

**EVALUACIÓN DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE UNA MEZCLA  
TERCIARIA COMPUESTA POR GALLINAZA DE JAULA, MELAZA DE CAÑA Y  
LACTOSUERO EN UN REACTOR DE TANQUE AGITADO**

**ANGI KARINA ARCHILA MENCO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**EVALUACIÓN DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE UNA MEZCLA  
TERCIARIA COMPUESTA POR GALLINAZA DE JAULA, MELAZA DE CAÑA Y  
LACTOSUERO EN UN REACTOR DE TANQUE AGITADO**

**ANGI KARINA ARCHILA MENCO**

**Trabajo de grado presentado para optar el título de Ingeniero**

**Químico**

**Director**

**PhD. HUMBERTO ESCALANTE HERNANDEZ**

**PhD. LILIANA CASTRO MOLANO**

**MS. c. (c) JOSÉ DANIEL MARÍN BATISTA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

*A Dios por ser mi guía, fortaleza, alegría, tranquilidad y apoyo en cada etapa de mi vida.*

*Al más grande tesoro que tengo a mi lado, mis Padres: Danis Menco y Fernando Archila, a los que se le debe mi vida. Seres que se han ganado mi respeto, admiración y los que día a día me motivan a crecer como persona y profesional brindándome su amor, alegría y apoyo incondicional.*

*A mis hermanas: Mayra por ser mi consejera y amiga al estar en los momentos difíciles a mi lado. Gisella y Sirly por brindarme su amor y compañía.*

*A las dos grandes personitas que hacen parte de mi corazón y llegaron a alegrar mis días mis Sobrinos: Hanna y Johan.*

*Al hombre que confió en mí y se ha encargado de llenar de felicidad cada instante de mi vida. Mi novio y amigo Juan Pablo.*

*A todos mis amigos que de una forma u otra me acompañaron y tuve la fortuna de conocer y compartir buenas experiencias.*

*Angi Archila*

## **AGRADECIMIENTOS**

A los doctores Humberto Escalante y Liliana Castro por brindarme la oportunidad de ser parte de su grupo de investigación.

A José Daniel Marín por su paciencia, sus consejos y aportes que fueron de gran ayuda para esta investigación.

A Don Guillermo y Luis Lambis por su colaboración, disposición y tiempo que me brindaron en el laboratorio.

A los profesores y compañeros de la Escuela de Ingeniería Química por compartirme sus conocimientos permitiendo fortalecer mi formación académica.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. BIOQUÍMICA Y MICROBIOLOGÍA DE LA DA Y CO-DA.....	18
2. METODOLOGÍA .....	20
2.1 ETAPA 1: CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE INÓCULO Y SUSTRATOS.....	20
2.2 ETAPA 2: ENSAYOS DE BIODEGRADABILIDAD ANAEROBIA DE SUSTRATOS.....	21
2.3 ETAPA 3: IDENTIFICACIÓN DEL EFECTO SINÉRGICO DE LA CO- DIGESTIÓN.....	23
2.4 ETAPA 4: OPTIMIZACIÓN DE LA SINERGIA DEL PROCESO DE CO- DIGESTIÓN.....	25
2.5 ETAPA 5: CO-DIGESTIÓN DE LA MEZCLA SINÉRGICA ÓPTIMA EN UN REACTOR DE TANQUE AGITADO.....	25
3. RESULTADOS.....	27
3.1 BIODEGRADABILIDAD ANAEROBIA DE SUSTRATOS .....	27
3.2 EFECTO SINÉRGICO DE LA CO-DIGESTIÓN .....	28
3.3 PARÁMETROS CINÉTICOS DE LA CO-DIGESTIÓN .....	29
3.4 CORRELACIÓN DE PARÁMETROS CINÉTICOS CON LA SINERGIA DE LA CO-DIGESTIÓN.....	31
3.5 OPTIMIZACIÓN DEL EFECTO SINÉRGICO .....	32
3.6 ESTABILIZACIÓN DE LA PROPORCIÓN SINÉRGICA ÓPTIMA EN UN REACTOR DE TANQUE AGITADO.....	35

3.6.1 Producción de biogás, Nitrógeno amoniacal total (NAT) y ácidos grasos totales (AGV) en CoDA de GJ, LS Y MC.....	35
3.6.2 Perfil de variación del pH y Capacidad tampón (relación AGV/alcalinidad).	36
4. CONCLUSIONES.....	38
BIBLIOGRAFÍA .....	39
ANEXOS.....	43

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama del reactor de tanque agitado.....	26
Figura 2. Superficie de efecto sinérgicos y antagónicos en la co-digestión anaerobia de GJ, MC y LS.....	29
Figura 3. Correlación parámetros cinéticos con el efecto sinérgico.....	31
Figura 4. a) Gráfico de probabilidad normal y b) comparación individual de residuos estandarizados con el valor ajustado para los valores de ( $\emptyset$ ) modelados mediante la regresión estadística cubica completa.....	34
Figura 5. Variables de control a) Ácidos Grasos Volátiles, b) Concentración de NTA y c) Producción de biogás.....	36
Figura 6. Estabilidad del reactor a) Capacidad Buffer y b) pH.....	37

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Efecto de la co-digestión anaerobia de residuos en la producción de metano reportados en diversos estudios.....	16
Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de los sustratos.....	21
Tabla 3. Significado del valor $\emptyset$ .....	24
Tabla 4. Producción específica de metano (PEME), Producción específica de metano ponderado (PEMP) y valores de $\emptyset$ para la co-digestión anaerobia de Gallinaza de Jaula (GJ), melaza de caña (MC) y Lactosuero (LS).....	28
Tabla 5. Resultados de la regresión y análisis cinético para el modelo modificado de Gompertz.....	30

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Plano del reactor de tanque agitado (dimensiones en mm).....	43
Anexo B. Registro fotográficos.....	44

## NOMENCLATURA

AGV: Ácidos grasos volátiles (mg/L).

Co-DA: Co-digestión anaerobia

DA: Digestión anaerobia

EB: Estiércol bovino

GJ: Gallinaza de jaula

LS: Lactosuero o suero de leche

MC: Melaza de caña

NAT: Nitrógeno Amoniacal Total

PBM: Potencial de biometanización

PEME: Producción específica de metano experimental

PEMP: Producción específica de metano ponderado

RIS: Relación inóculo-sustrato

ST: Sólidos totales (mg/L)

SV: Sólidos volátiles (mg/L)

VNTP: Volumen a condiciones estándar

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE UNA MEZCLA TERCIARIA COMPUESTA POR GALLINAZA DE JAULA, MELAZA DE CAÑA Y LACTOSUERO EN UN REACTOR DE TANQUE AGITADO.\*

**AUTOR:** ANGI KARINA ARCHILA MENCO. \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Residuos industriales, Co-digestión anaerobia, efecto sinérgico, modo batch, modo continuo.

**CONTENIDO:** La co-digestión anaerobia (Co-DA) es una tecnología eficiente y ambientalmente atractiva para el tratamiento conjunto de dos o más residuos orgánicos procedentes de la agroindustria (gallinaza, lactosuero, melaza) en un mismo biodigestor. La investigación se centró en la evaluación de la Co-DA de GJ, LS y MC en un reactor de tanque agitado. Inicialmente se realizó ensayos de biometanización operando en modo batch con diferentes proporciones obtenidas del diseño {3,3}- *lattice simplex* aumentado con un punto centroide y 3 puntos axiales, se identificó y evaluó los efectos sinérgicos con dichas proporciones. En cuanto a la cinética de producción específica de metano fue descrita mediante el modelo de Gompertz, consecutivamente se obtuvo los puntos máximos donde hay sinergia. Para garantizar la estabilidad del proceso posteriormente se operó en modo continuo.

Durante la experimentación se monitoreó la concentración de ácidos grasos volátiles, alcalinidad y la concentración de amonio. Los resultados obtenidos en los ensayos de biodegradabilidad muestra que la mezcla 17:66:17, alcanzó el máximo rendimiento con un valor de  $0.60 \pm 0.01 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$ . Por su parte, de acuerdo a las proporciones evaluadas la 34:33:33 obtuvo el máximo efecto sinérgico con  $\phi = 1.38$ . Seguidamente se procedió a cargar el biodigestor en modo continuo con las proporciones óptimas para evaluar la producción de biogás y la estabilidad del proceso.

Finalmente, se demostró que la implementación de la mezcla sinérgica ternaria permitió realizar una mejor gestión de la energía y aumento del rendimiento global en un rango de 2.4 a 3.0  $\text{m}^3$  biogás/kg SV, con la formulación de un proceso rápidamente estable de Co-DA con residuos de GJ, LS y MC.

---

\*Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Química. Escuela de Ingeniería Química. Director Liliana del pilar Castro Molano Ing. Química Ph.D. director Humberto Escalante Ing. Químico Ph.D. codirector Jose Daniel Marin Batista MS. c. (c).

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF ANAEROBIC CO-DIGESTION OF A TERTIARY MIXTURE COMPOSED OF POULTRY CAGE, CANE MOLASSES AND LACTOSERUM IN A STIRRED TANK REACTOR. \*

**AUTHOR:** ANGI KARINA ARCHILA MENCO. \*\*

**KEYWORDS:** industrial waste, anaerobic co-digestion, synergistic effect, batch mode, continuous mode.

**CONTENT:** Anaerobic Co-digestion (Co-DA) is an efficient and environmentally attractive technology for the treatment of two or more organic residues from agribusiness (chicken, lactoserum, molasses) in one single digester. The research focused on the evaluation of the Co-DA GJ, LS and MC in a stirred tank reactor. Initially biomethanisation tests were performed operating in batch mode with different proportions obtained from the design {3,3} - lattice simplex increased with a centroid point and 3 axial points, the synergistic effects were identified and evaluated with the proportions mentioned. As for the kinetics of specific methane production it was described by the Gompertz model, consecutively maximum points where synergism occur were obtained. To ensure process stability subsequently continuous mode was operated.

During experimentation the concentration of volatile fatty acids, alkalinity and the ammonium concentration was monitored. The results of biodegradability tests showed that the 17:66:17 mixture reached maximum performance with a value of  $0.60 \pm 0.01$  m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV. Meanwhile, according to the proportions evaluated, the 34:33:33 obtained the maximum synergistic effect with  $\phi = 1.38$ . Then, the digester was loaded in continuous mode with the optimal proportions to evaluate biogas production and process stability.

Finally, it was shown that the implementation of the ternary synergistic blend allowed for better energy management and increased overall performance in a range from 2.4 to 3.0 m<sup>3</sup> biogas / kg SV, with the formulation of a quick stable process of Co-DA with waste GJ, LS and MC.

---

\*Thesis

\*\*Faculty of Engineering Physic-chemical. School of Chemical Engineering. Director Liliana del Pilar Castro Molano Chemical Engineer Ph.D. Director Humberto Escalante Chemical Engineer Ph.D. Co-director Jose Daniel Marin Batista MS. c. (c)

## INTRODUCCIÓN

En Colombia se produce 3'436.204 ton/año de gallinaza de jaula (Escalante et al., 2010); 21200 Ton/año de melaza (Asocaña, 2013) y 36000 Ton/año de suero de leche (CECODES, 2009). Estos residuos contienen cargas orgánicas de 103.6 g/L, 20-60 g/L, 72.6 g/L, para gallinaza, melaza y suero de leche respectivamente (Gelegenesis et al., 2007; Guerrero et al., 2012), y si son vertidos directamente a las fuentes hídricas ocasionan un grave problema ambiental. Una alternativa de estabilización de la materia orgánica de estos residuos es la tecnología de digestión anaerobia (DA). Esta tecnología valoriza energéticamente los residuos mediante la producción de biogás y un residuo sólido que se aplica como nutriente de suelos (Kavacik et al., 2010).

La literatura reporta rendimientos de DA de la gallinaza de jaula (GJ) entre 0.13 y 0.35 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ kg SV (Sierra et al., 2013); de la melaza de caña (MC) 0.327 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ kg SV (Misi & Foster, 2001); y de lactosuero (LS) de 0.340 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ kg SV (Comino et al., 2012). Las concentraciones elevadas de nitrógeno en la gallinaza repercuten en una lenta biodegradación. En cuanto, a la MC y LS el bajo rendimiento de la DA se atribuye a que estos residuos contienen azúcares y proteínas solubles, generando una hidrólisis muy rápida que no puede ser controlada por el sistema dada la baja alcalinidad. Los rendimientos de la DA de los residuos mencionados puede mejorarse mediante el proceso de co-digestión (Tabla 1).

La co-digestión anaerobia (Co-DA) es una tecnología eficiente y ambientalmente atractiva para la valorización energética y recuperación de nutrientes a partir de residuos orgánicos. Residuos agrícolas (estiércoles animales y de cultivos) e industriales (residuos, refinerías azucareras, plantas de sacrificio) son ampliamente utilizados como sustratos en el tratamiento anaerobio dado su alto contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable (Hublin et al., 2012). El proceso de Co-DA se refiere al tratamiento conjunto de dos o más residuos en un mismo

biodigestor. Este proceso puede incrementar la producción de biogás dependiendo de las condiciones de operación del proceso y características del co-sustrato (Tabla1) (Elbeshbishy et al., 2012). La mejor proporción de mezcla favorece las interacciones positivas entre los nutrientes (Astals et al., 2014). Métodos estadísticos, diseño compuesto central y de mezclas, han sido empleados para formular proporciones de mezcla en Co-DA y maximizar el rendimiento global del proceso en términos de la producción de metano (Wang et al., 2012).

**Tabla 1.** Efecto de la co-digestión anaerobia de residuos en la producción de metano reportados en diversos estudios.

Sustrato	Co-sustrato (s)	Tiempo de digestión (días)	Mayor producción de metano (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg VS)		Mejora %	Referencia
			Digestión	Co-digestión		
Gallinaza	Melaza	30	0.49	0.6	22.4	García et al., 2013
Gallinaza	Suero de Leche	90	0.88	0.86	2.3	Gelegenis et al., 2007
Gallinaza	Lodo Residual	30	0.39	0.44	12.8	García et al., 2013
Gallinaza	Estiércol Porcino	113	<0.13	0.13	-	Magbanua et al., 2001
Gallinaza	Aceite de Oliva	30	0.39	0.42	7.7	García et al., 2013
Gallinaza	Glicerol	30	0.37	0.57	54.05	Portal, 2013

Suero de Leche	Gallinaza	30	0.42	0.55	31.8	Lozano, 2014
Suero de Leche	Estiércol Bovino Aclimatado	35	0.42	0.58	39.2	Lozano, 2014

La Co-DA es función de las interacciones entre la composición del sustrato, pH, carga orgánica y concentración de compuestos tóxicos. Estos parámetros deben ser controlados teniendo en cuenta rangos de tolerancias que permitan un rendimiento global del proceso en términos de la producción de metano. De acuerdo con la literatura, las mezclas terciarias alcanzan mayores rendimientos del proceso que las mezclas binarias (Wang et al., 2013).

Por lo anterior, se requiere formular una mezcla a partir de los residuos de gallinaza de jaula, melaza de caña y lactosuero que maximice el rendimiento global de la co-digestión anaerobia.

En un estudio típico de co-digestión, la operación en modo discontinuo permite formular y optimizar proporciones de mezclas, que posteriormente son evaluadas en reactores continuos donde se garantiza la estabilización de la carga orgánica presente en el residuo (García-Gen et al., 2014).

Por consiguiente, el objetivo de este trabajo fue evaluar la co-digestión anaerobia de una mezcla terciaria compuesta por gallinaza de jaula, melaza de caña y lactosuero en un reactor de tanque agitado con alimentación y descarga cada 24 horas.

## 1. BIOQUÍMICA Y MICROBIOLOGÍA DE LA DA Y CO-DA.

La descomposición de los residuos orgánicos se produce en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

**Hidrólisis:** Consiste en la degradación de moléculas orgánicas complejas como lípidos, proteínas y ácidos grasos constituyentes de la biomasa, originando moléculas más simples. En esta etapa, la materia orgánica se encuentra normalmente en estado sólido. Las bacterias que producen la hidrólisis pueden ser anaerobias estrictas o facultativas, son muy numerosas, se desarrollan espontáneamente en el medio cuando las condiciones son favorables, o bien pertenecen a la flora de la sustancia orgánica a digerir. Realizan un amplio espectro de actividades enzimáticas sobre los polímeros orgánicos, desdoblándolos en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no solo radica en el hecho que producen el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además, eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema (Tsagarakis, 2006).

**Acidogénesis:** En la segunda etapa, las bacterias acidógenas transforman los productos de la primera reacción en cadena corta de ácidos volátiles, cetonas, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono. Los productos principales de la etapa de acidogénesis son el ácido propiónico ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$ ), ácido butírico ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ ), ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), ácido fórmico ( $\text{HCOOH}$ ), ácido láctico ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ ), etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) y metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), entre otros. A partir de estos productos, el hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético, se saltará la tercera etapa, acetogénesis, y ser utilizada directamente por las bacterias metanogénicas en la etapa final (Martínez et al., 2011).

**Acetogénesis:** Durante el proceso de acetogénesis, los ácidos grasos volátiles (AGV) junto con el etanol se convierten en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono

por acción de un grupo denominado organismos acetogénicos productores de hidrógeno (Poh y Chong, 2009).

**Metanogénesis:** Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión. Existen dos grupos: Las bacterias acetoclásticas que convierten el ácido acético en dióxido de carbono; las bacterias hidrogenofilicas usan el hidrógeno y el dióxido de carbono para la producción de metano y controlan el potencia redox (Martí, 2006).

## 2. METODOLOGÍA

El desarrollo de este trabajo se llevó a cabo teniendo en cuentas las siguientes etapas:

- a) Etapa 1: Caracterización fisicoquímica del inóculo y sustrato
- b) Etapa 2: Ensayos de biodegradabilidad anaerobia de sustratos
- c) Etapa 3: Identificación del efecto sinérgico de la co-digestión
- d) Etapa 4: Optimización de la sinergia del proceso de co-digestión
- e) Etapa 5: Co-DA de la mezcla sinérgica óptima en un reactor de tanque agitado

### 2.1 Etapa 1: Caracterización fisicoquímica de inóculo y sustratos

El inóculo utilizado fue lodo estiércol bovino, recolectado de una planta de sacrificio. Este lodo presentó una concentración de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) y actividad metanogénica específica de 3,01%, 2,08% y 2 DQO CH<sub>4</sub>/g SSV/d.

La gallinaza de jaula (GJ) se obtuvo de una granja avícola; La melaza de caña de azúcar (MC) provino de una refinera de caña de azúcar; y el lactosuero (LS) de una empresa láctea. Los residuos fueron almacenados a 4 ° C para su posterior caracterización.

Los análisis de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniacal total (NAT), carbono orgánico total (COT) se realizaron de acuerdo con los Métodos estándares para examinar aguas residuales (APHA, 2005). La relación C/N se determinó dividiendo la concentración de COT sobre la concentración de NTK. La alcalinidad total (AT) y ácidos grasos volátiles totales (AGV) se cuantificaron por titulación (Jobling-Purser et al, 2014). Los valores de pH se determinaron mediante un

medidor de pH (691, Metrohm). La caracterización fisicoquímica de los residuos se presenta en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Caracterización fisicoquímica de los sustratos

Parámetro	Unidades	GJ	LS	MC
pH	-	7.9	4.7	5.3
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	19.35	ND	ND
AGV	mg/L	20.16	3.54	19.20
DQO	g/L	198.0	53.0	1387.8
ST	g/L	224.7	42.0	767.2
SV	g/L	116.9	37.7	561.2
SV/ST	gL <sup>-1</sup> /gL <sup>-1</sup>	0.5	0.9	0.7
C/N	g-C/g-N	10.8	19.9	53.6
NAT	mg/L	843.5	46.7	7.8

## 2.2 Etapa 2: Ensayos de biodegradabilidad anaerobia de sustratos

Los ensayos de co-digestión fueron realizados basados en un diseño {3,3}- *lattice simplex* aumentado con un punto centroide y 3 puntos axiales. El diseño se construyó con el software Minitab 17.1 (17.1.0.0) y consistió de 13 puntos (Fracciones de sustratos) que fueron investigados mediante ensayos de biodegradabilidad anaerobia por triplicado a 37±2°C durante 30 días. El diseño se representa geoméricamente mediante un triángulo, donde el vértice superior fue la proporción 100% de GJ y los vértices de la base fueron las proporciones 100% MC

y LS. Puntos sobre las aristas correspondían a proporciones binarias, mientras que puntos al interior del simplex fueron las proporciones ternarias.

Con el fin de comparar la producción específica de metano ( $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$ ) como única función de las proporciones de mezclas, cada biodigestor de 60 ml se alimentó con una carga orgánica fija de 9 g SV/L y 12 ml de inóculo. Posteriormente, los digestores fueron aforados con agua destilada hasta ajustar un volumen de operación a 35 ml. La relación inóculo/Sustrato ( $\text{RIS} = \text{g SV inóculo/g SV sustrato}$ ) fue de 2. Ensayos blancos de solo inóculo, se realizaron por triplicado para descontar la producción de metano del inóculo.

El metano producido se midió utilizando una solución alcalina (NaOH) con fenolftaleína como indicador y pH 12. El volumen de solución alcalina desplazada es equivalente al volumen de metano generado por el sistema anaerobio (Angelidaki et al., 2009), el volumen de metano se normalizó a partir de la ecuación (1).

$$V_{NTP} = V * \frac{(P_0 - P) * T_0}{P_{atm} * T} \quad (1)$$

Donde,  $V_{NTP}$  es el volumen de gas a condiciones normales (ml),  $V$  es el volumen de gas generado durante el ensayo de biometanización,  $P_0$  es la Presión de metano en condiciones normales (1013.25 mbar),  $T$  es la temperatura de ambiente a la cual se realizó la medición,  $P$  es la Presión de vapor (mbar) a temperatura  $T$  y  $P_{atm}$  es la presión atmosférica del lugar en el cual se llevó a cabo el ensayo. El PBM de la GJ se expresó en términos de volumen normalizado de metano acumulado sobre sólidos volátiles adicionados del sustrato.

La cinética de producción específica de metano fue descrita mediante el modelo de Gompertz modificado en la ecuación (2).

$$G(t) = G_0 * \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{R_{\max} * e}{G_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (2)$$

Donde:

$G(t)$  es el rendimiento de metano acumulado en el tiempo de digestión ( $m^3$  metano/ Kg SV adicionado);

$G_0$  es el potencial de biometanización del sustrato ( $m^3$  metano/ Kg SV adicionado),

$R_{\max}$  es la velocidad máxima de producción de metano (ml / g SV.d),

$\lambda$ = fase de latencia (días);  $t$ =tiempo (días) y  $e$  corresponde al número de euler equivalente a 2.718 (B. Deepanraj et al., 2015).

Los parámetros del modelo se calcularon usando la herramienta *curve fitting* (cftool) del software MATLAB R2015a (161052). Los datos experimentales fueron examinados estadísticamente mediante análisis ANOVA. El software Minitab 17.1 (17.1.0.0) permitió determinar la mínima diferencia significativa de *Fisher*, bajo un nivel confianza del 95%, para comparar por parejas las medias de las producciones específicas de metano.

### **2.3 Etapa 3: Identificación del efecto sinérgico de la co-digestión.**

Los efectos sinérgicos pueden ser descritos como un incremento de la producción de metano de las proporciones co-digestadas con respecto a la producción específica de metano ponderada (PEMP) de los sustratos individualmente

digestados (Labatut et al., 2011). El PEMP se puede calcular haciendo uso de la ecuación (3).

$$PEMP = \frac{PEM_A * \alpha + PEM_B * \beta}{\alpha + \beta} \quad (3)$$

Donde,  $PEM_A$  y  $PEM_B$  representan la producción específica de metano del sustrato A y B, respectivamente.  $\alpha$  y  $\beta$  corresponden a la fracción de SV adicionada del sustrato A y B, respectivamente.

La identificación de los efectos sinérgicos se realizó mediante la ecuación (4).

$$\theta = \frac{PEME}{PEMP} \quad (4)$$

En la Tabla 3 se presenta el significado del valor de  $\theta$ .

**Tabla 3.** Significado del valor  $\theta$

<b>Resultado</b>	<b>Descripción</b>
$\theta > 1$	Existe efecto sinérgico
$\theta < 1$	Existe efecto antagónico
$\theta = 1$	El resultado no es claro

## 2.4 Etapa 4: Optimización de la sinergia del proceso de co-digestión

La optimización se basó en la maximización de las interacciones sinérgicas de los 3 sustratos evaluados. La respuesta al diseño estadístico simplex, representada en valores de ( $\phi$ ), se ajustó al modelo estadístico cubico completo de la ecuación 5.

$$\phi = \sum_{1 \leq i \leq 3} \beta_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 3} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq 3} \beta_{ijk} X_i X_j X_k + \sum_{1 \leq i < j < k \leq 3} X_{ijk} X_{kji} (X_{ijk} - X_{kji}) \quad (5)$$

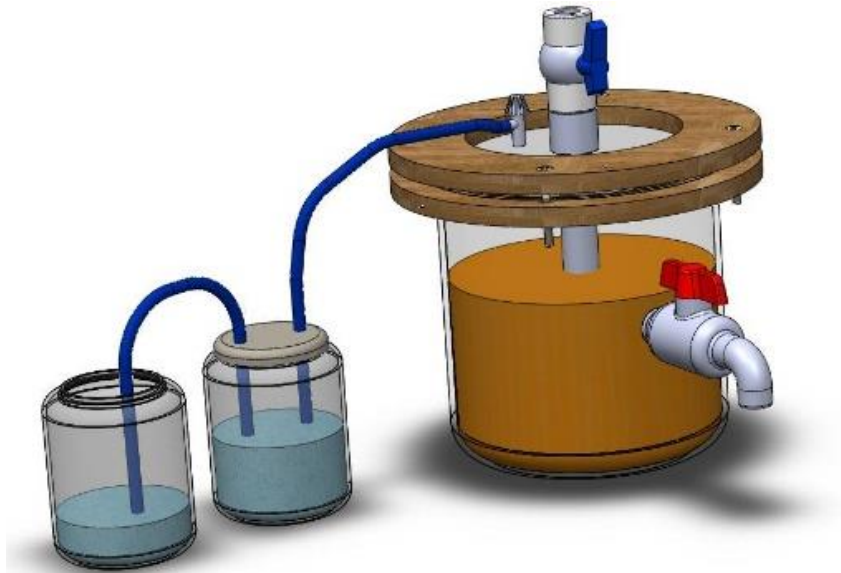
Donde, la primera sumatoria corresponde al efecto de las monodigestiones la segunda sumatoria corresponde al efecto de las mezclas binarias, la tercera sumatoria corresponde al efecto de las mezclas ternarias y la cuarta sumatoria corresponde a un ajuste del modelo junto con el coeficiente de regresión  $\beta$ . Todas las regresiones fueron analizadas con Anova. El error cuadrático ( $R^2$ ) y  $R^2$  ajustado se usaron para determinar el grado de error durante el ajuste del modelo. Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el software Minitab 17.1 (17.1.0.0).

## 2.5 Etapa 5: Co-digestión de la mezcla sinérgica óptima en un reactor de tanque agitado

Se construyó un biodigestor de tanque agitado con tapa de madera y diámetro externo de 260 mm e interno de 150 mm y una capacidad de 5 L en su tanque plástico con 200 mm de altura y 180 mm en su diámetro (Anexo A). Se trabajó con un volumen de operación de 3 L. El biodigestor cuenta con dos válvulas (carga y descarga) y agitación magnética a 80 rpm (figura 1). La digestión se realizó a temperatura de ambiente  $25 \pm 3^\circ\text{C}$ . En el arranque, el biodigestor fue operado

discontinuamente con la proporción de mezcla óptima durante 30 días, tiempo en el cual se alcanzó la estabilización del sistema (relación AGV/AT entre  $0.2 - 0.4 \text{ mgL}^{-1}/\text{mg}^* \text{L}^{-1}$ ). Posteriormente, el reactor operó con velocidades de carga orgánica (OLR) de 1, 2 y 3 g SV/L\*día (suministrandó la carga diariamente a las 8:00 am) hasta alcanzar las condiciones de estabilidad. Las variables de respuesta para este ensayo fueron los AGV, AT, pH, volumen de biogás y nitrógeno amoniacal total.

**Figura 1.** Diagrama del reactor de tanque agitado.



### 3. RESULTADOS

#### 3.1 BIODEGRADABILIDAD ANAEROBIA DE SUSTRATOS

La Tabla 4 presenta la PEME (Producción específica de metano experimental), PEMP (Producción específica de metano ponderada) y los valores de  $\phi$  en la co-digestión anaerobia de GJ, MC y LS a diferentes proporciones de mezcla en operación discontinua (reactores de 60ml). Los resultados muestran que la PEME en su mayoría aumenta proporcionalmente al número de residuos que conforman la mezcla. Las mono digestiones presentaron un rendimiento de  $0.60 \pm 0.02 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$  de LS,  $0.36 \pm 0.01 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$  de MC y  $0.34 \pm 0.01 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$  de GJ, descartando inhibiciones del proceso, dado que la carga orgánica fue de 9 g SV/L. Las mezclas binarias y ternarias entre GJ, MC y LS incrementaron ( $p < 0.001$ ) el rendimiento de metano experimental con respecto al rendimiento ponderado en la mayoría de los casos. Los máximos rendimientos de las mezclas binarias fueron  $0.54 \pm 0.03 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$  para la proporción 33:67 GJ: LS y  $0.55 \pm 0.01 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$  para la proporción MC: LS 33:67 GJ: LS. La mezcla terciaria compuesta por 17:66:17 GJ: LS: MC alcanzó el máximo rendimiento con un valor de  $0.60 \pm 0.01 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$ .

En Co-DA, los efectos sinérgicos resultan de la complementariedad de los sustratos en términos de alcalinidad, oligoelementos o nutrientes, proporcionando mejoras en la estabilidad del proceso y en el rendimiento de metano. Del mismo modo, los efectos antagónicos pueden provenir de varios factores, tales como caídas en el pH, la toxicidad del amoníaco, alta concentración de ácidos volátiles (Labatut et al., 2011).

### 3.2 EFECTO SINÉRGICO DE LA CO-DIGESTIÓN

La tabla 4 y la figura 2 muestran las interacciones sinérgicas o antagónicas, representadas en valores  $\phi$ , para las proporciones de mezclas evaluadas. De acuerdo con los resultados, el mayor efecto sinérgico ( $\phi = 1,38$ ) se presentó en la proporción GJ: LS: MC de 34:33:33. En general, las mezclas ternarias presentaron un efecto sinérgico mayor en comparación a las mezclas binarias (ver figura 2). De los resultados se infiere que las mezclas terciarias tuvieron una mejor distribución de macro y micronutrientes. Por otra parte, a pesar que la mezcla 67:33 LS: MC presentó un rendimiento de  $0.45 \pm 0.01 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ , la interacción de los sustrato mostró un efecto antagónico ( $\phi = 0.86$ ). Dicho efecto pudo ser consecuencia de inestabilidades durante el proceso biodegradativo ocasionadas por el bajo pH inherente de los residuos (Ver tabla 2).

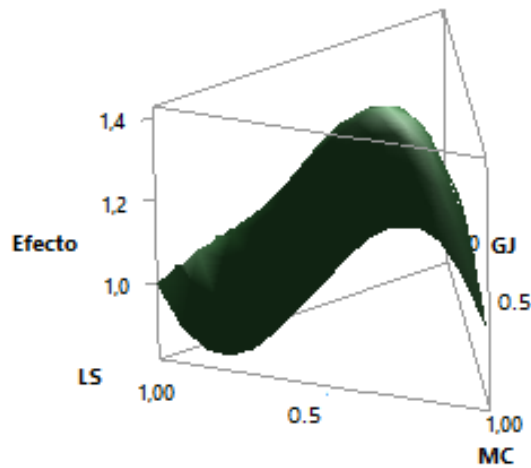
**Tabla 4.** Producción específica de metano experimental (PEME), producción específica de metano ponderado (PEMP) y valores de  $\phi$  para la co-digestión anaerobia de Gallinaza de Jaula (GJ), melaza de caña (MC) y Lactosuero (LS).

Nº	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Simplex		
				PEME (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)	PEMP (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)	$\phi$
1	100	0	0	0.34±0.01	0.34	1.00
2	0	100	0	0.60±0.02	0.60	1.00
3	0	0	100	0.36±0.01	0.36	1.00
4	0	67	33	0.45±0.01	0.53	0.86
5	33	67	0	0.54±0.03	0.52	1.05
6	67	33	0	0.46±0.00	0.43	1.09
7	67	0	33	0.38±0.04	0.35	1.10

<b>8</b>	33	0	67	0.40±0.01	0.36	1.13
<b>9</b>	0	33	67	0.55±0.01	0.44	1.25
<b>10</b>	17	66	17	0.60±0.01	0.52	1.16
<b>11</b>	66	17	17	0.48±0.01	0.39	1.25
<b>12</b>	17	17	66	0.51±0.03	0.40	1.26
<b>13</b>	34	33	33	0.57±0.02	0.44	1.38

Simplex {X1: GJ; X2: LS; X3: MC}

**Figura 2.** Superficie de efectos sinérgicos y antagónicos en la co-digestión anaerobia de GJ, MC y LS.



### 3.3 PARÁMETROS CINÉTICOS DE LA CO-DIGESTIÓN

La tabla 5 resume los parámetros cinéticos estimados por el modelo modificado de Gompertz que permitió deducir con gran aproximación a partir de los datos experimentales de los potenciales de biometanización del sustrato obtenidos a

distintas proporciones de mezcla, el comportamiento de los microorganismos incluyendo la fase de letargo ( $\lambda$ ), con el cual se estudia el tiempo de adaptabilidad y desarrollo de los microorganismos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, las monodigestiones con valores  $\lambda$  de (1.23, 2.60 y 1.46) días y las mezclas binarias con (0.89, 0.32, 0.95, 0.60, 0.47) días presentan en la mayoría de los casos, tiempos de adaptación largos en comparación con las mezclas ternarias con  $\lambda$  de (0.14, 0.58, 0.26 y 0.27) días, confirmando las ventajas de la codigestión multicomponente.

**Tabla 5.** Resultados de la regresión y análisis cinético para el modelo modificado de Gompertz

Mezcla				Parametros Cineticos			
Nº	X1	X2	X3	Fase de latencia ( $\lambda$ )	Velocidad maxima de produccion de metano (Rmáx)	Potencial de biometanización del sustrato (Go)	Factor de correlacion (R2)
1	100	0	0	1.23	0.03	0.33	0.99
2	0	100	0	2.60	0.08	0.60	1
3	0	0	100	(-)1.46	0.03	0.36	1
4	0	67	33	(-)0.89	0.04	0.45	0.98
5	33	67	0	(-)0.32	0.06	0.54	1
6	67	33	0	0.95	0.05	0.46	1
7	67	0	33	0.60	0.04	0.37	1
8	33	0	67	(-)0.47	0.04	0.39	1
9	0	33	67	0.47	0.04	0.54	0.98
10	17	66	17	(-)0.14	0.05	0.60	1
11	66	17	17	0.58	0.05	0.48	0.99
12	17	17	66	(-)0.26	0.05	0.49	0.99
13	34	33	33	(-)0.27	0.06	0.59	1

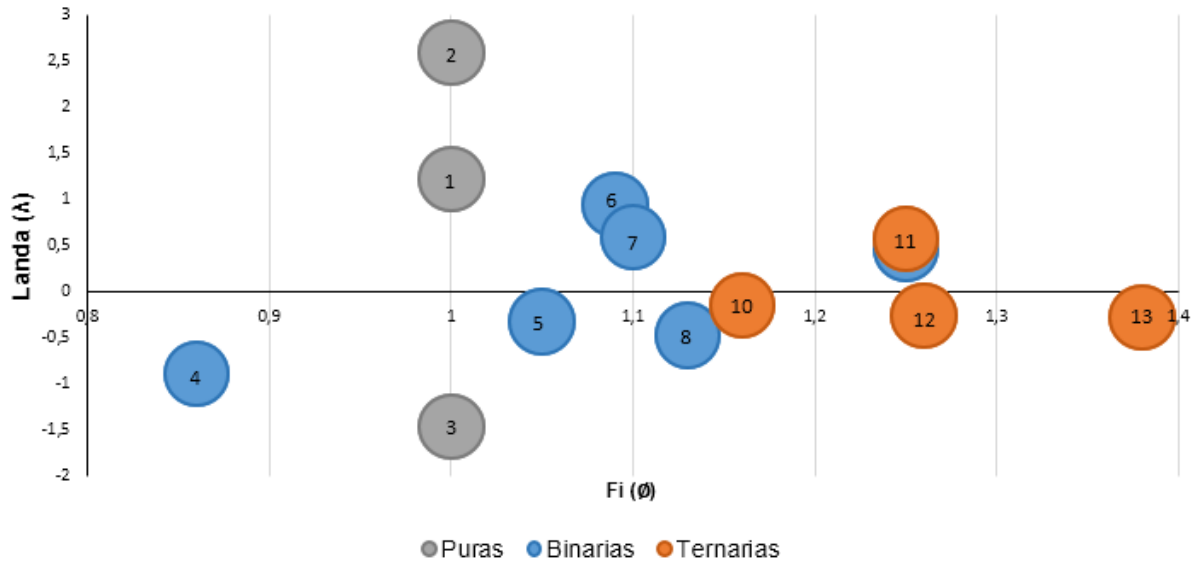
### 3.4 CORRELACIÓN DE PARÁMETROS CINÉTICOS CON LA SINERGIA DE LA CO-DIGESTIÓN

La influencia de los efectos sinérgicos ( $\phi$ ) de la co-digestión con la fase de latencia de los microorganismos ( $\lambda$ ) se presenta en la figura 3. Los resultados muestran que las monodigestiones tienen mayores periodos de adaptación por parte de los consorcios microbianos hacia el sustrato, con mínima sinergia. Por su parte, la mayoría de mezclas binarias presenta efectos sinérgicos y valores  $\lambda$  menores a las puras, empero periodos menores de adaptación inóculo sustrato y valores altos de  $\phi$  se obtuvieron con las mezclas ternarias.

En la figura 3 se muestra que las proporciones ternarias con mayores efectos sinérgicos (1.17, 1.25, 1.26, 1.38) logran mejoras cinéticas al conseguir valores  $\lambda$  de (0.14, 0.58, 0.26, 0.27) respectivamente, considerados bajos en comparación a las obtenidas con mezclas puras y las binarias. La proporción 34:33:33 con el mayor efecto sinérgico ( $\phi = 1.38$ ) presenta uno de los menores valores de  $\lambda$  con 0.27 días, por tanto, aportaría estabilidad al proceso y un tiempo de adaptabilidad menor.

De acuerdo a los resultados conseguidos, se observó que la constante cinética ( $\lambda$ ) tiende a disminuir a medida que  $\phi$  aumenta, demostrando que al garantizar un efecto sinérgico este va a favorecer la cinética del proceso en la mayoría de los casos.

**Figura 3.** Correlación parámetros cinéticos con el efecto sinérgico



Proporciones: GJ: LS: MC

1. 1:0:0	4. 0:67:33	7. 67:0:33	10. 17:66:17
2. 0:1:0	5. 33:67:0	8. 33:0:67	11. 66:17:17
3. 0:0:1	6. 67:33:0	9. 0:33:67	12. 17:17:66
			13. 34:33:33

### 3.5 OPTIMIZACIÓN DEL EFECTO SINÉRGICO

El modelo de regresión para los efectos sinérgicos se presenta en la ecuación (6).

$$\begin{aligned} \varnothing = & 0.01X_1 + 0.01X_2 + 0.01X_3 + 3.8 \times 10^{-5}X_1X_2 + 4.6 \times 10^{-5}X_1X_3 + 2.4 \times 10^{-5}X_2X_3 + 6.96 \times 10^{-6}X_1X_2X_3 \\ & + 1.6 \times 10^{-8}X_1X_2(X_1 - X_2) + 1.6 \times 10^{-7}X_1X_3(X_1 - X_3) - 1 \times 10^{-5}X_2X_3(X_2 - X_3) \end{aligned} \quad (6)$$

Donde:

$\emptyset$  = Corresponde a los efectos sinérgicos o antagónicos,

$X_1$  = Fracción de SV para la GJ

$X_2$  = Fracción de SV del LS

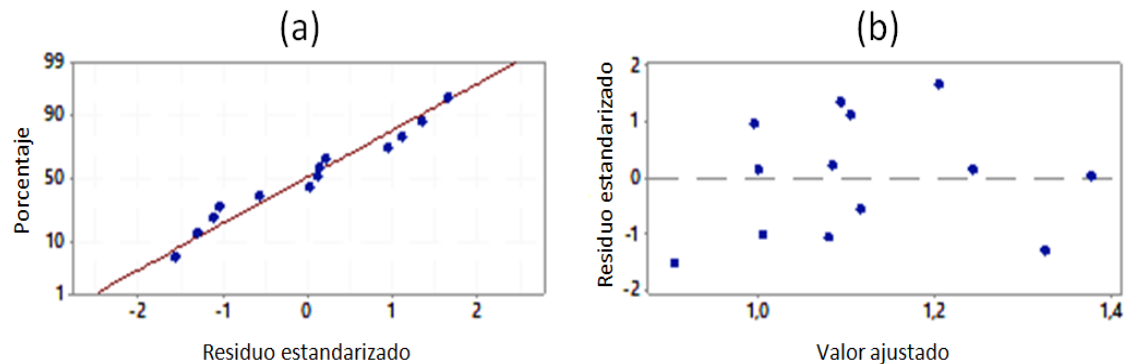
$X_3$  = Fracción de SV para la MC

Se realizó ANOVA al modelo. El  $R^2$  ajustado de 0.77, un error residual de 0.005 y el valor de  $R^2$  de 0.94, siendo este último una medida de la aptitud de las ecuaciones de regresión, demostraron que los datos predichos por el modelo conciertan con los datos experimentales. Por otra parte, para determinar la significación de los coeficientes de regresión de los parámetros se usa el valor P que se define como el nivel más pequeño de significación que conduce al rechazo de la hipótesis nula. Por lo anterior, es preferible tener el valor de P más pequeño, lo que indica más significado para el término correspondiente. Desde el modelo ajustado, se evidenció que todos los términos lineales y cuadráticos son positivos, esto indica que todos los coeficientes tienen efecto sinérgico pero no fueron significativos debido a sus valores de ( $p > 0.05$ ). Los términos cúbicos del modelo por su parte, reflejan los efectos sinérgicos y antagónicos de los coeficientes, pero se demostró significancia estadística ( $p < 0.05$ , datos no mostrados) únicamente para los coeficientes cúbicos positivos, indicando que se presentan efectos sinérgicos representativos. Por consiguiente, al observar los coeficientes positivos ( $1.6 \times 10^{-8}$ ,  $1.6 \times 10^{-7}$ ) se evidencia que poseen respuestas con GJ en mayor proporción excepto para el  $1 \times 10^{-5}$  con el máximo de MC.

La gráfica de probabilidad normal de los residuales (figura 4a) del modelo permitió reproducir los datos experimentales dentro del rango tolerancia comprobando la normalidad de la distribución de los datos. El ajuste del modelo con respecto a la

media residual estandarizada de los datos experimentales y predichos se evidencia en la figura 4b. La ley del pulgar para el residuo estandarizado de los datos sugiere que para un residual inferior a -2, el dato experimental es menor que el dato predicho. Mientras que para un residual inferior a 2, el dato experimental es mayor que el dato predicho. Sin embargo, si el residuo está sobre +/- 3, significa que algo extremadamente inusual está ocurriendo. Si obtiene un residual sobre +/- 4, significa que el dato predicho está por fuera del rango del error residual (Acuña, 2015). No obstante, el error aleatorio es normal y se puede corroborar al tener el 99 % de los residuales estandarizados entre los valores -2 y 2 (figura 4b). Por otra parte, la maximización de la respuesta del modelo (Datos no mostrados) permitió formular la mezcla con mayor efecto sinérgico y antagónico. El mayor efecto sinérgico ( $\phi=1.39$ ) se logra al mezclar  $X_1= 33.4$ ,  $X_2=32.90$  y  $X_3=33.7$ . Mientras que el mayor efecto antagónico ( $\phi=0.85$ ) se alcanza se alcanza al mezclar  $X_2=80.8$  y  $X_3=19.2$ .

**Figura 4.** a) Gráfico de probabilidad normal y b) comparación individual de residuos estandarizados con el valor ajustado para los valores de ( $\phi$ ) modelados mediante la regresión estadística cubica completa.

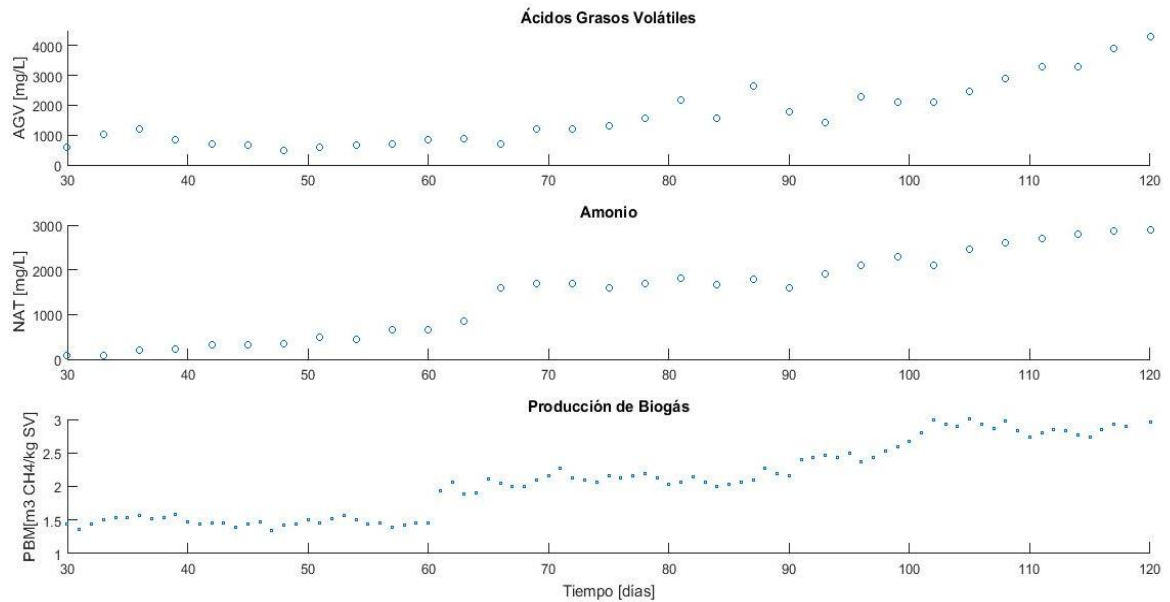


### **3.6 ESTABILIZACIÓN DE LA PROPORCIÓN SINÉRGICA ÓPTIMA EN UN REACTOR DE TANQUE AGITADO.**

#### **3.6.1 Producción de biogás, Nitrógeno amoniacal total (NAT) y ácidos grasos totales (AGV) en Co-DA de GJ, LS Y MC.**

La figura 5 describe la dinámica del biodigestor durante los 120 días del proceso de Co-DA para la mezcla con mayor efecto sinérgico a velocidades de carga orgánicas (VCO) de 1, 2 y 3 g SV/L\*día. La figura 5a muestra que para una VCO de 1 g SV/L\*día, la concentración de AGV permaneció estable con valores entre 600-840 mg/L. Por su parte, la concentración de NAT osciló entre 100-666 mg/L (Figura 5b). Durante este período, no presentaron inhibiciones lo cual se refleja en una cinética de producción de biogás estable entre 1.34-1.57 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>-día (Figura 5c). A partir del día 60 el biodigestor se cargó con 2 g SV/L\*día incrementando la concentración de AGV hasta 900-1800 mg/L y NAT hasta 858-1600, respectivamente. El incremento en la VCO fue productivo, dado que propició aumentos significativos en la velocidad de producción de biogás. Para una VCO de 2 g SV/L\*día, la velocidad de producción del biogás ascendió hasta 1.45 -2.27 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>-día. Probablemente la sinergia de la mezcla favoreció el metabolismo microbiano, permitiendo un proceso de digestión de rápida estabilización en el cual se presenta baja acumulación de AGV y NAT al incrementar la VCO. Al cargar el biodigestor a 3 g SV/L\*día, se presentaron incrementos en la concentración de AGV y NAT hasta 4300± 30 mg/L y 2980±80 mg/L, respectivamente. Sin embargo, valores altos en la concentración de AGV y NAT no generaron toxicidad o saturación en el biodigestor, lo cual se corrobora con la velocidad de producción de biogás que ascendió aproximadamente hasta valores entre 2.40-3.0 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV.

**Figura 5.** Variables de control a) Ácidos Grasos Volátiles, b) Concentración de NTA y c) Producción de biogás

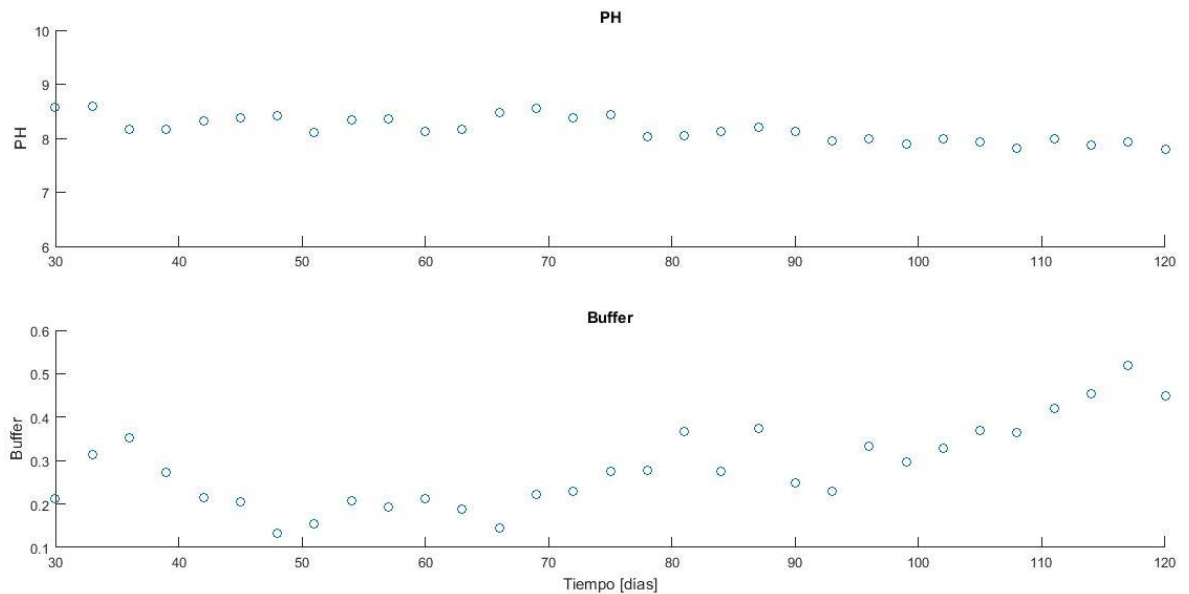


### 3.6.2 Perfil de variación del pH y Capacidad tampón (relación AGV/alcalinidad).

La figura 6 muestra los cambios en la estabilidad del biodigestor durante los 120 días de operación a velocidades de carga orgánicas (VCO) de 1, 2 y 3 g SV/L\*día. En la figura se puede observar que incrementos en la VCO no generaron cambios bruscos tanto para el pH como para la capacidad tampón durante el proceso biodegradativo. El pH se mantuvo oscilando en un rango de 8.5 a 7.5, en el cual la homeostasis celular de los microorganismos anaerobios no es afectada (Wan et al; 2011). Por su parte, la capacidad tampón se mantuvo en el rango de 0.2 a 0.4,

valores considerado como operación estable para un proceso de digestión anaerobia (Callaghan et al., 2002).

**Figura 6.** Estabilidad del reactor a) Capacidad Buffer y b) pH



Con una carga de  $VCO = 1 \text{ g/L} \cdot \text{día}$  la capacidad buffer junto con el pH reflejó oscilaciones comprendidas entre 0,1-0,4 y 8,1-8,6, respectivamente. Para el segundo período con una carga diaria de  $2 \text{ g SV/L} \cdot \text{día}$  las fluctuaciones aumentaron en la capacidad Buffer en un rango comprendido entre 0,1 y 0,4 y el pH comenzó a disminuir. En el período con  $VCO = 3 \text{ g/L} \cdot \text{día}$  se pudo evidenciar que a medida que aumenta la capacidad buffer el pH tienen una leve disminución en comparación al período anterior, debido a que el rango óptimo de pH para el crecimiento de un microorganismo metanogénico está entre 7.5-8.5.

#### 4. CONCLUSIONES

- El proceso de biodegradación anaerobia de la gallinaza de jaula (33.4 %SV), melaza de caña (32.9 %SV) y lactosuero (33.7%SV) presenta mayores efectos sinérgicos ( $\Phi=1.39$ ), superando las mezclas binarias, confirmando las ventajas de la codigestión multicomponente.
- La Co-digestión de la mezcla ternaria de GJ, LS y MC mejora la cinética del proceso al obtener valores  $\lambda$  de (0.14, 0.58, 0.26 y 0.27) días, menores en comparación a las monodigestiones y las mezclas binarias.
- La co-digestión, en tanque agitado con alimentación diaria, de la mezcla sinérgica de gallinaza de jaula, melaza de caña y lactosuero favoreció la estabilidad del proceso (pH de 7.5; capacidad *buffer* de 0.4; ácidos grasos volátiles de  $4300 \pm 30$  mg/l; Nitrógeno total amoniacal de  $2980 \pm 80$  mg/l), dando un rendimiento en el rango de 2.4 a 3.0 m<sup>3</sup> biogás/kg SV.

## BIBLIOGRAFIA

ACUÑA, Edgar. (2015). Regresion Lineal. Universidad de puerto rico. Recinto universitario. En: <http://academic.uprm.edu/eacuna/miniman9sl.pdf>.

APHA. (2005). Standard methods for the examination of water and waste water. American Public Health Association, Washington, ISBN 978-0-87553-047-5.

ANGELIDAKI, I., ALVES, M., BOLZONELLA, D., BORZACCONI, L., CAMPOS, J. I., GUWY, A.J., KALYUZHNYI, S., JENICEK, P., VAN-LIER, J.B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, Volume 59, 927-934.

ASTALS, S., BATSTONE, D.J., MATA-ALVAREZ, J., JENSEN, P.D. (2014). *Identification of synergistic impacts during anaerobic digestion of organic wastes*, 421-427.

ASOCAÑA. (2013). Sector azucarero Colombiano. En: <http://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>.

B. Deepanraj., V. Sivasubramanian., S. Jayaraj. (2015). Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 121, 100–104.

CALLAGHAN F., WASEA D., THAYANITHYA K., FORSTERB C. (2002). Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable waste and chicken manure. *Biomass and Bioenergy*, 27, 71-77.

CECODES. (2009). Alpina productos Alimenticios: Pulverización de suero en la disminución de carga orgánica residual. ISBN 978-958-99020-0-4. Colombia: Cambiando el rumbo: Casos de sostenibilidad en Colombia.

COMINO E., RIGGIO V., ROSSO M. (2012). Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey. *Bioresource Technology*, 114, 46-53.

ELBESHISHY E. y NAKHLA G. (2012). *Batch anaerobic co-digestion of proteins and carbohydrates*. *Bioresource Technology* 116, 170-178.

ESCALANTE H., ORDUZ J., ZAPATA L. (2010). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia, Unidad de planeación minero energético, UPMe, Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales, IDEAM, Departamento Administrativo de ciencia, tecnología e innovación, Colciencias y Universidad Industrial de Santander, UIS.

GARCÍA-GEN, Santiago., RODRÍGUEZ, Jorge y LEMA, Juan M. (2014). *Optimisation of substrate blends in anaerobic co-digestion using adaptive linear programming*, 159-167.

GARCÍA QUIJANO, Naurys Tatiana y LAMBIS BENITEZ, Luis Enrique. (2013). Estudio Preliminar de la Producción de Biogás mediante co-digestión anaerobia de gallinaza de jaula con melaza, lodo residual y aceite de oliva como co-sustratos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero químico. Universidad Industrial de Santander, 64 pág.

GELEGENESIS, J., GEORGAKAKIS, D., ANGELIDAKI, I., & MAVRIS, V. (2007). Optimization of biogás production by co-digesting whey with diluted poultry manure. *Renewable Energy*, 32(13), 2147-2160.

GELEGENIS, John y SAMARAKOU, Maria. (2007). *Use of Detailed Kinetics for the Prediction of Methane Production Rate in Anaerobic Digestion. Case Study of Whey/Manure Co-digestion*. Department of Energy Technology, 8 pág.

GUERRERO W., CASTILLA H., CÁRDENAS K., GÓMEZ C., CASTRO J. (2012). Degradación anaerobia de 2 tipos de lactosuero en reactores UASB. *Tecnología Química*, 32, 99-106.

HUBLIN, Andrea., IGNJATIC ZOKIC, Tatjana y ZELIC, Bruno. (2012). Optimization of Biogas Production from Co-digestion of Whey and Cow Manure. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 17: 1284-1293.

B.J. Jobling Purser., S.-M. Thai., T. Fritz., S.R. Esteves., R.M. Dinsdale., A.J. Guwy. (2014). An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water research* 61, 162-170.

KAVACIK B., TOPALOGLU B. (2010). Biogas production form co-digestion of chesse whey and dairy manure. *Biomass an Bioenergy*, 34, 1321-1329.

LABATUT, Rodrigo A., ANGENENT, Largus T., Scott, Norman R. (2011). *Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates*, 2255-2264.

LOZANO VERJEL, Sindy Johanna. (2014). *Estabilización de la materia orgánica presente en el lactosuero mediante el proceso de codigestión anaerobia*. Trabajo de grado para optar el título de Magister en Ingeniería Ambiental, 93 pág.

MAGBANUA Jr, Benjamin S., ADAMS, Thomas T., JOHNSTON, Phillip. (2001). *Anaerobiccodigestion of hog and poultrywaste*, 4 pág.

MARTÍ ORTEGA, Nuria. (2006). Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process. Florida, USA.

MARTÍNEZ V, Steven., NUMPAQUE L, Humberto y RUGE R, Ilber. (2011). Producción de gas metano e hidrogeno por vía digestión anaeróbica de residuos sólidos orgánicos en Colombia.

MISI, S., & FOSTER, C. (2001). Batch codigestion of multi-component agro waste. *Biosource Technology*, 80, 19-28.

POH.P y CHONG. M. (2009). *Development of anaerobic digestión methodsforpalmoil*. *Bioresource Technology*, 100, 1-9.

PORTAL ÁLVAREZ, Gustavo Adolfo. (2013). Mejoramiento del potencial de biometanización de la Gallinaza de Jaula a partir de Codigestión Anaerobia con Glicerol Residual. Trabajo de grado para optar el título de ingeniero químico. Universidad industrial de Santander, 64 pág.

SIERRA A. (2013). Obtención de biogás a partir de gallinaza producida en la granja Bellavista-Horizontes al servicio de incubadora Santander S.A. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga

TSAGARAKIS K.P y PAPADOGIANNIS, Ch. (2006). "Technical and Economic Evaluation of the Biogas Utilization for Energy Production at Iraklio Municipality, Greece". Energy Conversion and Management.

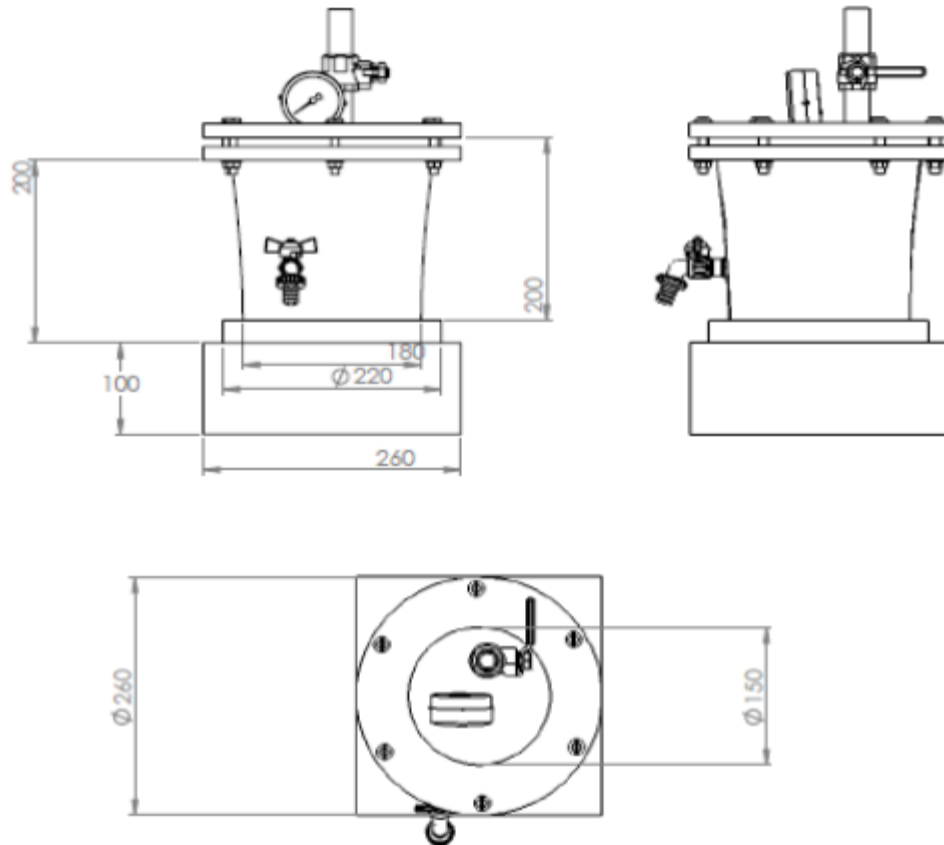
WAN, C., ZHOU, Q., FU, G;LI, Y. (2011). Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease. Waste Management, Volumen 31, 1752-1758.

WANG, X., YANG, G., LI, F., FENG Y., REN G y HAN X. (2013). *Evaluation of two statistical methods for optimizing the feeding composition in anaerobic co-digestion: mixture design and central composite design.* En: NCBI.

WANG, X., YANG, G., FENG Y., REN G y HAN X. (2012). *Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw.* En: NCBI.

## ANEXOS

**Anexo A.** Plano del reactor de tanque agitado (dimensiones en mm).



## Anexo B. Registro fotográficos.

Operación Batch



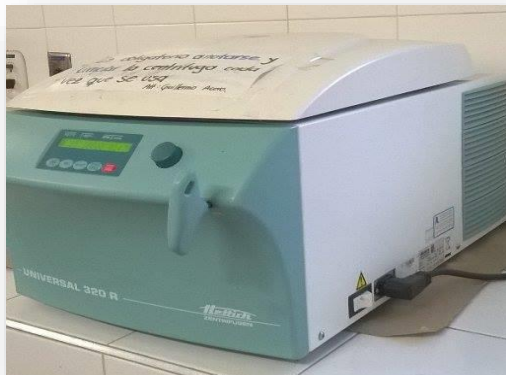
Operación en continuo



Medición de azúcares (ART)



Medición de amonio (NH3)



Medición de PH, AGV y AT