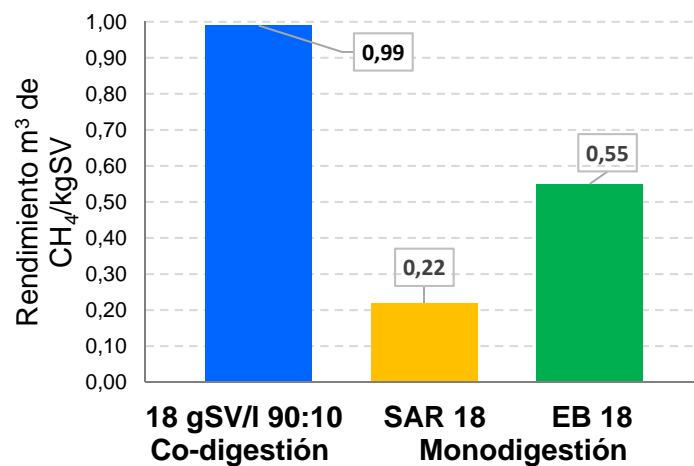


Figura 5. Rendimientos de metano obtenidos, para la codigestión de SAR y EB con carga orgánica 10 gSV/l y relación de mezcla 50:50, y la monodigestión de SAR y EB a 10 gSV/l

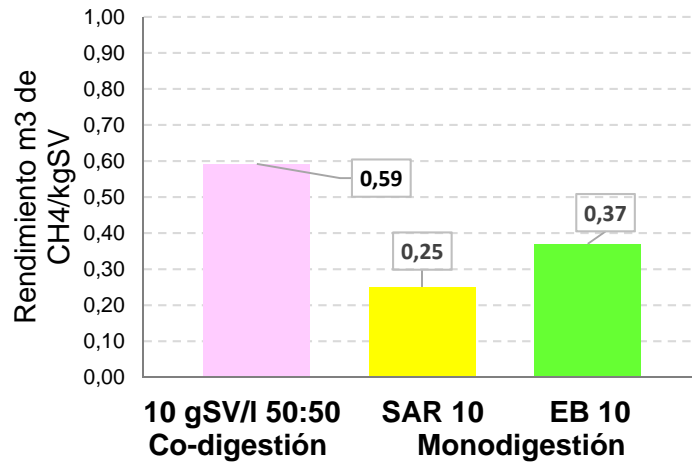
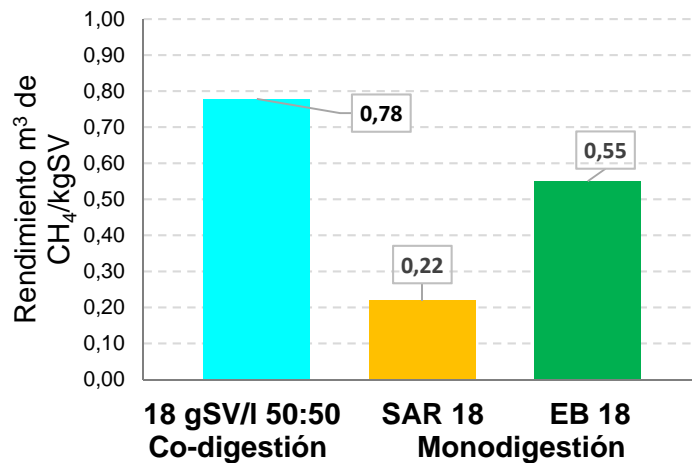


Figura 6. Rendimientos de metano obtenidos, para la codigestión de SAR y EB con carga orgánica 18 gSV/l y relación de mezcla 50:50, y la monodigestión de SAR y EB a 18 gSV/l



En la figura 3, 4, 5 y 6, también se puede observar que los sistemas de monodigestión de SAR presentan los rendimientos más bajos (0.22 y 0.25  $\text{m}^3$  de  $\text{CH}_4/\text{kgSV}$ ), seguidos por los sistemas de monodigestión de EB (0.37 y 0.55  $\text{m}^3$  de  $\text{CH}_4/\text{kgSV}$ ), siendo los sistemas de co-digestión los que presentan el mejor

comportamiento, lo que muestra un efecto sinérgico entre los co-sustratos, que permiten que en la co-digestión los sistemas tengan un mejor desempeño (Zhang, et al., 2014).

De acuerdo con lo anterior la inestabilidad de los sistemas de monodigestión de SAR se ve reflejada en la acumulación de ácidos grasos volátiles, lo que genera disminución en el pH, como lo muestra la figura 7, donde los valores de pH obtenidos por los controles de SAR, se encuentran por fuera del rango de estabilidad mostrado y por lo tanto, las bacterias presentes no pueden lograr un buen desempeño producto del ambiente más agresivo al que se enfrentan (Buyukkamaci & Filibeli, 2003). Comportamiento que no presentan los sistemas en co-digestión, pues estos logran mantenerse a valores adecuados de pH, dada la capacidad buffer y el balance nutricional que suministra el EB (Zhang, et al., 2013).

De acuerdo con lo anterior, los sistemas muestran diferentes tendencias en función de la carga orgánica y la relación de mezcla, por lo que se realiza un análisis de efectos a los resultados obtenidos con el diseño de experimentos utilizado, con el fin de establecer cómo afecta cada uno de los factores al rendimiento de producción de metano, el cual se muestra en la tabla 4. Un valor  $p$  menor a 0.05, indica que una variable es significativa, siempre que el valor de  $F$  sea mayor que su valor crítico. La tabla muestra, que los efectos de la carga orgánica (valor de  $p=0.0001$ ; valor  $p<0.05$ ), la proporción de mezcla (valor de  $p=0.0001$ ; valor  $p<0.05$ ) y la interacción entre la carga orgánica y la relación de mezcla (valor de  $p=0.001$ ; valor  $p<0.05$ ), son significativos. De acuerdo con estos resultados, la carga orgánica y la relación de mezcla son variables relevantes para el funcionamiento del sistema, mostrando efectos simples y de interacción, que afectan el funcionamiento de los procesos de digestión anaerobia.

Figura 7. Evaluación de la estabilidad del proceso centrada en el pH.

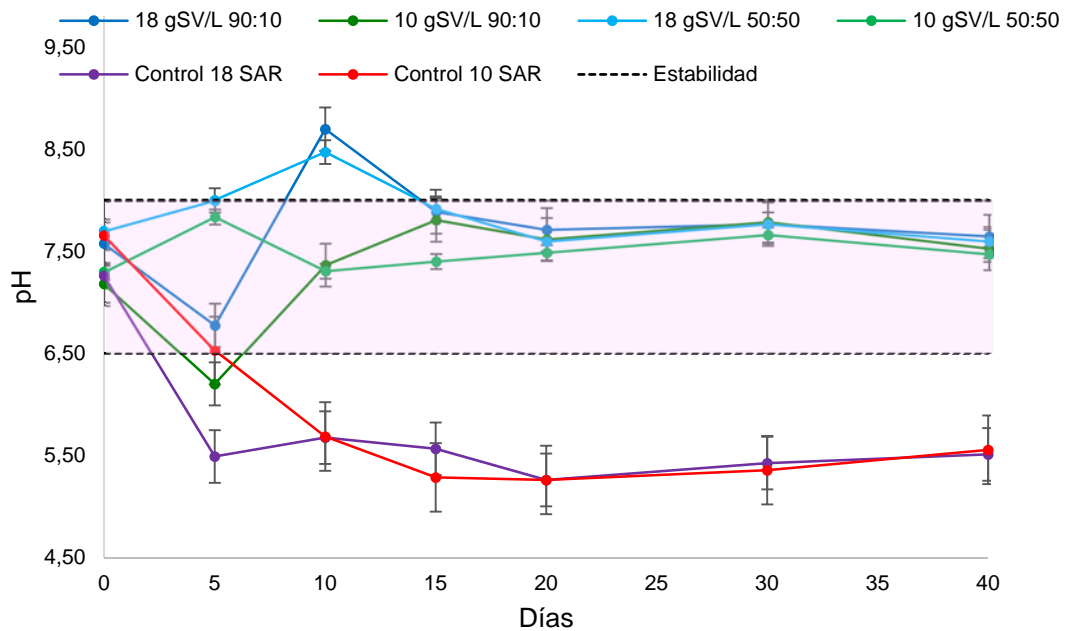


Tabla 4. Resultados del análisis ANOVA.

Fuente	Valor de F	Valor-P
Carga orgánica	446.78	0.0001
Relación de mezcla	49.89	0.0001
Interacción relación de mezcla/Carga orgánica	22.42	0.001

Los efectos que muestran tanto la carga orgánica como la proporción de mezcla, sobre el rendimiento de metano, se deben a que estas variables afectan a otras relacionadas con la estabilidad del proceso, como la capacidad buffer y el pH, las cuales dependiendo del rango en el que se encuentren afectan la eficiencia de los microorganismos. Además, con estas variables se puede manipular la disponibilidad de micro y macronutrientes en el medio, la cual determina el

desarrollo de las bacterias anaerobias y su balance en términos de producción y consumo, para cada una de las etapas de la digestión. Por lo tanto, es importante conocer valores tanto de carga orgánica como de relación de mezcla, en los que las bacterias presentes puedan alcanzar los rendimientos más altos.

*3.2.2 Diseño de experimentos diseño central compuesto.* Basado en este diseño se estudia la estabilidad de la digestión, la producción y los rendimientos específicos de metano y la región de mayor desempeño.

**ESTABILIDAD DE LA DIGESTIÓN:** En la figura 8 se muestra la variación del pH durante los 45 días del experimento, para los sistemas de co-digestión y monodigestión de SAR. Al observar la figura 8 se puede ver que en la mayoría de tratamientos los valores de pH disminuyeron en los primeros 5 días cuando la materia orgánica se sometió al proceso de digestión, producto de una alta tasa de producción de AGVs por parte de las bacterias acidogénicas, superior a la tasa de consumo de AGVs de los metanógenos (Wang, et al., 2012). Además, se puede apreciar que todos los sistemas de monodigestión alcanzaron valores de pH inferiores a 6.5 al igual que los sistemas de co-digestión de carga orgánica y relación de mezcla 28 gSV/l 83:17, 22 gSV/l 93:07 y 26 gSV/l 90:10. Después del día 5, los sistemas muestran diferentes tendencias en sus valores de pH, pero 6 de los 9 sistemas de co-digestión presentaron valores dentro de un rango de 6.5 a 8.0, lo que permite que los metanógenos se puedan desempeñar correctamente y se pueda llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia. Por otra parte, al comparar los valores de pH alcanzados por sistemas en monodigestión y co-digestión, es posible establecer que esta última permite elevar la carga orgánica sin que se presente inestabilidad, tal como lo reporta Zhang, et al., 2012.

La variación del pH y su comportamiento durante el período de experimentación, generado por el desbalance entre la producción y consumo de AGVs se puede apreciar mejor al observar la figura 9, en la cual se muestra la variación de la

capacidad buffer contemplada como la relación entre AGVs y AT. En la figura 6 se puede ver, que para los sistemas cuyo pH es inferior a 6.5, la cantidad de AGVs es mayor a la AT que puede generar el sistema y por lo tanto el valor de capacidad buffer está por encima de 0.8, es decir por fuera de un rango estable, en el cual la metanogénesis se inhibe y por consiguiente, no será posible generar la cantidad esperada de biogás.

**PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO DE METANO:** Esta variable se analiza primero desde la monodigestión y luego desde la co-digestión.

*Monodigestión:* En la mono-digestión de EB se obtuvieron rendimientos desde 0.18 hasta  $0.69 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kgSV}$ , como lo muestra la figura 10, los cuales aumentaron de manera proporcional a la carga orgánica, presentando el mayor resultado en  $28 \text{ gSV}/\text{l}$ . En la figura 10 se puede observar además que la producción de metano de los controles de EB para cargas orgánicas mayores de  $16 \text{ gSV}/\text{l}$  es creciente durante los primeros 40 días, que es el resultado esperado ya que los estiércoles animales en general son más estables y tienen características idóneas para la DA, en términos de buena capacidad tampón, alcalinidad, pH, entre otras, aunque presentan falencias en términos de disponibilidad de materia biodegradable, mostradas por rendimientos menores a los de otros sustratos orgánicos. De otra parte, los rendimientos y la producción acumulada de metano para la mono-digestión de SAR se presentan en la figura 11. Se observa que en los controles de SAR la producción cesa en los primeros 5 días de la prueba y el mayor rendimiento se consigue a una carga orgánica de  $18 \text{ gSV}/\text{l}$ , mientras que la mayor carga orgánica es la que muestra el menor rendimiento, mostrando que a cargas mayores, la inhibición causada por la acumulación de AGV aumenta y rompe el equilibrio entre las cinéticas de la hidrólisis y la metanogénesis, llevando a que se presenten fallas en el sistema (Zhang, et al., 2015). Los rendimientos alcanzados por los sistemas de monodigestión de SAR que corresponden a valores entre  $0.13$  y  $0.22 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kgSV}$ , son

similares a los valores de 0.10 a 0.25  $m^3 CH_4/kgSV$  reportados por Kawai, *et al.*, (2014), para sistemas en los que se presentó la acidificación.

*Co-digestión:* En la figura 12 se observa que en todos los sistemas de co-digestión de SAR:EB, el rendimiento es mayor a 0.19  $m^3 CH_4/kgSV$ , alcanzando el mejor rendimiento a una carga orgánica de 22  $gSV/l$  y relación de mezcla 83:17, que supera los sistemas de mono-digestión de 22  $gSV/l$  de SAR y EB en 4.4 y 1.8 veces. También, se puede ver que el 90% de la producción final de biogás, se obtuvo alrededor de los primeros 25 días en los sistemas que mostraron rendimientos acumulados superiores a 0.81  $m^3 CH_4/kgSV$  y en los primeros 5 días para los demás. Al comparar todos los rendimientos obtenidos en la co-digestión con los de la mono-digestión de EB y SAR, se aprecia que el rendimiento de metano en la mono-digestión es superado por el de la co-digestión siempre que el rendimiento del sistema estudiado supere 0.81  $m^3 CH_4/kgSV$ . Lo que demuestra que la co-digestión anaerobia de dos o más sustratos puede aumentar el rendimiento en la producción de biogás como se ha reportado en otros estudios (Zhang, *et al.*, 2013)

Figura 8. Variación del pH en el tiempo para los sistemas estudiados (Para una mejor visualización ver anexo A)

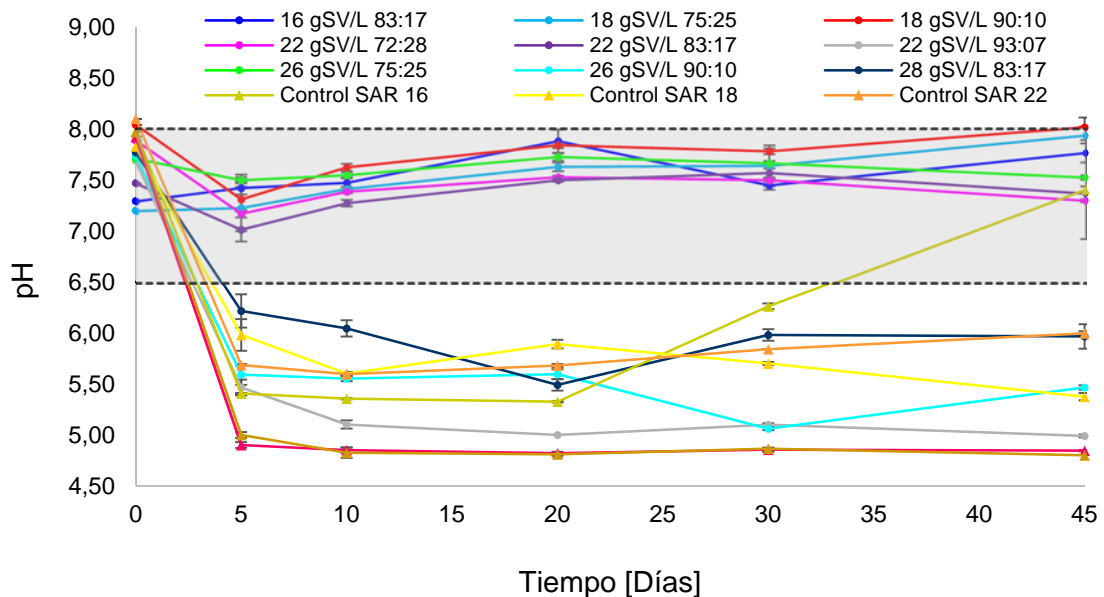


Figura 9. Variación de la relación AGV/AT en el tiempo para los sistemas estudiados (Para una mejor visualización ver anexo A)

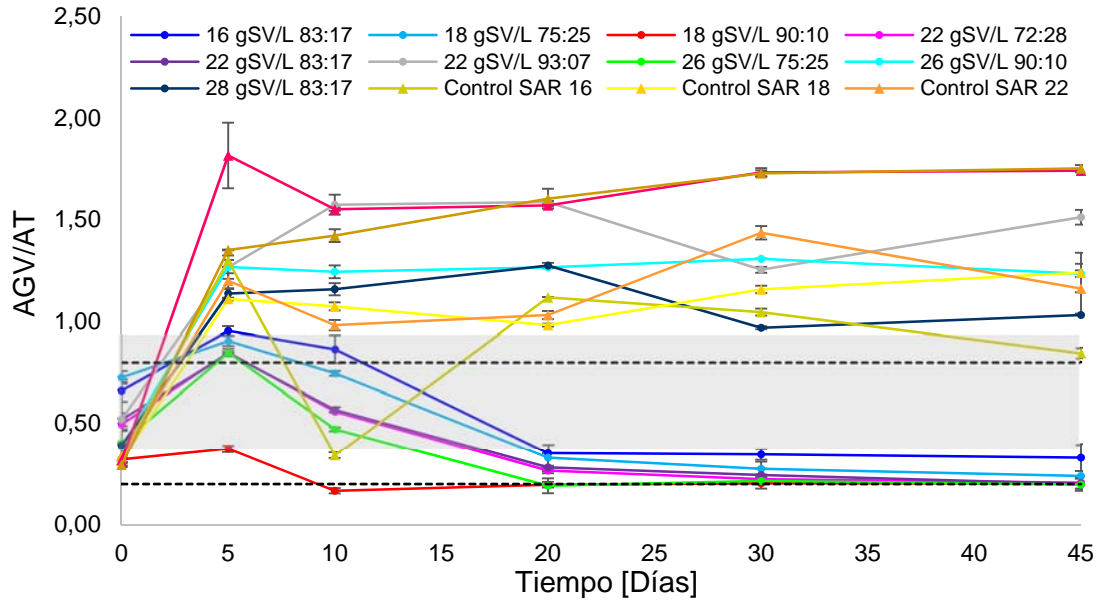


Figura 10. Rendimiento y volumen acumulado de metano para los sistemas de mono-digestión de estiércol bovino.

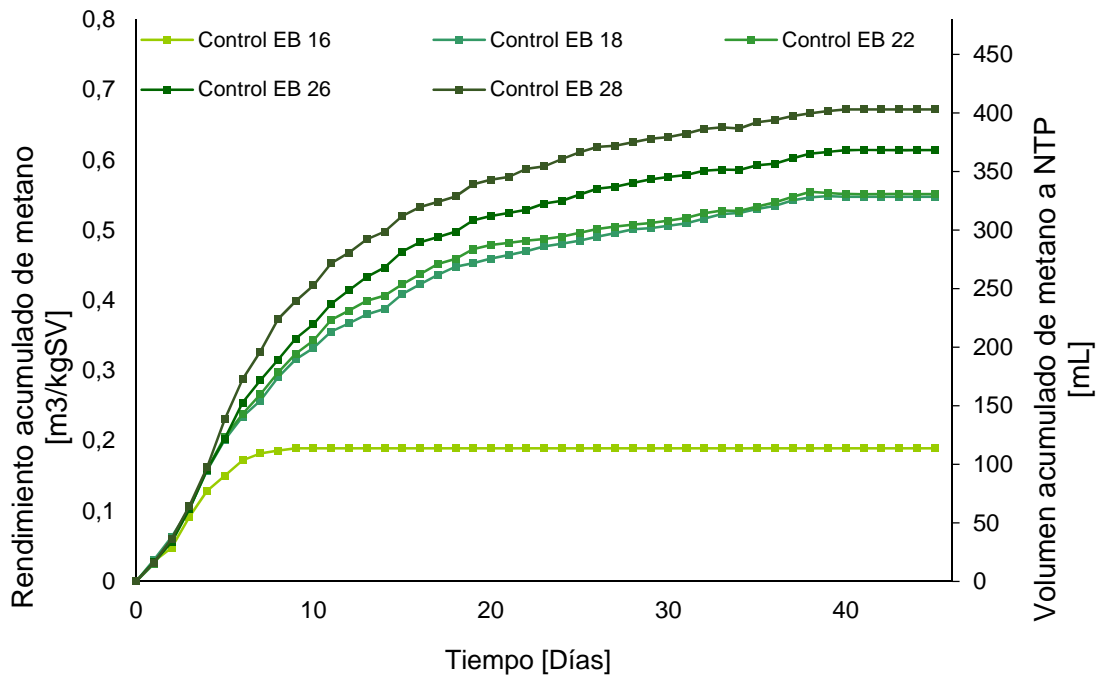


Figura 11. Rendimiento y volumen acumulado de metano para los sistemas de mono-digestión de SAR

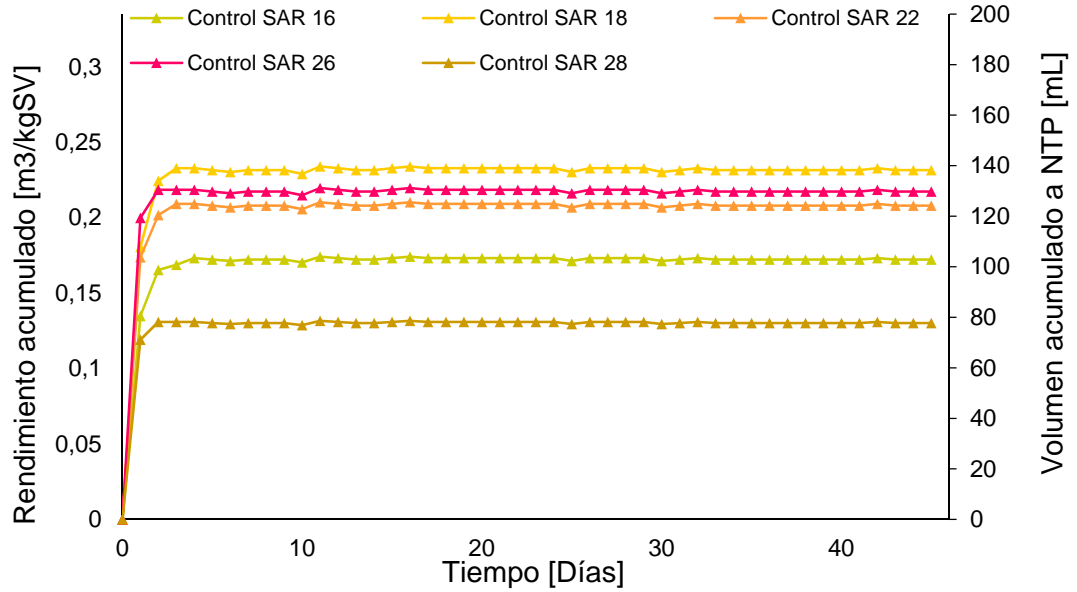
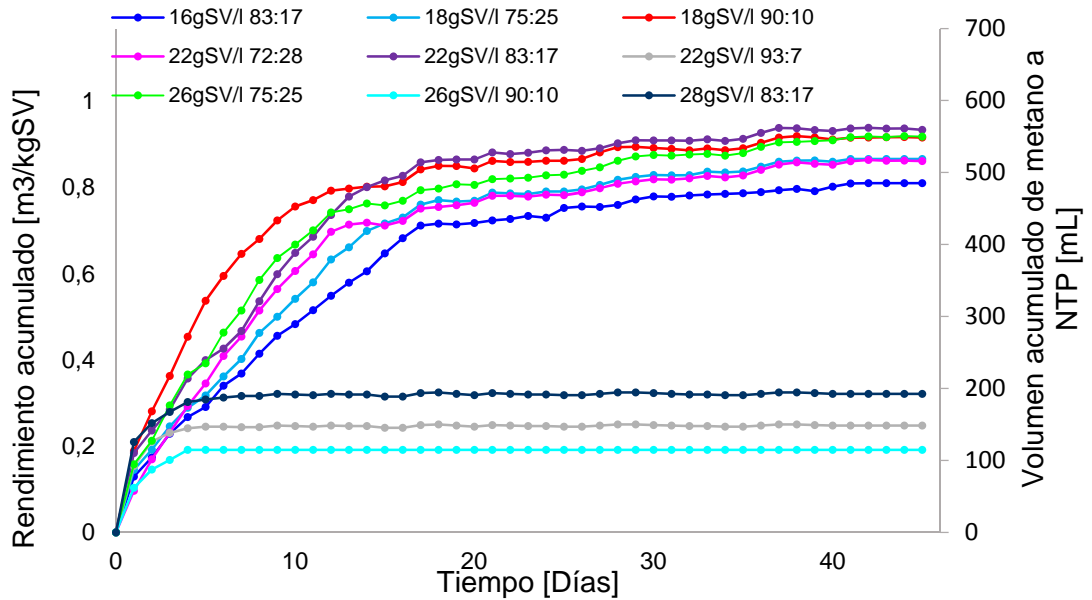


Figura 12. Rendimiento y producción acumulada de metano para los diferentes sistemas de co-digestión evaluados.



REGIÓN DE MAYOR DESEMPEÑO: Adicionalmente al análisis realizado que permitió establecer el efecto que tiene los factores carga orgánica y relación de mezcla sobre la co-digestión de SAR y EB, se determinó una superficie de respuesta para visualizar la variación del rendimiento en todos los niveles de los factores empleados y también la combinación que permite maximizar la respuesta hacia valores óptimos de operación. Esta superficie se muestra en la figura 13 y en ella se puede observar que el rendimiento de metano inicialmente aumenta al aumentar los valores de carga orgánica y relación de mezcla, pero luego alcanza un valor máximo y decrece. Se obtuvo una ecuación polinómica de segundo orden para el rendimiento de metano en términos de los factores como se muestra a continuación, en donde Y corresponde al rendimiento,  $X_1$  a la carga orgánica y  $X_2$  relación de mezcla, la cual presentó un valor de  $R^2$  superior a 0.98, lo que sugiere un buen ajuste de los valores experimentales al modelo presentado.

$$Y = -34,0 + 1,0208 \cdot X_1 + 0,6066 \cdot X_2 - 0,00999 \cdot X_1^2 - 0,002812 \cdot X_2^2 - 0,0075 \cdot X_1 \cdot X_2$$

En la figura 14 se presenta una superficie de contornos del rendimiento, en la cual se aprecia que los efectos de la relación de mezcla SAR: EB y de la carga orgánica en el potencial de metano, son importantes. Se observa que el potencial de metano mayor a  $0.90 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kgSV}$ , se alcanza empleando combinaciones de una relación de mezcla de 75:25 hasta 85:15 y una carga orgánica desde 18 hasta 24 gSV/l. También, se puede predecir que sistemas con combinaciones simultáneas de relación de mezcla superiores a 88:12 y cargas orgánicas superiores a 25 gSV/l no funcionarían pues se tendría un rendimiento no deseado.

Figura 13. Superficie de respuesta del rendimiento de metano para la co-digestión de SAR y EB.

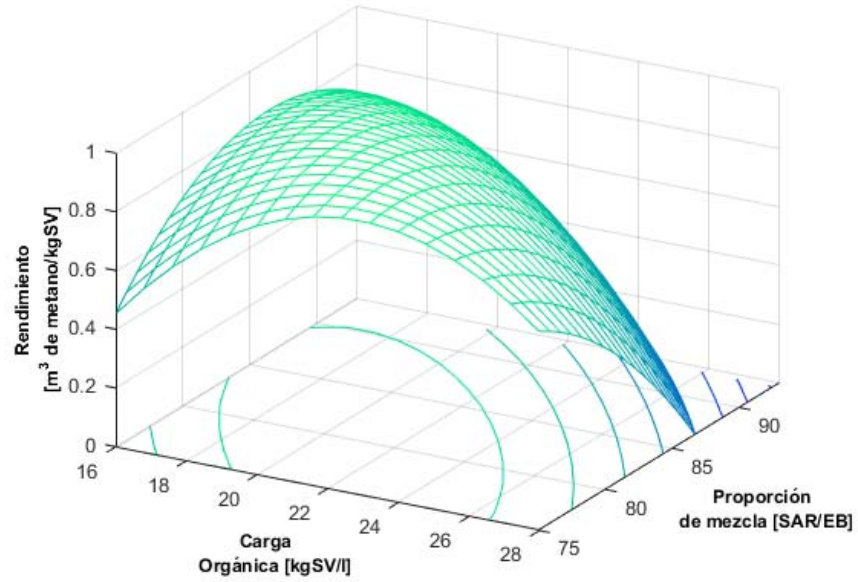
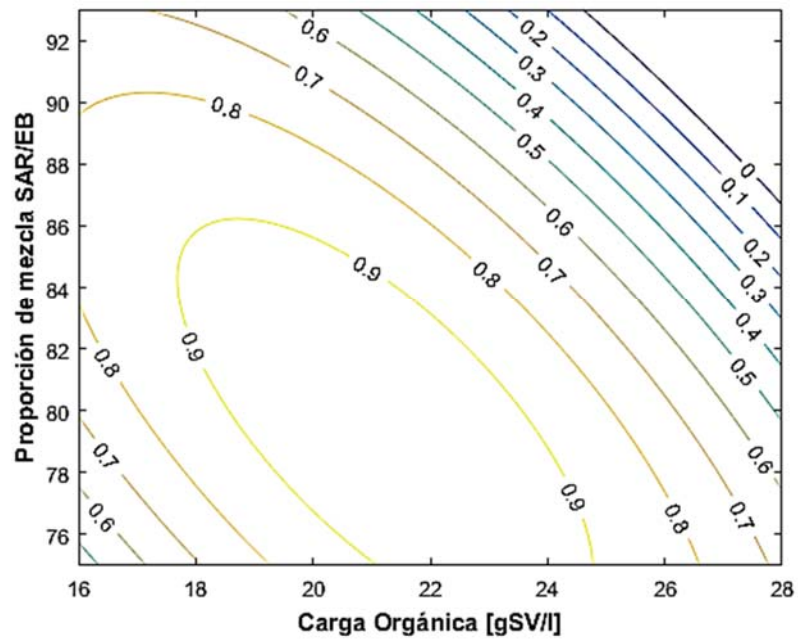


Figura 14. Comportamiento del rendimiento de metano para la co-digestión de SAR y EB.



#### 4. CONCLUSIONES

El estiércol bovino es un co-sustrato adecuado para los sobrantes alimenticios de restaurante, pues mejora el balance en términos de micro y macronutrientes, lo que permite elevar las cargas orgánicas de SAR en los sistemas anaerobios, manteniendo un entorno estable para las bacterias en el digestor y alcanzando rendimientos experimentales hasta de  $0.92 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kgSV}$  a una RIS de 1.

La carga orgánica y la relación de mezcla en la codigestión anaerobia de SAR con EB, tienen un efecto estadísticamente significativo presentando valores-p menores a 0.05, que se ve reflejado en una mejora de la estabilidad del proceso en términos de pH y de la relación AGV/AT, y en mayores rendimientos de metano en comparación con la monodigestión de SAR.

Rendimientos de metano superiores a  $0.90 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kgSV}$  se podrían conseguir según el modelo de segundo orden obtenido dentro de regiones simultáneas de relación de mezcla SAR/EB entre 75/25 y 85/15, y cargas orgánicas entre 18 gSV/l y 24 gSV/l.

## BIBLIOGRAFÍA

Abbasi, T., Tauseef, S. & Abbasi, S., 2012. *Biogas Energy*. New York: Springer.

Agyeman, F. & Tao, W., 2014. Anaerobic co-digestion of food waste and dairy manure: Effects of food waste particle size and organic loading rate. *Journal of Environmental Management*, Volumen 133, pp. 268-274.

Ahring, B. K., 2003. Perspectives for Anaerobic Digestion. En: *Biomethanation I*. Berlin: Springer.

Alzate Moncada, M. S. & Quintero Silva, M., 2016. Characterization of trophic groups throughout an anaerobic digestion process with cattle manure slurry using a low-cost method. *ion*, 29(1), pp. 117-123.

Bouallagui, H. y otros, 2009. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition.. *J. Environ. Manage.*, Volumen 209, pp. 184-189.

Buyukkamaci, N. & Filibeli, A., 2003. Volatile fatty acid formation in an anaerobic hybrid reactor. *Process Biochemistry*, Volumen 39, pp. 1491–1494.

Campos , E., Elías, X. & Flotats, X., 2012. *PROCESOS BIOLÓGICOS: la digestión anaerobia y el compostaje*. Madrid: Díaz de Santos .

Campos Pozuelo, A. E., 2001. *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria*, Lleida: s.n.

Cho, S. y otros, 2013. Statistical optimization of mixture ratio and particle size for dry co-digestion of food waste and manure by response surface methodology. *Korean J. Chem. Eng.*.

El-Mashad, H. & Zhang, R., 2010. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource Technology*, Volumen 101, p. 4021–4028.

Evans, A., Strezov, V. & Evans, T. J., 2015. Anaerobic Digestion. En: *Biomass Processing Technologies*. New York: Taylor & Francis Group, pp. 178-179.

FAO, 2012. *Pérdida y desperdicio de alimentos*. [En línea] Available at: <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/es/>

Fisgativa, H., Tremier, A. & Dabert, P., 2016. Characterizing the variability of food waste quality: A need for efficient valorisation through anaerobic digestion. *Waste Management*, Volumen 50, pp. 264–274.

García-Gen, S., Rodríguez, J. & Lema, J., 2014. Optimisation of substrate blends in anaerobic co-digestion using adaptive linear. *Bioresource Technology*.

González-Fernández, C., Molinuevo-Salces, B. & García-González, M., 2011. Evaluation of anaerobic codigestion of microalgal biomass and swine manure via response surface methodology. *Applied Energy*, Volumen 88, pp. 3448–3453.

Gutiérrez Pulido, H. & de la Vara Salazar, R., 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda ed. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V..

Han, M., Beherab, S. & Parka, H., 2012. Anaerobic co-digestion of food waste leachate and piggery wastewater for methane production: statistical optimization of key process parameters. *Society of Chemical Industry*.

Jard, G. y otros, 2012. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of *Palmaria palmata*: Comparison with *Saccharina latissima* and inhibition studies. *Chem. Eng. J.*, Volumen 209, pp. 513–519.

Javkhlan Ariunbaatar, y otros, 2015. Enhanced mesophilic anaerobic digestion of food waste by thermal. *Waste Management*, Volumen 46, pp. 176–181.

Kawai, M. y otros, 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*, Volumen 157, pp. 174-180.

Komemoto, K. y otros, 2009. Effect of temperature on VFA's and biogas production in anaerobic solubilization of food waste. *Waste Management*, Volumen 29, pp. 2950–2955.

Lü, F. y otros, 2012. Initiating methanogenesis of vegetable waste at low inoculum-to-substrate ratio: Importance of spatial separation. *Bioresource Technology*, Volumen 105, pp. 169–173.

Mata-Alvarez, J., S, M. & Llabrés, P., 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives.. *Bioresource Technology*, Volumen 74, pp. 3-16.

Naroznova, I., Møller, J. & Scheutz, C., 2016. Characterisation of the biochemical methane potential (BMP) of individual material fractions in Danish source-separated organic household waste. *Waste Management*, Volumen 50, pp. 39–48.

Neves, L., Oliveira, R. & Alves, M., 2009. Co-digestion of cow manure, food waste and intermittent input of fat. *Bioresource Technology*, Volumen 100, pp. 1957–1962.

Nielsen, H., Uellendahl, H. & Ahring, B., 2007. Regulation and optimization of the biogas process: Propionate as a key parameter.. *Biomass and Bioenergy*, Volumen 31, pp. 820–830.

Riaño, B., Molinuevo, B. & García-González, M., 2012. Optimization of chitosan flocculation for microalgal-bacterial biomass harvesting via response surface methodology. *Ecological Engineering*, Volumen 38, pp. 110– 113.

Sun-Kee Han & Hang-Sik Shin, 2004. Biohydrogen production by anaerobic fermentation of food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, Mayo, Volumen 29, pp. 569–577.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios-Superservicios, 2015. *Disposición Final de Residuos Sólidos-Informe Nacional*, Bogotá: s.n.

Varnero Moreno, M. T., 2011. *Manual de biogás*, Santiago de Chile: FAO.

Wang, X. y otros, 2012. Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. *Bioresource Technology*, Volumen 120, pp. 78–83.

Zaman, A. U., 2016. A comprehensive study of the environmental and economic benefits of resource recovery from global waste management systems. *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-10.

Zhang, C., Su, H., Baeyens, J. & Tan, T., 2014. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 38, pp. 383–392.

Zhang, C. y otros, 2015. Biogas by Semi-Continuous Anaerobic Digestion of Food Waste. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Volumen 175, pp. 3901–3914.

Zhang, C. y otros, 2013. The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource Technology*, Volumen 129, pp. 170–176.

Zhang, L. & Jahng, D., 2012. Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements. *Waste Management*, Volumen 32, pp. 1509–1515.

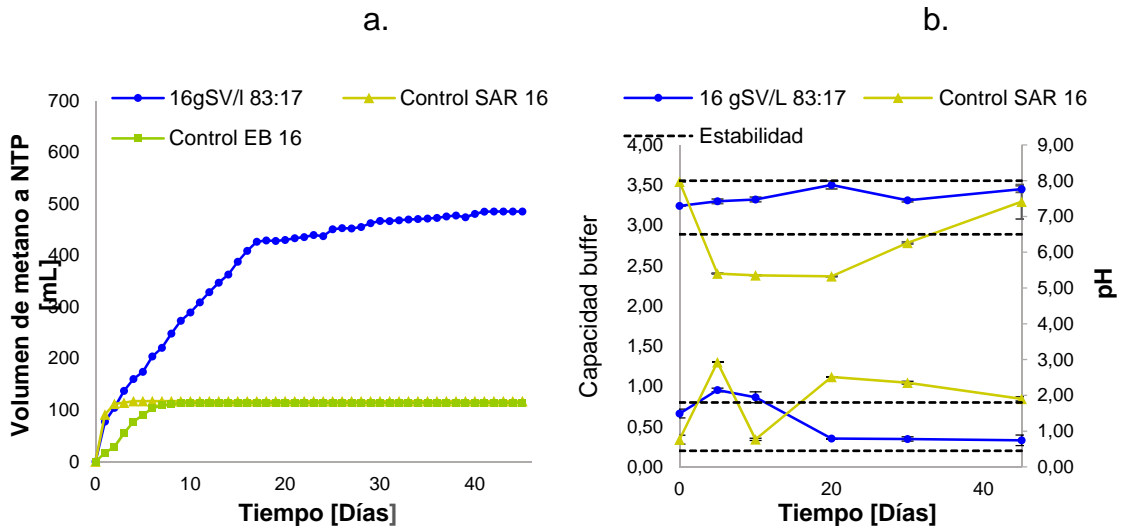
Zhang, Y., Banks, C. J. & Heaven, S., 2012. Anaerobic digestion of two biodegradable municipal waste streams. *Journal of Environmental Management*, Volumen 104, pp. 166-174.

Zhang, Y., Banks, C. & Heaven, S., 2012. Co-digestion of source segregated domestic food waste to improve process stability. *Bioresource Technology*, Volumen 114, pp. 168–178.

## ANEXOS

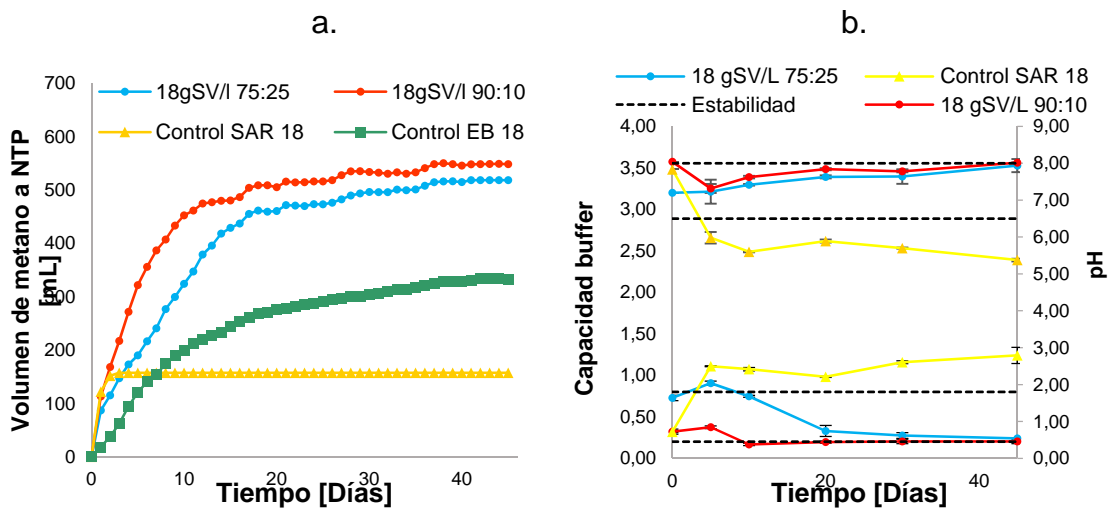
Anexo A. Producción acumulada de metano, capacidad Buffer y pH de monodigestión y codigestión para cada carga orgánica estudiada.

**Figura A1.** Carga orgánica de 16 gSV/L. (a) Producción acumulada de metano. (b) Capacidad buffer y pH.

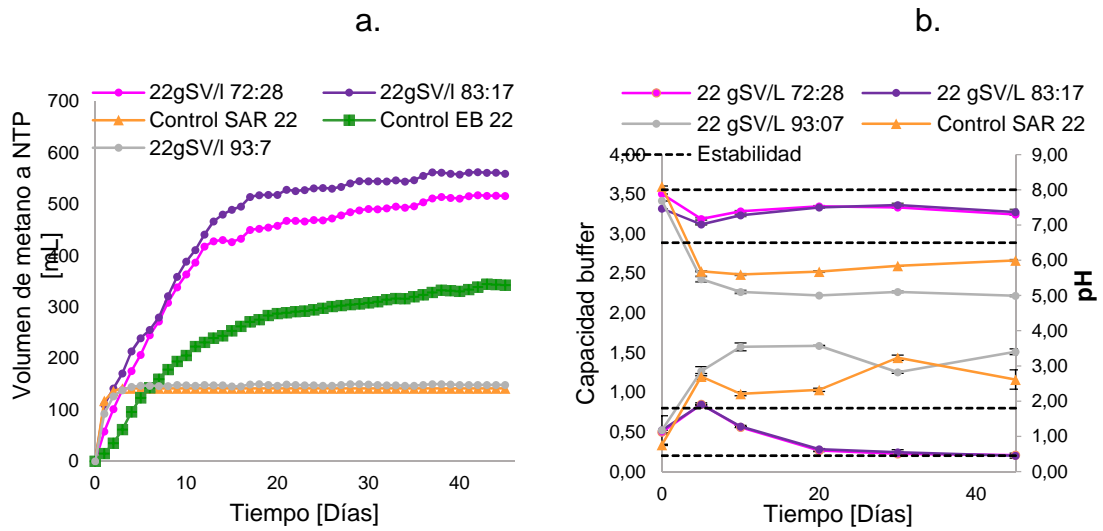


**Figura A2.** Carga orgánica de 18 gSV/L. (a) Producción acumulada de metano.

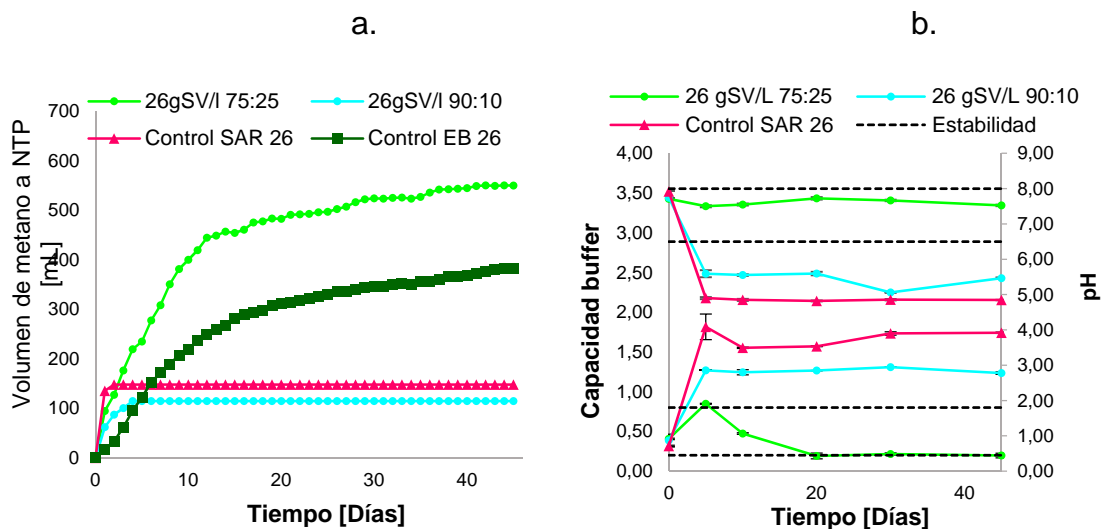
(b) Capacidad buffer y pH.



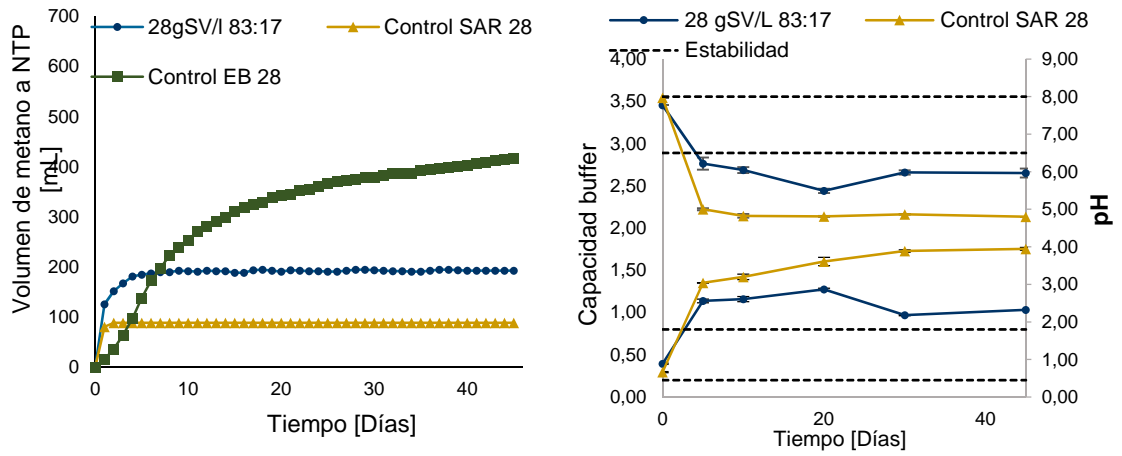
**Figura A3.** Carga orgánica de 22 gSV/L. (a) Producción acumulada de metano. (b) Capacidad buffer y pH.



**Figura A4.** Carga orgánica de 26 gSV/L. (a) Producción acumulada de metano. (b) Capacidad buffer y pH.



**Figura A5.** Carga orgánica de 28 gSV/L. (a) Producción acumulada de metano. (b) Capacidad buffer y pH.



## Anexo B. Método volumétrico - Desplazamiento alcalino

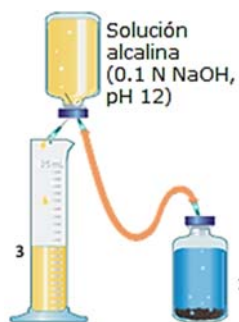
Cuantifica el volumen de metano producido utilizando una sustancia desplazante (NaOH o KaOH) que absorbe el CO<sub>2</sub> presente en el biogás. El pH de la solución alcalina debe ser superior a 12 para garantizar la absorción del CO<sub>2</sub>.

Materiales:

- Biodigestor anaerobio.
- Solución 0,1 N NaOH
- Fenolftaleína
- Medidor de pH
- Mangueras y agujas.
- Recipiente colector

Procedimiento:

1. Preparar una solución 0.1N de NaOH con pH mayor a 12.
2. Conectar el biodigestor a la botella con solución alcalina como muestra el esquema. El biogás producido se burbujea en la solución alcalina (Ver esquema)
3. Conectar la botella con solución alcalina a un recipiente colector. El volumen de solución desplazada fuera de la botella en el colector es equivalente al volumen de metano generado por el sistema (figura 13)



Tomado de: (MONGE, O., CERTUCHA BARRAGN, M.T. y ALMENDARIZ TAPI, F.J. 2013)

Anexo C. Normalización de la producción diaria de biogás a condiciones de temperatura y presión estándar (273.15 K y 1 atm)

Para poder comparar las producciones de 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).

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

$T_0$  Temperatura estándar 273,15 (K)

$T$  Temperatura al momento de medir (K)

Tomado de: Díaz-Báez, (2002).

## Anexo D. Método gravimétrico – Determinación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF) en muestras sólidas y semisólidas

Es una medida de la cantidad de materia orgánica presente en la fracción sólida de una muestra.

Materiales:

- Cisoles
- Balanza analítica
- Horno de secado, operaciones de 103-105 °C
- Horno de mufla para operar a 550±50 °C
- Desecador.

Procedimiento:

1. Pesar el crisol seco y vacío. Registrar el valor.
2. Pesar el crisol una cantidad significativa de muestra.
3. Llevar la muestra al horno de secado por 24 h.
4. Transcurridas las 24 horas, sacar el crisol del horno, ponerlo en el desecador hasta que llegue a temperatura ambiente, pesar y registrar el valor.
5. Llevar el crisol al horno mufla hasta que alcance una T 550 °C durante una hora, apagar el horno y dejar enfriar hasta temperatura ambiente.
6. Pesar el crisol y registrar el valor.

Cálculos:

$$\text{Sólidos totales (g ST/Kg)} = \frac{(C - A) \cdot 1000}{(B - A)}$$

$$\text{Sólidos Volátiles (g SV/Kg)} = \frac{(C - D) \cdot 1000}{(B - A)}$$

A = peso de crisol seco (g).

B = peso de crisol + muestra húmeda (g).

C = peso del crisol después del horno de secado (g)

D= peso del crisol después del horno mufla (g)

Todos los experimentos se hacen por duplicado.

Tomado de SM 2450 E

## Anexo E. Método titrimétrico para la medición de AGV y alcalinidad

### Materiales:

- Vaso de precipitado de 100 mL
- Probeta de 25 mL
- Centrífuga
- pH-metro
- Agitador magnético
- Plancha de agitación magnética
- Balones esmerilados de fondo redondo o plano
- Condensador
- Estufa de calentamiento
- 2 buretas
- Soporte universal
- Pinzas con nuez
- Solución NaOH al 0,1 N
- Solución de HCl al 0,1 N

### Procedimiento:

1. Tomar una muestra de aproximadamente de 40 mL en tubos Falcom de 50 mL
2. Centrifugar las muestras a 5000 rpm por 30 min.
3. Retirar el sobrenadante en tubos Falcom de 20 mL, medir el pH y registrar el valor.
4. Medir 5 mL de sobrenadante y llevarlo a un vaso de precipitado de 100 mL.
5. Medir en una probeta 25 de mL de agua destilada y agregarla a los 5 ml de sobrenadante.
6. Titular con HCl 0,1 N, llevando el pH de 6,5 a 3. Registrando el volumen correspondiente manteniendo agitación continua. Registrar el volumen ( $V_1$ )

7. Llevar la muestra a un balón esmerilado, adaptado al condensador, calentar hasta ebullición y mantener por 2 min.
8. Titular con NaOH 0,1 N, hasta alcanzar un pH de 6,5. Registrar el volumen ( $V_2$ ).

Cálculos:

$$\text{Alcalinidad Total (AT)} = \frac{V_1 \cdot N_{HCl} \cdot 50000}{5} \left[ \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} \right]$$

$$\text{AGV} = \frac{V_2 \cdot N_{NaOH} \cdot 60000}{5} \left[ \frac{\text{mg Ac. Acético}}{\text{L}} \right]$$

$N_{HCl}$  = Concentración de ácido clorhídrico (Normalidad)

$N_{NaOH}$  = Concentración de hidróxido de sodio (Normalidad)

$V_1$  = Volumen de HCl para llevar la muestra de un pH de 5,75 a 4,3.

$V_2$  = Volumen de NaOH para llevar la muestra de un pH de 3 a 6,5.

Todos los experimentos se hacen por duplicado.

Tomado de: (Anderson & Yang, 1992)