

**MEJORAMIENTO DEL POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN DE LA
GALLINAZA DE JAULA A PARTIR DE CODIGESTIÓN ANAEROBIA CON
GLICEROL RESIDUAL**

GUSTAVO ADOLFO PORTAL ÁLVAREZ

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

2013

**MEJORAMIENTO DEL POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN DE LA
GALLINAZA DE JAULA A PARTIR DE CODIGESTIÓN ANAEROBIA CON
GLICEROL RESIDUAL**

GUSTAVO ADOLFO PORTAL ÁLVAREZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director

HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ

Ingeniero Químico, Ph. D.

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

2013

“Noble y bélico adalid, caballero del honor...”

“Señorío es morir en el campo y no filosofía barata.”

A mi amada madre, por ser la mayor motivación de mis esfuerzos, por darme el inmaculado honor de ser su hijo y por nunca haber soltado mi mano en este arduo camino de lograr nuestros propósitos. Alcanzamos uno más y seguiremos fuertes para lograr los que vienen.

A mi padre por sus consejos, su cariño y todos los valores inculcados, que terminaron por definir la persona que soy ahora.

A quien un día le hice la promesa de convertirme en un profesional y ahora con orgullo puedo decir que le he cumplido. Mi ángel... La mujer de mi vida... Mi Sofía.

A esa persona que con solo una mirada me tranquiliza, con solo una sonrisa me da energía y con solo una caricia me enseña que el amor perfecto si existe, Tiago.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a:

- Universidad Industrial de Santander, fuente inagotable de conocimiento y gestora de un sueño hecho realidad.
- Dr. Humberto Escalante Hernández, por darme la oportunidad de trabajar con él, por prestarme su intelecto para que este trabajo fuese posible.
- Ingeniero químico José Daniel Marín Batista, por trabajar fuertemente de mi lado, por compartir mi misma ilusión y por sobre todo, ser un gran compañero.
- Mi hermosa Katte, por ser la encargada de que en este proceso mi corazón no fallara y por tenerme siempre una sonrisa disponible en cada noche de mi vida.
- Mi familia, por toda la colaboración durante este y muchos otros ámbitos de mi formación, por estar ahí en cada momento y en la medida de lo posible, siempre haberme extendido la mano.
- Mi hermanita, quien con su afecto ilimitado y sus palabras de aliento, me motivó siempre a luchar.
- Daniela, Alexis y Javier, mis amigos, mis confidentes, mis ejemplos profesionales y ahora mis colegas.
- Profesores, compañeros y trabajadores de la escuela de ingeniería química por contribuir en mi formación académica.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1 PRODUCCIÓN AVÍCOLA.....	18
1.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA (DA).....	18
1.2.1 Hidrólisis.....	19
1.2.2 Acidogénesis	20
1.2.3 Acetogénesis	20
1.2.4 Metanogénesis	20
1.3 CODIGESTIÓN ANAEROBIA (CoDA)	21
1.4 SUSTRATO PARA CoDA.....	22
1.4.1 Gallinaza como sustrato para CoDA	23
1.5 COSUSTRATO PARA CoDA.....	25
1.6 INÓCULO PARA CoDA	25
1.6.1 Parámetros para la selección del inóculo para la CoDA	26
1.6.1.1 Actividad hidrolítica (AH).....	26
1.6.1.2 Actividad metanogénica (AME).....	26
1.7 PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CoDA.....	26
1.7.1 Azúcares reductores totales (ART).....	26
1.7.2 Ácidos grasos volátiles (AGV)	27
1.7.3 Alcalinidad total (AT).....	27
1.7.4 Temperatura.....	27
1.7.5 pH.....	28

1.7.6 Potencial de biometanización (PBM)	28
1.7.7 Biodegradabilidad	28
1.7.8 Inhibición por amonio.....	29
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	31
2.1 MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
2.1.1 Sustrato	31
2.1.2 Cosustrato	32
2.1.3 Inóculo.....	32
2.2 EFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN SOBRE EL PBM.....	33
2.3 INFLUENCIA DE LA RIS	34
2.4 PROCESO DE CoDA DE GJ-GR	34
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	37
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO E INÓCULO	37
3.2 EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES RESPUESTA DE LA CoDA DE LA GJ-GR.....	37
3.3 POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN DE LA DA Y CoDA DE LA GJ	42
3.4 PERFIL DE BIODEGRADABILIDAD PARA LA DA Y CoDA DE LA GJ	44
3.5 DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE NH_3 SOBRE EL PBM.....	45
4. CONCLUSIONES.....	47
5. RECOMENDACIÓN	48
BIBLIOGRAFÍA	49
ANEXOS	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de la digestión anaerobia	19
Figura 2. Etapas experimentales para el proceso de CoDA de GJ-GR	31
Figura 3. PBM de la CoDA de GJ a diferentes concentraciones de GR	34
Figura 4. Cinética de consumo de ART para la DA y CoDA de la GJ	38
Figura 5. Variación de AGV para la DA y CoDA de la GJ	39
Figura 6. Variación de pH para la DA y CoDA de la GJ	40
Figura 7. Variación de relación AGV/AT para la DA y CoDA de la GJ	41
Figura 8. PBM para la DA y CoDA de la GJ.....	42
Figura 9. Porcentaje de incremento de producción de biogás para diferentes sistemas anaerobios.....	43
Figura 10. Aplicación del modelo Gompertz para representar la producción de biogás de la DA y CoDA de la GJ.....	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales reacciones químicas que ocurren en la digestión anaerobia	21
Tabla 2. Composición elemental de la gallinaza de jaula	22
Tabla 3. Características fisicoquímicas de gallinaza de jaula	23
Tabla 4. Relación C: N de estiércoles	24
Tabla 5. Condiciones de operación para la CoDA de GJ-GR	35
Tabla 6. Variables monitoreadas, periodicidad de la medición y método analítico	36
Tabla 7. Caracterización de sustrato, cosustrato e inóculo	37
Tabla 8. Parámetros de sintonía del modelo Gompertz.....	45

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Protocolo de toma de muestra de gallinaza de jaula (GJ)	57
Anexo B. Protocolo de toma de muestra de estiércol bovino (EB)	58
Anexo C. Determinación de la concentración de azúcares reductores totales (ART).....	59
Anexo D. Determinación de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), alcalinidad total (AT).....	60
Anexo E. Determinación de sólidos totales fijos y volátiles en muestras sólidas y semisólidas.....	62
Anexo F. Método de desplazamiento alcalino	64

NOMENCLATURA

DA = Digestión anaerobia

CoDA = Codigestión anaeróbica

ART = Azúcares Reductores Totales (g/L)

AGV = Ácidos Grasos Volátiles (mg/L)

AT = Alcalinidad Total (mg CaCO₃/L)

EB = Estiércol bovino

GJ = Gallinaza de jaula

GR = Glicerol residual

RIS = Relación Inóculo/Sustrato (SV de inóculo/g SV de sustrato)

ST = Sólidos Totales (mg/L)

SV = Sólidos Volátiles (mg/L)

ALC = Alcalinidad

NTA = Nitrógeno total amoniacal

C/N = Carbono/ Nitrógeno

AH = Actividad hidrolítica

AME = Actividad metanogénica

% p/p = porcentaje peso a peso

RESUMEN

TITULO: MEJORAMIENTO DEL POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN DE LA GALLINAZA DE JAULA A PARTIR DE CODIGESTIÓN ANAEROBIA CON GLICEROL RESIDUAL*.

AUTOR: GUSTAVO ADOLFO PORTAL ÁLVAREZ**.

PALABRAS CLAVES: CODIGESTIÓN ANAEROBIA, GALLINAZA DE JAULA, POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN, RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO, INHIBICIÓN POR AMONIO.

En Colombia, el 40% de las actividades pecuarias están representadas por el sector avícola. La Gallinaza de jaula es el residuo más representativo de esta industria, su disposición requiere de tratamientos de estabilización para evitar problemas de salud pública, ambiental y animal. La digestión anaerobia permite estabilizar la biomasa residual y obtener un producto de valor energético agregado denominado biogás. Sin embargo, la producción de biogás a partir de Gallinaza de jaula es afectada por la liberación en exceso de iones amonio.

Factores como la relación carbono/nitrógeno influyen considerablemente en los rendimientos de producción de biogás. Agregar un segundo residuo, resulta propicio para mejorar dicha relación y por ende el rendimiento. Además, determinar un buen inóculo, que incremente la masa microbiana del sistema y concertar una relación inóculo/sustrato (RIS) que contribuya a que el proceso se efectúe de manera más activa, son aspectos de gran importancia que deben tenerse en cuenta.

En este estudio se mejoró la producción de biogás a partir de codigestión anaerobia de la Gallinaza de jaula con Glicerol residual, usando como inóculo Estiércol bovino, con una RIS igual a 1. El potencial de biometanización de la Gallinaza de jaula se incrementó desde 0.37 a 0.57 m³ biogás/Kg SV adicionados por la adición de Glicerol residual en una proporción en peso de 95 g de Gallinaza de jaula y 5 g de Glicerol residual. La adición de Glicerol residual también permitió la reducción de la concentración de amonio, lo que favorece la producción de biogás.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Humberto Escalante Hernández Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: BIOMETHANISATION POTENTIAL IMPROVEMENT OF CAGE POULTRY MANURE WITH RESIDUAL GLYCEROL IN AN ANAEROBIC CODIGESTION*.

AUTHOR: GUSTAVO ADOLFO PORTAL ÁLVAREZ**.

KEYWORDS: ANAEROBIC CODIGESTION, CAGE POULTRY MANURE, BIOMETHANISATION POTENTIAL, CARBON/NITROGEN RELATION, AMMONIUM INHIBITION.

In Colombia, 40% of livestock activities are represented by the poultry sector. The cage poultry manure is the most representative residue of this industry, its available requires stabilization treatments to prevent public health, environmental and animal problems. Anaerobic digestion stabilizes residual biomass and obtains an energy value added product called biogas. However, the production of biogas from cage poultry manure is affected by the excessive release of ammonium ions.

Factors such as the carbon/nitrogen relation influence the yields of biogas production significantly. Add a second residue, is conducive to improving the relation and therefore performance. Also, determine a good inoculum to increase the microbial mass of the system and request an inoculum/substrate relation (RIS) that helps make the process more actively, are very important aspects to consider.

In this study, we improved the production of biogas by anaerobic codigestion of cage poultry manure with residual glycerol, using bovine manure as inoculum, with a RIS equal to 1. Biomethanisation potential of cage poultry manure increased from 0.37 to 0.57 m³ biogas / kg SV added by the addition of residual glycerol in a weight relation of 95 g cage poultry manure and 5 g of residual glycerol. Residual glycerol adding also allowed reducing ammonium concentration, which favors the production of biogas.

* Degree work.

** Physicochemical Faculty of Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Humberto Escalante Hernández Ph.D.

INTRODUCCIÓN

En Colombia las explotaciones avícolas representan el 40% del área total destinada a las actividades pecuarias. La producción anual de aves de corral corresponde a 140'641.808 unidades, que durante los procesos de explotación generan 3'436.204 ton/año de Gallinaza de Jaula (GJ). (Escalante *et al.*, 2010; Shwedel, 2013). La GJ se considera el residuo orgánico más representativo del sector productivo en cuanto a cantidad. Este residuo se define como una mezcla de deposiciones sólidas y líquidas de los animales, que requiere de tratamientos de estabilización antes de su disposición final para evitar problemas de contaminación ambiental, salud pública y animal (Rosales *et al.*, 2007; Velázquez *et al.*, 2010; Delgado, 2011).

Ante esta necesidad, el sector avícola ha realizado importantes inversiones en tecnología de vanguardia, que permite aprovechar los subproductos del proceso, en la elaboración de nuevos productos, como el compost de gallinaza y harina como suplemento alimenticio para el ganado. Sin embargo, estas tecnologías no han sido suficientes para tratar las cantidades de residuos generados (Sierra, 2013).

Una tecnología capaz de estabilizar la biomasa residual a bajo costo operacional y disminuir su impacto ambiental al reducir olores y emisiones de gases efecto invernadero es la digestión anaerobia (DA) (Ward *et al.*, 2008). Los sistemas de bioconversión anaerobia son procesos biológicos que descomponen la materia orgánica por la acción de consorcio microbiano con alta actividad hidrolítica y metanogénica; como resultado se obtiene una mezcla de gases denominada biogás, compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono (Barrera *et al.*, 2009; Quintero *et al.*, 2012).

La digestión anaerobia de gallinaza de jaula se ha evaluado con diferentes inóculos, obteniéndose mejores desempeños con el estiércol bovino, el cual ha demostrado tener la sinergia necesaria para la producción de un biogás funcional (Sierra, 2013). A pesar de esto, problemas como la relación C/N y dado que el 70% de la gallinaza seca es nitrógeno, en forma de ácido úrico y proteínas, durante su degradación anaerobia se produce una alta concentración de iones amonio que causan problemas en el desarrollo y metabolismo del consorcio microbiano, lo cual representa una disminución drástica de la producción de biogás (Salminen *et al.*, 2002; Abouelenien *et al.*, 2010), lo que hace necesario el estudio complementario de alternativas que conlleven a mejorar el proceso, es aquí donde la codigestión anaerobia se presenta como una vía prometedora para consecución de mejores resultados.

La codigestión anaeróbica (CoDA) consiste en la DA de una mezcla de dos o más sustratos con características complementarias lo cual permite a) Favorecer la producción de biogás, sinergia positiva, relación C/N y humedad del medio. b) Disminuir la concentración de compuestos inhibidores o tóxicos (Mata-Álvarez *et al.*, 2010; Castro *et al.*, 2010; Astal *et al.*, 2012).

Un cosustrato atractivo para la CoDA de estiércoles es el glicerol residual (GR) producto del proceso de transesterificación de grasas en la generación de biodiesel. El prominente contenido de carbono en el GR aumenta la relación C/N del sustrato, evitando inhibición del proceso por exceso de nitrógeno (Robra *et al.*, 2010; Santibañez *et al.*, 2011). Además, el elevado contenido de agua presente en el estiércol actúa como solvente para el GR. La alta alcalinidad del estiércol permite que el sistema tenga una capacidad tampón que evita la acumulación de ácidos grasos. El GR aporta materia orgánica rápidamente biodegradable que junto con el amplio rango de micro nutrientes presentes en el estiércol, generan un medio esencial para el crecimiento microbiano (Mata-Álvarez *et al.*, 2010; Astal *et al.*, 2012).

La CoDA puede incrementar la producción de biogás hasta un 200% dependiendo de las condiciones de operación del proceso y características del cosustrato empleado (Elbeshbishy *et al.*, 2010). Diferentes investigaciones en configuración batch y en continuo, reportan mejoramiento en la producción de biogás, descripción de parámetros cinéticos y mecanismos microbianos para la CoDA de GR con diferentes residuos agroindustriales: ensilado de maíz, residuos de frutas y vegetales (Amon *et al.*, 2006; Galí *et al.*, 2009); Residuos sólidos urbanos (Fountoulakis *et al.*, 2009); estiércoles: bovino y porcino (Amon *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2008; Astal *et al.*, 2011); lodos de tratamientos de aguas residuales (Fountoulakis *et al.*, 2010) y aguas residuales (Ma *et al.*, 2008; Sulaiman *et al.*, 2010; Siles *et al.*, 2010). Sin embargo, la CoDA de GJ con GR ha sido poco estudiada.

Por lo anterior, el propósito de este trabajo fue realizar un estudio preliminar a escala laboratorio, para mejorar la producción de biogás a partir de gallinaza de jaula mediante codigestión anaerobia, usando glicerol residual como cosustrato. Adicionalmente se planteó estudiar la disminución del efecto inhibitorio del amonio con la adición del cosustrato y representar esto mediante un modelo cinético.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 PRODUCCIÓN AVÍCOLA

A nivel nacional, se genera una cantidad de biomasa (Gallinaza-Pollinaza) proveniente de aves ponedoras y de engorde que corresponde a 3'436.204 ton/año, encontrándose Santander como una de las regiones de mayor concentración de unidades/año (Escalante *et al.* 2010).

La gallinaza se considera una fuente de energía renovable atractiva, debido a su alto porcentaje de humedad, valores que oscilan entre 56,40 y 75,31%, lo que facilita los procesos biológicos. (Escalante *et al.* 2010). Comparada con otros tipos de gallinaza (De piso y pollinaza), la de jaula tiene además, un alto porcentaje de nitrógeno, factor que junto a la humedad afectan la relación C/N y el pH y por ende conlleva a un diseño especial de proceso de codigestión.

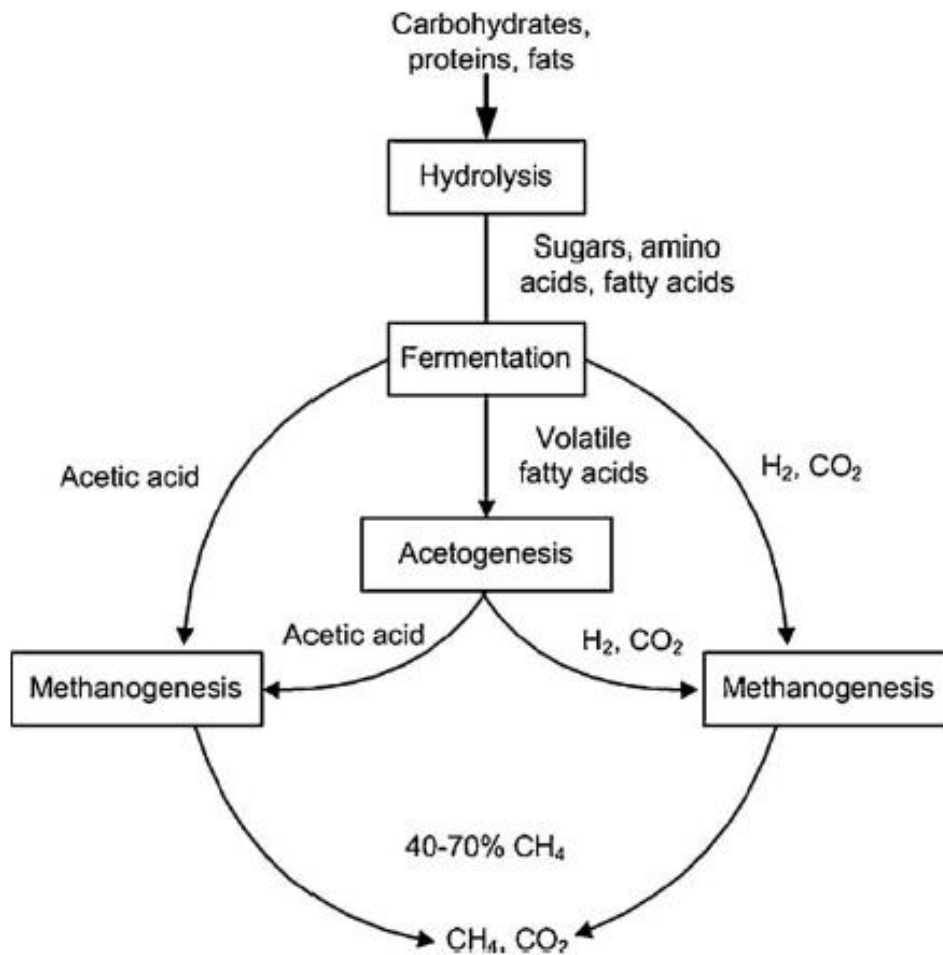
1.2 DIGESTIÓN ANAEROBIA (DA)

La DA es un proceso biológico natural en ausencia de oxígeno donde una comunidad de bacterias descompone la materia orgánica y produce biogás que contiene principalmente metano y dióxido de carbono. El proceso no sólo reduce la contaminación orgánica, sino que también proporciona una nueva fuente de energía (Zeng *et al.*, 2010).

Los residuos biológicos, los lodos, estiércol de ganado vacuno y porcino son ampliamente utilizados como inóculos en el proceso de DA para la producción de energía, teniendo en cuenta una concentración correcta para evitar una limitación de la biomasa y una sobrecarga de materia orgánica en el bioreactor (Angelidaki *et al.*, 2009; González y García, 2009).

En la figura 1 se representan las diferentes etapas presentes en el proceso de digestión anaerobia.

Figura 1. Representación esquemática de la digestión anaerobia.



Fuente: (Li Yebo *et al.*, 2011)

1.2.1 Hidrólisis

La hidrólisis consiste en la transformación enzimática de macromoléculas complejas y de mayor peso molecular como polisacáridos, lípidos, proteínas y

grasas en compuestos simples y solubles, tales como aminoácidos, azúcares, ácidos grasos de cadena larga y glicerina, por la acción de enzimas extracelulares como *bacteroides*, *clostridium* y bacterias facultativas como *estreptococos* (Yadvika *et al.*, 2004).

1.2.2 Acidogénesis

En la acidogénesis la materia orgánica disuelta durante la hidrólisis es biodegradada a ácidos grasos volátiles (Ácido acético, propiónico, butírico), hidrógeno, dióxido de carbono, y alcoholes por bacterias acidogénicas (Pandey *et al.*, 2011).

1.2.3 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).

1.2.4 Metanogénesis

Existen dos tipos de bacterias metanogénicas, las que utilizan ácido acético (Acetoclásticas) y las que utilizan hidrógeno (Hidrogenofílicas). Las bacterias acetoclásticas convierten el ácido acético en dióxido de carbono y metano, se desarrollan muy lentamente e influyen apreciablemente en el pH del sistema por la eliminación de ácido acético y la formación de dióxido de carbono; además son las responsables de la mayoría de metano producido. Las bacterias hidrogenofílicas convierten el hidrógeno y dióxido de carbono a metano y controlan el potencial redox del proceso (Castillo *et al.*, 2007).

Durante la DA cada grupo de microorganismos son productores de diferentes tipos de enzimas, para llevar a cabo la transformación del sustrato (Residuo) mediante una serie de reacciones químicas (Tabla 1).

Tabla 1. Principales reacciones químicas que ocurren en la digestión anaerobia.

Reacción	Ecuación
Fermentación de Glucosa a acetato	$\text{Glucosa} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}^+ + 4\text{H}_2$
Fermentación de la Glucosa a Butirato	$\text{Glucosa} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_4\text{H}_7 + 2\text{HCO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{H}_2$
Fermentación del Butirato a Acetato e H_2	$\text{Butirato} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
Fermentación del Propionato a Acetato	$\text{Propionato} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
Acetogénesis a partir del H_2 y CO_2	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis a partir del CO_2 y H_2	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis a partir del Acetato	$\text{Acetato} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$

Fuente: (Díaz-Báez *et al.*, 2002)

1.3 CODIGESTIÓN ANAEROBIA (CoDA)

La CoDA consiste en la Digestión Anaerobia (DA) de una mezcla de dos o más sustratos con características complementarias, favoreciéndose la producción de biogás debido al tratamiento conjunto de los sustratos. CoDA no es solo una simple DA, puesto que cada sustrato aporta problemas de inhibición particulares, por lo cual es de mucha importancia seleccionar una excelente proporción entre las mezclas de sustratos con el fin de a) Favorecer una interacción positiva de sinergismo entre los microorganismos y un excelente balance de nutrientes y humedad; b) Evitar inhibiciones por iones amonio, degradación de productos lípidos y c) Optimizar la producción de biogás (Mata-Álvarez *et al.*, 2010).

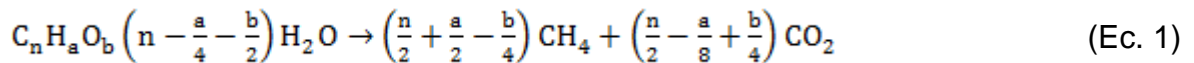
La CoDA ofrece diversas ventajas potenciales, ecológicas, tecnológicas y económicas, que resultan en la implementación del tratamiento de los residuos orgánicos por medio de DA como recientemente se realiza en plantas de tratamiento de aguas residuales, donde los lodos resultante del tratamiento se mezclan con estiércol para incrementar fácilmente la producción de biogás por

encima del 200%, dependiendo de las condiciones de operación del proceso (Amon *et al.*, 2006).

1.4 SUSTRATO PARA CoDA

La materia prima para la producción de biogás mediante codigestión anaerobia puede ser obtenida de diversas fuentes potenciales tales como residuos sólidos orgánicos, desechos de frutas y vegetales, grasas, madera y aserrín, maleza terrestre o biomasa marina. Cada tipo de materia prima posee sus características particulares por lo cual se hace esencial conocer, cuantificar y controlar las características del potencial de biometanización.

Los sólidos totales (ST) y los sólidos volátiles (SV) son indicadores indirectos de la materia orgánica presente en un sustrato, debido a que varían durante el proceso. La composición elemental (C, N, H, O y S) permite determinar la fórmula empírica del sustrato (Ecuaciones 1-2) y así realizar aproximaciones teóricas de la cantidad de biogás producible (Raposo, *et al.*, 2011; Angelidaki, *et al.*, 2011).



$$B_{0, th} = \frac{\left(\frac{n}{2} - \frac{a}{8} - \frac{b}{4} \right)}{12n + a + 16b} 22,4 \left(\text{STP} / + \frac{CH_4}{g-Vs} \right) \quad (\text{Ec. 2})$$

Tabla 2. Composición elemental de la gallinaza de jaula.

Elemento	% p/p
C	28,73
H	4,31
O	31,78
N	2,23

Fuente: (Sierra, 2013)

Aplicando la Ec. 1, a los datos de la composición elemental de la GJ (Tabla 2), la fórmula empírica para la gallinaza es de $C_{24}H_{42}O_{20}$. Por lo tanto el biogás teórico producido según la Ec. 2 es 0,43 L CH_4 /(g-SV).

1.4.1 Gallinaza como sustrato para CoDA

La composición química de la gallinaza es variada y depende del tipo de ave, tipo de cama, alimentación del ave y otros factores. Uno de los nutrientes que varían en la composición de la gallinaza es la proteína cruda, la cual afecta el contenido bacteriano del sustrato y del mismo modo el proceso de degradación del ácido úrico para ser convertido en amoníaco. El contenido de humedad de la gallinaza de jaula es elevado y depende del sistema de producción, la edad del ave, la temperatura ambiente y el tipo de alimento. (Estrada, 2005).

Tabla 3. Características fisicoquímicas de gallinaza de jaula.

Parámetros	Gallinaza de Jaula
pH	9,0
Conductividad (ms/cm)	6,9
Humedad	57,8
Cenizas	23,7
Potasio	1,9
Carbono orgánico	19,8
Materia orgánica	34,1
Nitrógeno	3,2
Relación C/N	6,2
Fosforo (P_2O_5)	7,39

Fuente: (Peláez *et al.*, 1999)

La tabla 3 muestra las características fisicoquímicas de la gallinaza de jaula. Se evidencia un alto contenido de humedad y nitrógeno, estos factores afectan el pH y la relación C/N. Los porcentajes de nitrógeno, ácido fosfórico y potasio incrementan al encontrarse la GJ en reposo.

En la digestión anaerobia uno de los parámetros más importantes es la relación Inóculo/Sustrato (RIS). Teóricamente la RIS afecta la cinética de biodegradación del sustrato y permite llevar a cabo estudios de DA comparables en cuanto a rendimientos de biogás (Raposo, *et al.*, 2011). En la DA de GJ usando como inóculo el EB se hace evidente que incrementar la RIS, hace que el sistema anaerobio adquiera mayor estabilidad y se recomiendan valores entre 1-1,5 (Sierra, 2013).

La GJ presenta menor relación C/N que otras fuentes de biomasa (Tabla 4). La biomasa residual del sector avícola posee una relación de C/N entre 9,12 y 13,04% p/p; una relación de C/N por orden de 12/1 presenta inconvenientes para una óptima producción de biogás. Por consiguiente la biomasa residual avícola debe ser complementada con un cosustrato con el fin de mejorar su biodegradabilidad, al disminuir el contenido de amonio y aumentar la relación C/N. (Xie, 2012).

Tabla 4. Relación C: N de estiércoles.

Fuente (Biomasa)	Relación C: N de estiércoles	Fuente (Biomasa)	Relación C: N de estiércoles
Conejo	23	Estiércol de vaca	16, 6-25
Cuyes	17	Gallinaza	12
Estiércol búfalos	11	Patos	27,4
Estiércol caballo	20	Restos de pollo	28,6
Estiércol cerdo	25	Rumen de vaca	15-30
Estiércol oveja	15-30	Sangra de vaca	15-30

Fuente: (Moncayo, 2011).

1.5 COSUSTRATO PARA CoDA

Un cosustrato rico en carbono es el glicerol residual (GR). Es el principal subproducto del proceso de producción de biodiesel; corresponde a una mezcla de glicerol con alcoholes, agua, sales, metales pesados, ácidos grasos libres, triglicéridos y metilester (Astal 2010). La biodigestión del GR como único sustrato no es viable al no poseer nitrógeno disponible para la formación de masa microbiana. No obstante, la adición de GR como fuente de carbono para sustratos con suficiente contenido de nitrógeno pero con bajo potencial de biometanización, representa una alternativa prometedora para el aprovechamiento de estos residuos. Esto se ve reflejado en estudios de la influencia del glicerol residual sobre la producción de biogás con mezclas en peso de glicerol y estiércol bovino de 5%, 10% y 15% en condiciones mesofílicas, en lo que se presentó un aumento en la producción de biogás del 9.5%, 14,3% y 14.6%, para las proporciones de 5, 10 y 15% respectivamente (Robra, 2010).

1.6 INÓCULO PARA CoDA

El estiércol bovino es un inóculo que se caracteriza por su alta producción de biogás y adaptabilidad a diferentes sustratos (Kaparaju y Rintala, *et al.*, 2005; Lehtomäki, *et al.*, 2007). En países como México y China se ha estudiado y utilizado para formación de procesos anaerobios, estiércol bovino como inóculo (Moreno, 2002).

En general las excretas de origen bovino presentan un excelente medio que favorece los procesos de digestión anaerobia y por consiguiente la producción de biogás.

1.6.1 Parámetros para la selección del inóculo para la CoDA

La selección del inóculo apropiado para la degradación metabólica de un sustrato hacia biogás depende principalmente de su actividad hidrolítica y metanogénica (Solera, *et al.*, 2002).

1.6.1.1 Actividad hidrolítica (AH)

Indica la habilidad inherente de una población microbiana para degradar fuentes de carbono (Celulosa, almidón, etc); se cuantifica como la velocidad específica de consumo de sustrato (Valdez, *et al.*, 2009). De acuerdo con la literatura, los consorcios microbianos con mayor AH son los lodos activos anaerobios y líquidos ruminales con valores de 0,26 y 0,07 mg/mL, respectivamente (Hu, *et al.*, 2004).

1.6.1.2 Actividad metanogénica (AME)

Es la capacidad de la biomasa microbiana para transformar la materia orgánica en metano; se expresa como la masa de sustrato, en términos de demanda química de oxígeno (DQO) que es convertida a metano, por unidad de biomasa y por unidad de tiempo (gDQO-CH₄/g SSV día) (Fajardo, 1997). Las bacterias que actúan en esta etapa de la CoDA convierten el ácido acético en dióxido de carbono y metano, se desarrollan muy lentamente e influyen apreciablemente en el pH y en la mayoría del biogás producido (Castillo, *et al.*, 2007).

1.7 PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CoDA

1.7.1 Azúcares reductores totales (ART)

El rendimiento de la etapa hidrolítica de la CoDA puede ser expresado por la cinética de consumo de ART. La alta concentración inicial de ART favorece el arranque del proceso y promueve el buen funcionamiento del reactor durante el proceso de CoDA. Los ART son compuestos solubles que son fácilmente

metabolizados por los microorganismos, permitiendo llevar a cabo las etapas de la CoDA (Madigan *et al.*, 2006).

1.7.2 Ácidos grasos volátiles (AGV)

Los ácidos grasos volátiles son el resultado de la fase de acidogénesis y son principalmente ácido acético, propiónico y butírico (Pandey *et al.*, 2011).

La inhibición de los microorganismos metanogénicos debido a la toxicidad, a cambios en los factores ambientales, o a las condiciones de limitación de nutrientes provoca la acumulación de AGV principalmente acetato, además de hidrógeno, ocasionando a su vez una disminución de los valores de pH. El efecto negativo causado por la acumulación de AGV se puede mitigar manteniendo el pH dentro del rango óptimo (Appels *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 1999).

1.7.3 Alcalinidad total (AT)

Es la capacidad del sistema para soportar y amortiguar la presencia de ácidos sin disminuir su pH. Esto ocurre por el efecto buffer debido a la presencia de iones hidroxilo (OH^-). Carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato ($H_2CO_3^-$). Valores típicos de alcalinidad para estos procesos están entre 1500 y 7500 mg $CaCO_3/L$ (Castillo, *et al.*, 2007; Charles *et al.*, 2009).

1.7.4 Temperatura

La temperatura afecta directamente la velocidad de las reacciones biológicas, influenciando la actividad metabólica de los microorganismos que intervienen. La digestión anaerobia se lleva a cabo en tres intervalos de temperatura: el psicrófilico menor de 30° C, mesófilico que va de 30-40°C y el termófilico de 50-60°C. Sin embargo los microorganismos anaerobios son más activos en intervalos de temperaturas mesófilico y termófilico (Appels *et al.*, 2008; Yadvika *et al.*, 2004).

1.7.5 pH

El proceso de DA está relativamente limitado a un intervalo de pH entre 6,8–7,2. Valores de pH inferiores a 4 y superiores a 9,5 puede llevar a un desequilibrio en el proceso. Debido a que la actividad de la población metanogénica es altamente vulnerable a los cambios de pH comparado con las demás poblaciones presentes en los lodos (Madigan *et al.*, 2006; Poh y Chong, 2009; Yadvika *et al.*, 2004).

1.7.6 Potencial de biometanización (PBM)

El PBM determina el máximo rendimiento de biogás y la capacidad de biodegradabilidad de un sustrato. El PBM puede describirse como el volumen de biogás acumulado (Medido en condiciones estándar de presión y temperatura) por la cantidad de sustrato adicionado en términos de sólidos volátiles (m^3 biogás/kg SV) (Angelidaki *et al.*, 2009; Raposo *et al.*, 2006).

1.7.7 Biodegradabilidad

Diferentes modelos han sido desarrollados para realizar aproximaciones y moldeamientos de la producción de biogás. Modelos de regresión lineal, con frecuencia son utilizados para representar la fase lag y exponencial de la producción de biogás asumiendo una cinética de primer orden (Gunaseelan, 2004; Galí *et al.*, 2009; Castro *et al.*, 2011). Sin embargo, la regresión lineal no permite describir con precisión el proceso de digestión. Por tanto, para sustratos de compleja biodegradación se recomienda representar el comportamiento y estimar la efectividad del proceso a partir del modelo de Gompertz. (Donoso-Bravo *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2011; Elbeshbishy *et al.*, 2012).

La ecuación modificada de *Gompertz* (Ecuación 3) fue utilizada para describir la evolución del potencial de biometanización (PBM) durante el ensayo de biodegradabilidad anaerobia debido a la capacidad de este modelo de regresión no-lineal para obtener representativas predicciones y simulaciones del proceso anaerobio (Li *et al.*, 2011; Elbeshbishy *et al.*, 2012).

$$B = B_0 \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_m e}{B_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde B_0 es el rendimiento de metano final o producción neta de metano (m^3/kg SV), B es el rendimiento de metano acumulado (m^3/kg SV) en el tiempo de incubación t (Días), e es el número de Euler equivalente a 2,7183, R_m es la velocidad máxima de producción de metano (m^3/kg SV. Días), y λ es el tiempo de la fase de latencia (Días).

1.7.8 Inhibición por amonio

Las principales fuentes de nitrógeno en la GJ corresponden al ácido úrico y proteínas presentes en la excreciones orinarias y fecales del animal. La orina contribuye con el 70% del nitrógeno presente en la materia orgánica y el 30% restante es aportado por las heces fecales. Cuando la GJ es digerida anaeróbicamente, el nitrógeno en forma de ácido úrico y proteínas es reducido hasta amonio, que en concentraciones elevadas inhibe la producción de biogás (Bujoczek *et al.*, 2000; Abouelenien *et al.*, 2009). Una gran variedad de procesos de producción de biogás, reportados en la literatura, indican inhibición por excesos en la concentración de Nitrógeno total amoniacal (NTA). Esto se puede atribuir a las características del sustrato e inóculo, las condiciones ambientales (temperatura y pH) y los períodos de adaptación de los consorcios microbianos (Astals *et al.*, 2012; Elbeshbishy *et al.*, 2012). Por otra parte, el NH_3 se ha reportado como la causa principal de la inhibición, que afecta especialmente a los microorganismos metanogénicos. La concentración de NH_3 depende básicamente de tres parámetros: la concentración de NTA, la temperatura y el pH (Chen *et al.*, 2008; Yenigun *et al.*, 2013).

La influencia de NH_3 sobre el PBM se describe por la ecuación 4 tomada del modelo cinético *Anaerobic Digestion Model N°1* (Bastone *et al.*, 2002).

$$I_{\text{NH}_3} = \frac{1}{1 + \frac{S_{\text{NH}_3}}{K_{i,\text{NH}_3}}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Dónde:

I_{NH_3} : Es un valor representativo de inhibición por amonio.

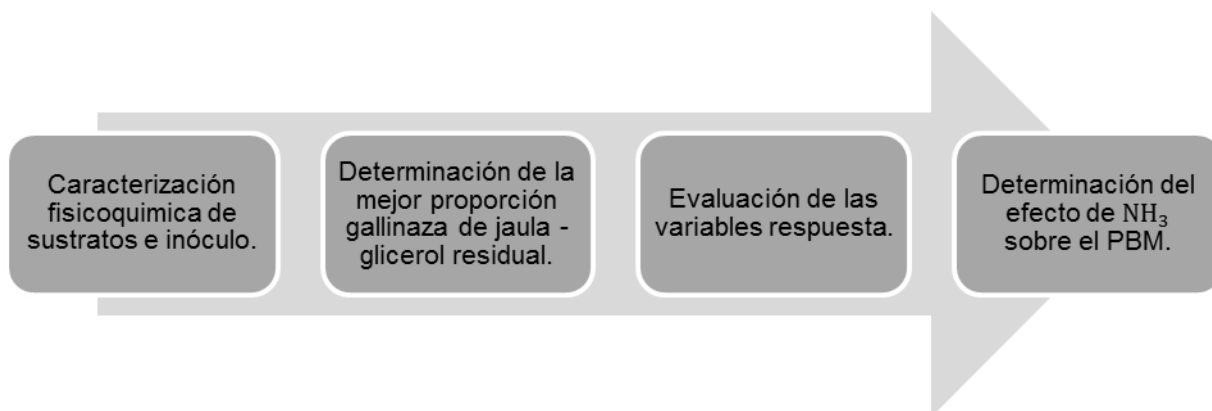
S_{NH_3} : Corresponde a la concentración de amonio libre.

K_{i,NH_3} : Es la constante de inhibición equivalente a 0,26 g/L (Angelidaki *et al.*, 1999).

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología empleada en este estudio se presenta en la figura 2.

Figura 2. Etapas experimentales para el proceso de CoDA de GJ-GR.



Fuente: Autor.

2.1 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.1 Sustrato

Para el proceso de codigestión anaerobia, se empleó gallinaza de jaula (GJ). La muestra de GJ, fue recolectada en la granja avícola Bellavista Horizontes, localizada en el municipio de Piedecuesta, mesa de los Santos – Santander. El protocolo de toma de muestra de GJ se presenta en el anexo A. (Sandoval, *et al.*, 2009). Una vez recolectada la muestra de GJ se conservó en recipientes herméticos para su posterior traslado a las instalaciones del laboratorio de biotecnología de la Escuela de Ingeniería química de la Universidad Industrial de Santander. La muestra recolectada se mantuvo refrigerada a 4°C antes de la

etapa de caracterización y análisis. Debido a que la cantidad de plumas presentes en la GJ cambió constantemente, el sustrato fue diluido al 60% con agua destilada para realizar una caracterización con mayor exactitud. Las variables evaluadas fueron: pH, concentración de sólidos totales (ST), concentración de sólidos volátiles (SV), alcalinidad (ALC), concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) y relación carbono/nitrógeno (C/N). La caracterización se realizó de acuerdo con los *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. (APHA, 2005).

2.1.2 Cosustrato

El glicerol residual (GR) utilizado en el desarrollo de este proyecto fue proporcionado por una empresa colombiana productora de biodiesel. Las muestras fueron recolectadas directamente de la planta, depositándolas en frascos de 100 mL con tapas de seguridad y transportadas con cavas al laboratorio. De acuerdo con la caracterización, el GR posee un pH de $6,414 \pm 0,124$, densidad de 1040 ± 1 g/L, humedad de $49,26 \pm 0,02$ %, ceniza de $2,85 \pm 0,25$ %.

2.1.3 Inóculo

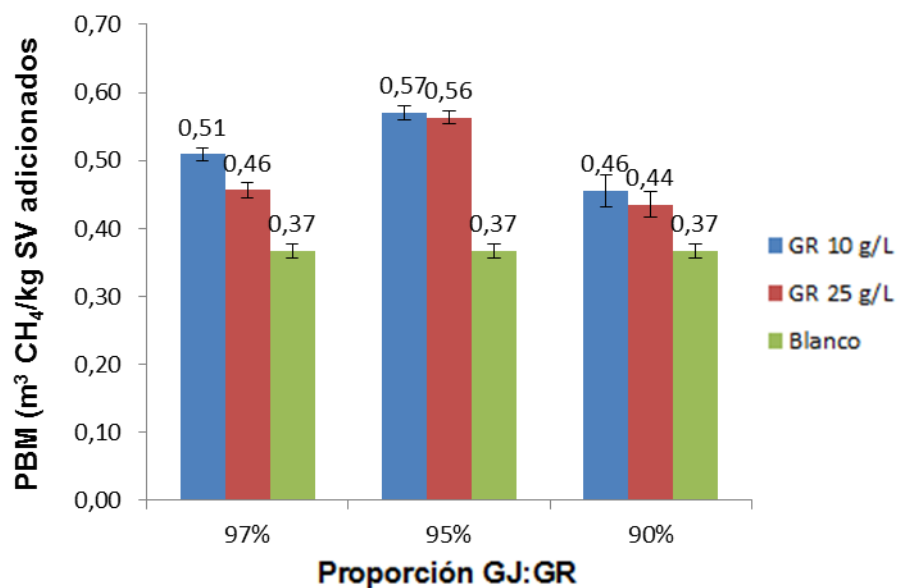
A través del análisis de AH y AME (Sierra, 2013), se determinó como inóculo en el proceso de digestión para la producción de biogás a partir de gallinaza de jaula, el estiércol bovino (EB). El EB fue recolectado en los establos del frigorífico Vijagual, Rionegro – Santander. El protocolo de toma de muestra de EB se presenta en el anexo B. (Sandoval, *et al.*, 2009). Luego del muestreo el EB fue sometido a caracterización y las variables evaluadas fueron: pH, densidad, humedad, concentración de sólidos totales (ST), concentración de sólidos volátiles (SV), alcalinidad (ALC), concentración de ácidos grasos volátiles (AGV). (Bullock, *et al.*, 1999). (Díaz, *et al.*, 2002).

2.2 EFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN SOBRE EL PBM.

Para determinar las condiciones de operación para la CoDA de GJ con GR, se cuantificó el PBM de diferentes proporciones de mezcla entre la GJ y GR. Las proporciones evaluadas fueron 100 (Blanco), 97, 95 y 90 %. Inicialmente la GJ fue mezclada con GR puro a las proporciones establecidas. No se presentaron incrementos en la producción de biogás, posiblemente por la elevada concentración de sodio del cosustrato que supera los 8 g/L, valor máximo de concentración tolerados por los microorganismos metanogénicos (Fang *et al.*, 2010). Por otra parte los microorganismos presentes en la fermentación del GR alcanzan a tolerar una concentración máxima de GR de 80 g/L (Gomez *et al.*, 2011). No obstante el cosustrato se diluyó con agua destilada hasta 100, 50, 25 y 10 g/L para ser mezclado en las proporciones establecidas.

Para las diluciones de 100 y 50 g/L no se registraron incrementos en la producción de biogás a diferencia de las diluciones de 25 y 10 g/L mostradas en la figura 3. El mayor PBM alcanzado fue de $0.57 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV add}$ para la mezcla 95% GJ y GR diluido hasta 10 g/L. La adición de GR en concentraciones superiores al 5% inhibe la producción de biogás por acidificación del proceso.

Figura 3. PBM de la CoDA de GJ a diferentes concentraciones de GR.



Fuente: Autor

2.3 INFLUENCIA DE LA RIS

La determinación de la mejor RIS constituye un parámetro de operación obligatorio. Una RIS de 0,5 presenta rendimientos bajos, por lo cual la DA de la GJ no se favorece. Sin embargo, para RIS 1 y RIS 1,5 se evidencia un mayor rendimiento y en términos de sólidos volátiles removidos y volumen de biogás producido, la RIS 1 se presenta como la mejor opción para DA de GJ (Sierra, 2013).

2.4 PROCESO DE CoDA DE GJ-GR

Los experimentos realizados se identificaron de dos maneras, ensayos tipo blanco, en los que se utilizó únicamente GJ como sustrato (DA) y ensayos de codigestión, en donde se usaba una proporción en peso de 95:5 entre GJ y GR. Estos ensayos se llevaron a cabo con una relación inóculo/sustrato (RIS) de 1. La experimentación se realizó por duplicado en biodigestores discontinuos de 50 mL

adicionándose las cantidades respectivas de sustrato (GJ), cosustrato (GR) e inóculo (EB) hasta un volumen de operación de 35 mL. EL espacio restante en los biodigestores se gaseó con nitrógeno a presión para desplazar por completo el oxígeno y garantizar condiciones de anaerobiosis en el sistema. Los biodigestores fueron tapados con corchos de butilo, se sellaron con agrafes de aluminio y se encubaron durante 30 días a 39°C de temperatura.

Para el estudio se trabajó teniendo en cuenta las siguientes condiciones de operación y variables a monitorear:

En la tabla 5 se presentan las condiciones de operación establecidas para la CoDA de GJ-GR.

Tabla 5. Condiciones de operación para la CoDA de GJ-GR.

Condición de operación	Unidad	Valor
Volumen Reactor	mL	50
Temperatura	°C	39
Volumen de Operación	mL	35
RIS	g SV/g SV	1
Tiempo de operación	días	30

Fuente: Autor.

En la tabla 6 se presentan las variables monitoreadas, la periodicidad de la medición y el método utilizado para cuantificar el rendimiento del proceso de CoDA de GJ-GR.

Tabla 6. Variables monitoreadas, periodicidad de la medición y método analítico.

VARIABLES A MONITOREAR	UNIDAD	PERIODICIDAD	MÉTODO
Concentración de ART	mg/L	Cada 5 días	Colorimétrico usando ácido 3-5 dinitrosalicílico (DNS) (Anexo C)
Concentración de AGV,AT	mg/L	Cada 5 días	Titulación (Anexo D)
Concentración de SV	g/L	Cada 5 días	Gravimétrico (Anexo E)
pH	---	Cada 5 días	Potenciométrico/NTC 5167
Volumen de biogás	mL	Diario	Desplazamiento alcalino (Anexo F)
Nitrógeno total amoniacal	mg/L	Cada 5 días	Potenciométrico

Fuente: Autor.

Los resultados experimentales fueron analizados con el *software StatGraphics plus 5.1*, StatPoint Inc. (Virginia, EE.UU). El test de *Fisher's* fue usado para verificar diferencias estadísticas entre los resultados.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO E INÓCULO

La tabla 7 presenta la caracterización de la GJ, de la mezcla GJ: GR y del inóculo.

Tabla 7. Caracterización de sustrato, cosustrato e inóculo.

Parámetro	GJ	Inóculo	95% GJ:GR
pH	7,4±0,03	7,8±0,02	7,3±0,05
Sólidos totales (g/L)	130,8±1,60	102,8±1,82	120,1±0,96
Sólidos volátiles (g/L)	80,5±1,22	70,2±1,94	72,4±2,10
Alcalinidad (mg CaCO ₃)	16467±691	6790±123	17300±435
Ácidos grasos volátiles (mg/L)	15613±305	2130±154	15800±398
Densidad (g/L)	1060±2,8	1001±4,9	1054±9,5

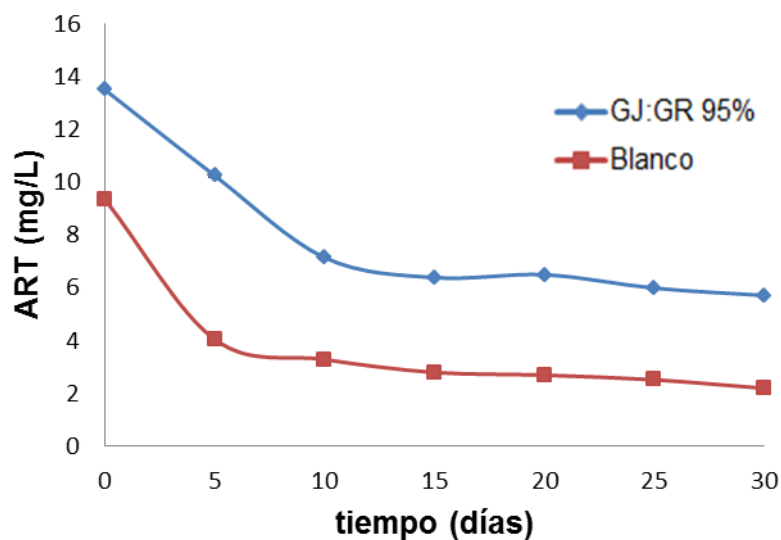
Fuente: Autor.

La adición de GR, aumenta la alcalinidad (AT) del sustrato o capacidad buffer del sistema. Debido a que el GR fue diluido con agua destilada, los sólidos totales (ST) de la mezcla se disminuyen, incrementando la humedad del medio lo cual garantiza un mejor desarrollo de las matrices microbianas (Kumar, 2008). Otras propiedades físicas, como el pH y la densidad de la mezcla también se ven reducidas por la adición de GR diluido al sistema, pero permaneciendo dentro de los rangos reportados como óptimos (Poh y Chong, 2009; Yadvika *et al.*, 2004).

3.2 EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES RESPUESTA DE LA CoDA DE GJ-GR

La figura 4 representa la cinética de consumo de ART durante 30 días de biodegradación anaerobia a 39°C de temperatura, para la DA (Blanco) y CoDA de la GJ.

Figura 4. Cinética de consumo de ART para la DA y CoDA de la GJ.



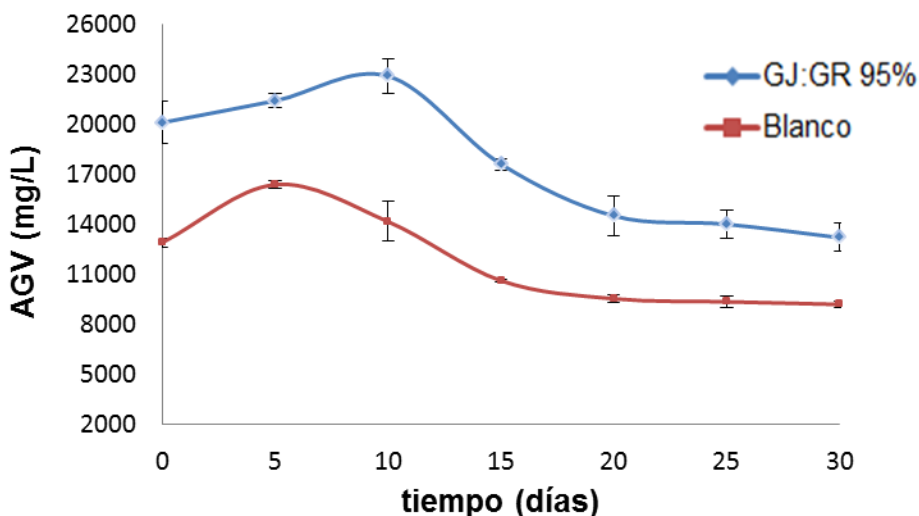
Fuente: Autor

Las gráficas presentan la tendencia decreciente que corrobora el consumo de ART con el tiempo, propia de la DA (Batstone, *et al.*, 2002).

Al comienzo de la operación la concentración de ART para el blanco y CoDA fue 9,52 y 13,50 y mg/L, respectivamente. La actividad de los microorganismos hidrolíticos se evidencia durante los primeros 10 días de digestión para el blanco, cuando la concentración de ART disminuye hasta 3,30 mg/L. En el caso de la CoDA, el consumo de ART se extiende hasta el día 15 cuando la concentración cae a 6,11 mg/L y se mantiene parcialmente estable hasta finalizar la experimentación. La CoDA se mantuvo un 10% por debajo del blanco en cuanto a consumo de ART, posiblemente debido a un proceso de adaptación de los microorganismos hidrolíticos ante la presencia de un nuevo residuo. La estabilización de la concentración en el tiempo es propia de la etapa hidrolítica (Mandigan, *et al.*, 2006).

En la figura 5, se evidencia el comportamiento de los ácidos grasos volátiles (AGV) en el tiempo, para la DA (Blanco) y CoDA de la GJ durante 30 días de biodegradación, a la temperatura de 39°C.

Figura 5. Variación de AGV para la DA y CoDA de la GJ.



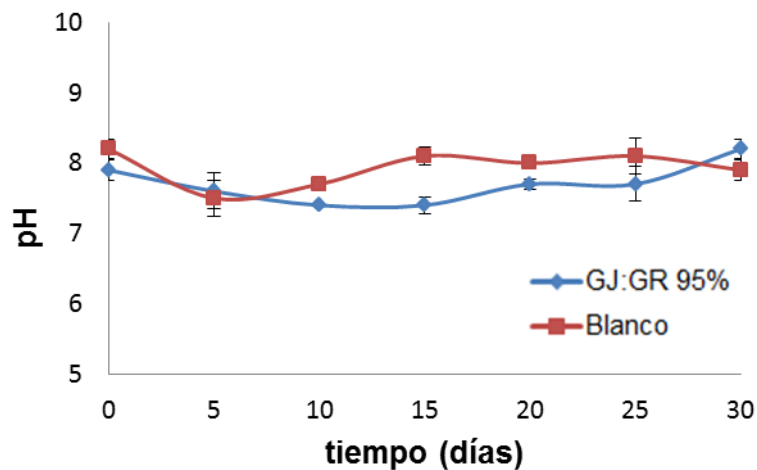
Fuente: Autor

En el arranque de la operación, la concentración de AGV fue de 12900 y 20100 mg/L para el control y CoDA, respectivamente. Durante los primeros 5 días de biodegradación la concentración de AGV incrementó hasta 16380 mg/L para el blanco, mientras que en la CoDA el pico máximo de concentración de AGV fue 22880 mg/L hacia el día 10. La elevada producción de AGV en la CoDA probablemente se debió a los productos metabólicos de la fermentación del GR: Acetato, Butirato, Lactato, Propionato, Butanodiol, Butanol y Etanol (Silva *et al.*, 2009; Gómez, *et al.*, 2011). La disminución en la concentración de AGV a partir del día 5 para el blanco y día 10 para CoDA evidencia actividad por parte de los consorcios microbianos encargados de reducir los AGV hasta biogás (Quintero *et al.*, 2012). Valores superiores de AGV para la CoDA de la gallinaza se reportaron

en Geleneis *et al.* (2007). El consumo de AGV para el blanco y la CoDA fue de 7180 y 9680 mg/L, respectivamente.

En la figura 6 se reporta la variación del pH durante los procesos DA (Blanco) y CoDA de la GJ durante 30 días de biodegradación.

Figura 6. Variación de pH para la DA y CoDA de la GJ.

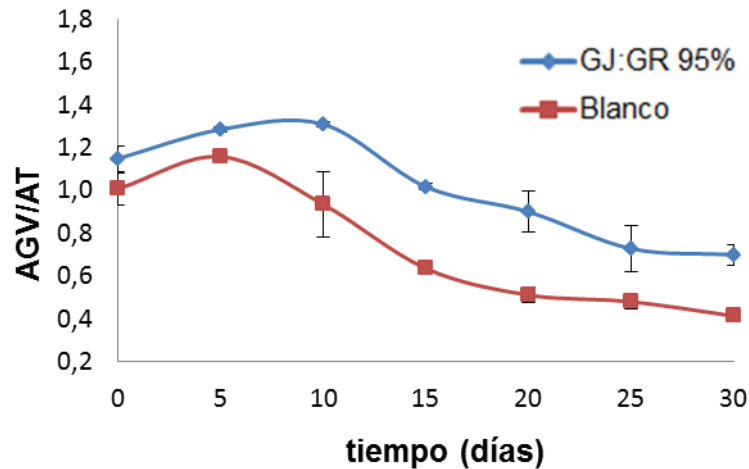


Fuente: Autor

Los cambios en el pH y la alcalinidad se encuentran asociados a variaciones en la concentración de AGV (Wan *et al.*, 2011). En la figura 6 se observa que para la digestión, el pH arranca en un valor de 8,20 luego desciende progresivamente conforme aumenta la producción de AGV durante los primeros 5 días de biodegradación anaerobia. A partir del día 5, el pH aumenta hasta estabilizarse en un valor aproximado de 8,0. Igualmente para la CoDA, el pH desciende desde 7,95 a 7,40 durante los primeros 10 días de digestión luego incrementa gradualmente hasta estabilizarse en un valor aproximado de 7,70. En la figura 6 se observa que el pH de la DA y la CoDA estuvo dentro del rango aceptado como adecuado para el crecimiento de las bacterias anaerobias (Raposo *et al.*, 2011).

La figura 7 representa el comportamiento de la relación AGV/AT de la DA y la CoDA de la GJ durante el tiempo de biodegradación a 39°C.

Figura 7. Variación de relación AGV/AT para la DA y CoDA de la GJ.



Fuente: Autor

La alcalinidad total (AT) del proceso para el blanco y la CoDA varió conforme al pH. Los valores de AT medido durante el arranque de la operación para el control y CoDA fueron 12800 y 17500 mg/L, respectivamente. Incrementos en el pH aumentaron los valores de AT. En términos generales, ambos sistemas presentaron buena capacidad buffer posiblemente por aumentos progresivos en la concentración de amonio durante los primeros días de digestión el cual actúa como una base fuerte en el medio (Lay *et al.*, 1998; Angelidaki *et al.*, 2003; Yenigun *et al.*, 2013).

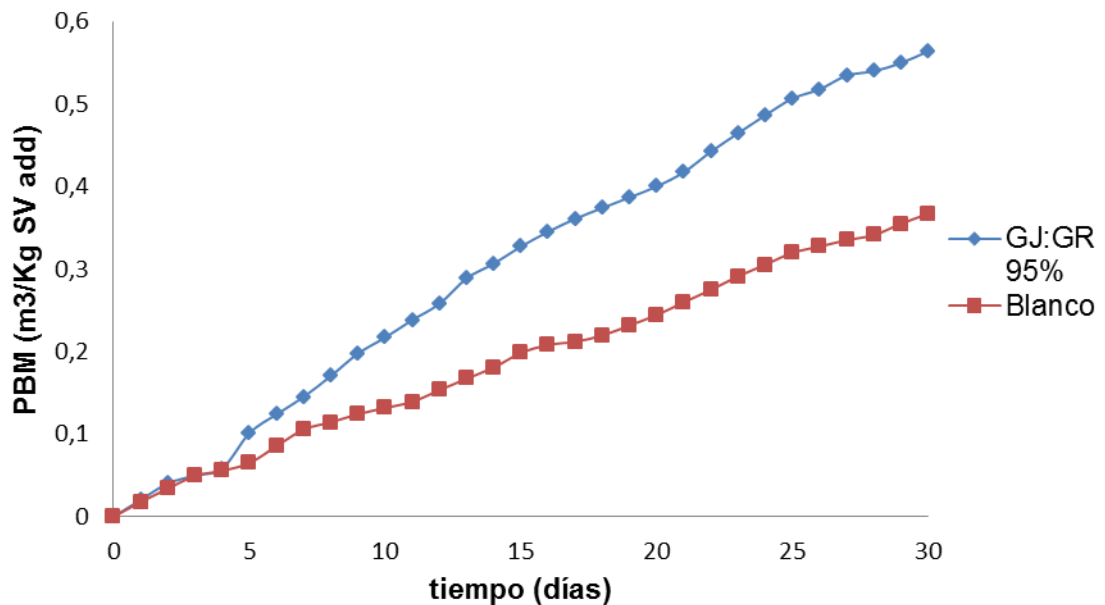
La relación AGV/AT es usada como un indicador de la estabilidad del proceso. Los procesos anaerobios alcanzan la estabilidad en rangos de AGV/AT entre 0,2 - 0,8.

Relaciones de AGV/AT superiores a 0,8 indican que no hay balance entre la población de microorganismos acidogénicos y metanogénicos (Riau *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2011). De acuerdo con la figura 7, la operación del blanco y CoDA arrancan con valores de AGV/AT fuera del rango sugerido para procesos anaerobios estables. Durante los primeros días de biodegradación el blanco y la CoDA operan bajo condiciones de acidificación por acumulación de AGV. A partir del día 10, El blanco y la CoDA experimentaron descensos en la relación AGV/AT hasta alcanzar valores de estabilidad de 0,5 y 0,7, respectivamente.

3.3 POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN DE LA DA Y CoDA DE LA GJ

En la figura 8, se presenta la producción específica de biogás en términos del potencial de biometanización (biogás/kg SV adicionados) para el control y CoDA durante los 30 días de biodegradación.

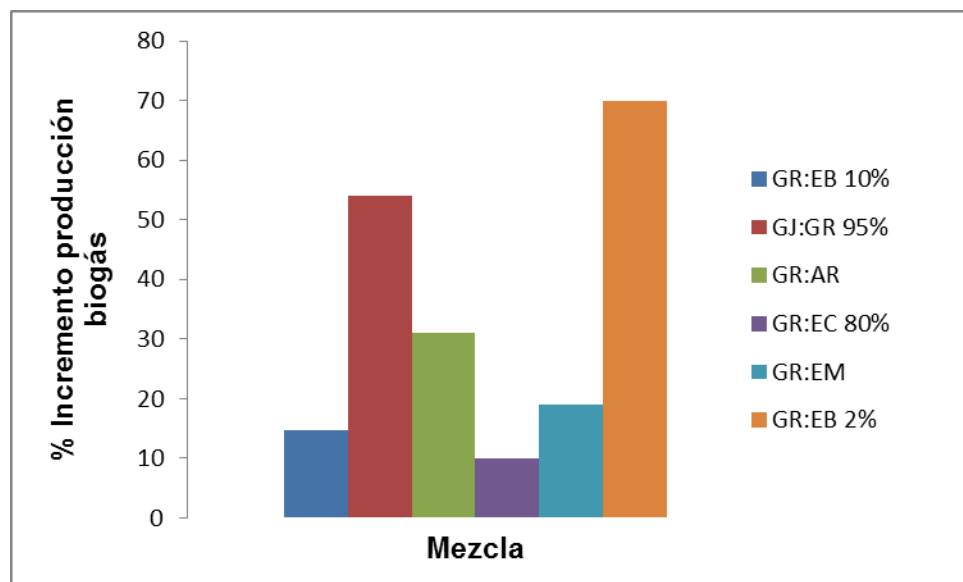
Figura 8. PBM para la DA y CoDA de la GJ.



Fuente: Autor

El potencial de biometanización (PBM) alcanzado por el control fue de 0,37 m³ biogás/kg SV adicionados para un porcentaje de biodegradación de materia orgánica del 52,38% mientras que para la CoDA el PBM fue 0,57 m³ biogás/kg SV adicionados con un porcentaje de biodegradación de materia orgánica de 63,11%. Estos valores evidencian que la adición de GR a la DA de la GJ mejora la producción de metano. En este estudio, el PBM de la GJ se logró incrementar en un 54% lo cual es un resultado satisfactorio al compararse con otros sistemas anaerobios que involucran GR (Figura 9).

Figura 9. Porcentaje de incremento de producción de biogás para diferentes sistemas anaerobios.



Fuente: Autor

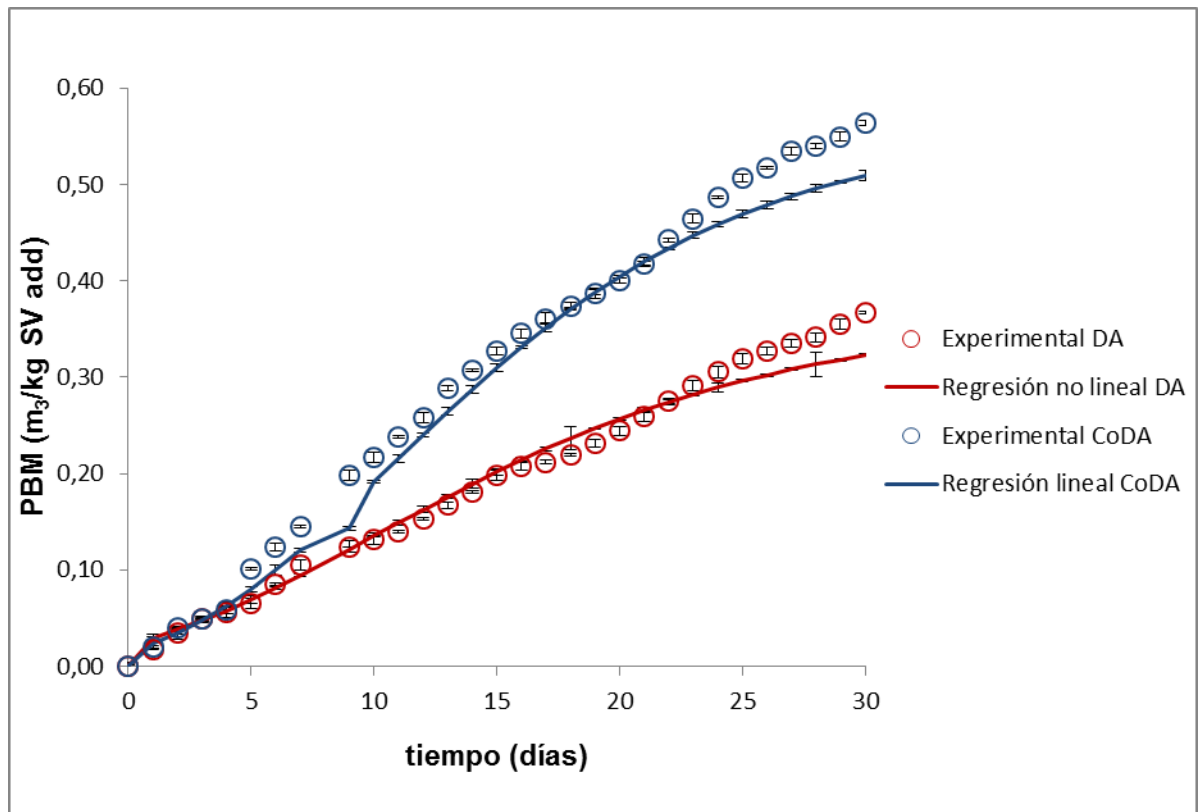
Dónde:

GR: Glicerol residual; EB: Estiércol bovino; EC: Estiércol de cerdo; AR: Agua residual; EM: Ensilado de maíz; GJ: Gallinaza de jaula.

3.4 PERFIL DE BIODEGRADABILIDAD PARA LA DA Y CoDA DE LA GJ.

Las figura 10 presenta el modelamiento de la producción de biogás mediante la ecuación de Gompertz durante 30 días de biodegradación para la Da y CoDA de GJ.

Figura 10. Aplicación del modelo Gompertz para representar la producción de biogás de la DA y CoDA de la GJ.



Fuente: Autor

La figura muestra que en ambas experimentaciones la producción de biogás incrementa gradualmente a medida que la materia orgánica es consumida por los microorganismos. Los valores de la regresión no lineal para la DA tienen una buena aproximación a los datos experimentales, lo cual queda evidenciado en un valor de R^2 de 0.98. En lo que concierne a CoDA el R^2 fue de 0.99, igualmente indicando una buena relación entre los valores de la regresión no lineal con los

valores experimentales. El máximo PBM alcanzado de acuerdo al modelo de Gompertz fue 0.32 y 0.51 m³/kg SV adicionados para el blanco y la CoDA, respectivamente.

La tabla 8 indica los parámetros de sintonía del modelo Gompertz.

Tabla 8. Parámetros de sintonía del modelo Gompertz.

Parámetros del Modelo				
Sustratos	λ (Días)	Rm (m ³ /kg SV Días)	Bo (m ³ /kg SV)	R ²
Control	0,254	0,014	0,32	0,98
GJ:GR 95%	1,215	0,025	0,51	0,99

Fuente: Autor

Los valores obtenidos del modelo de Gompertz evidencian que la adición de GR a la DA de la GJ mejora la producción neta de biogás. La producción diaria de biogás en CoDA siempre fue superior a la producción de biogás del blanco, la CoDA produjo 0,025 m³/kg SV día, mientras que el control produjo 0,014 m³/kg SV día. El porcentaje de incremento de la producción de biogás de la DA a la CoDA fue del 57%.

3.5 DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE NH₃ SOBRE EL PBM.

Durante los 30 días de biodegradación no se presentaron márgenes de incremento o descensos significativos de la concentración de NH₃ tanto para el blanco como para la CoDA. Sin embargo, la concentración de NH₃ en ambos experimentos fue diferente desde el arranque hasta el final de la operación. En el blanco, la concentración de NH₃ al inicio de la operación fue de 255,21 mg/L

mientras que para la CoDA fue 110,73 mg/L; Al finalizar la operación la concentración de NH_3 fue de 312,45 y 156,22 mg/L para el blanco y la CoDA, respectivamente.

El efecto del NH_3 sobre el PBM se describió por medio de la ecuación 4, reportada en el ADM1, permite establecer un valor de inhibición (I_{NH_3}) dentro de un rango de 0 a 1, en el cual 0, significa total inhibición en el sistema y 1 representa un sistema libre de inhibición. En este estudio, el valor calculado para el blanco de I_{NH_3} fue de 0,45 mientras que para CoDA I_{NH_3} fue 0,62. No obstante, la adición de GR diluido a 10 g/L con agua destilada permitió disminuir la concentración de NH_3 ratificando el efecto benéfico del GR sobre la DA de la GJ.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación muestra que es viable la producción de biogás a partir de la mezcla de gallinaza de jaula y glicerol residual. Lo cual podría resolver problemas de acumulación y contaminación debidos a los grandes volúmenes que se generan de este residuo durante los procesos de explotación avícola.

La adición de un suplemento de glicerol residual diluido 10 g/L y proporción GJ:GR del 95%, permitió incrementar el potencial de biometanización de la gallinaza de jaula en un 54%.

La adición de glicerol residual a la gallinaza de jaula para la formación de la codigestión anaerobia redujo la concentración de nitrógeno amoniacal liberado a lo largo del proceso biodegradativo, lo que favorece la producción de biogás.

5. RECOMENDACIÓN

Evaluar la codigestión de la gallinaza de jaula y glicerol residual en operación continua, a temperatura ambiente y con agitación, como alternativa industrial para la estabilización de la gallinaza de jaula.

BIBLIOGRAFÍA

- ABOUELENIEN F., FUJIWARA W., NAMBA Y., KOSSEVA M., NISHIO N., NAKASHIMADA Y., 2010. *Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle*. *Bioresource Technology*. 101, 6368 6373.
- AMON, TH., AMON, B., KRYVORUCHKO, V., BODIROZA, V., PÖTSCH, E., ZOLLITSCH, W., 2006. *Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: effects of dairy systems and glycerine supplementation*. *Int. Congress Ser.* 1293, 217 220.
- ANGELIDAKI, I., ELLEGAARD, L., AHRING, B.K., 1999. *A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas*. *Biotechnol. Bioeng.* 63, 363 372.
- ANGELIDAKI I., ELLEGAARD L. 2003. *Codigestion of Manure and Organic Wastes In Centralized Biogas Plants: status and future trends*. *Appl Biochem Biotechnol.* 109 (3), 95 105.
- ANTHONISEN, A.C., LOEHR, R.C., PRAKASAM, T.B.S., SRINATH, E.G., 1976. *Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid*. *J. Water Pollut. Control Fed.* 48, 835 849.
- ASTALS S., ARISO M., GALÍ A., MATA-ALVAREZ J. 2011. *Co-digestion of pig manure and glycerine: Experimental and modelling study*. *Journal of Environmental Management.* 92, 1091 1096.
- ASTALS S., NOLLA-ARDEVOL V., MATA-ALVAREZ J., 2012. *Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: Biogas and digestate*. *Bioresource Technology.* 110, 63–70.
- APHA, 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, Washington, ISBN 978-0-87553-047-5.

APPELS, L. BAEYENS, J. DEGREVE, J. DEWIL, R., 2008. *Principles and potential of the digestion of waste- activated sludge*. Progress in Energy and Combustion Science., 34. p. 755-781.

BARRERA P., SALAS X., CASTRO L., ORTIZ C., ESCALANTE H., 2009. *Estudio preliminar de la bioproducción de metano a partir de los residuos del proceso de beneficio del fique*. Revista ION. 22, 21 25.

BATSTONE D.J., KELLER J., SÉLLER J.P., 2006. *A review of ADM1 extensions, applications, and análisis: 2002e2005*. Water Science and Technology. 54 (4), 1 10.

BUJOCZEK G., OLESZKIEWICZ J., SPARLING R., CENKOWSKI S.J., 2000. *High Solid Anaerobic Digestion of Chicken Manure*. Agric. Engng Res. 76, 51 60.

CASTILLO, E. VERGARA, M. CRISTANCHO, D. ARENAS, L. MARTINEZ, A. HERNANDEZ, M. LUNA, H. CASTILLO, J. SANDOVAL, C., 2007. *Digestión anaerobia una alternativa para el tratamiento de residuos sólidos urbanos*. Universidad Industrial de Santander, Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales. Bucaramanga. p. 13-21.

CASTRO L., GUZMAN C., ESCALANTE H., 2010. *Influence of Particle Size and Temperature on Methane Production From Fique's Bagasse*. Revista iteckne. 10(10), 1-6.

CASTRO L. *Proceso integral para la digestión anaerobia del fique*, 2011. Universidad Industrial de Santander. Tesis doctoral. Escuela de ingeniería Química. Bucaramanga, Colombia.

CAFFAZ S., BETTAZZI E., SCAGLIONE D., LUBELLO C., 2008. *An integrated approach in a municipal WWTP: Anaerobic codigestion of sludge with organic waste and nutrient removal from supernatant*. Water Sci Technol, 58, 669–676.

CHEN Y., CHENG J.J, CREAMER K., 2009. *Inhibition of anaerobic digestion process: A review*. Bioresource Technology. 99, 4044 4064.

CHEN X., ROMANO R.T., ZHANG R., KIM H.S., 2008. *Anaerobic co-digestion of dairy manure and glycerine*. Am. Soc. Agric. and Biol. Eng. Annu. Int. Meeting 8, 5053 5070.

DELGADO H.A, 2011. *Farm Animal Welfare in Colombia: A country situation report*. Internet.

<http://portal.fedegan.org.co:7782/portal/page?_pageid=93,136296&_dad=portal&_schema=PORTAL>

DONOSO-BRAVO, A., PEREZ-ELVIRA, S.I., FDZ-POLANCO, F., 2010. *Application of simplified models for anaerobic biodegradability tests-evaluation of pre-treatment processes*. Chemical Engineering Journal 160, 607 614.

ELBESHISHY E., 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 energética, UPMe, Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales, IDEAM, Departamento Administrativo de ciencia, tecnología e innovación, Colciencias y Universidad Industrial de Santander, UIS.

FOUNTOULAKIS M.S., PETOUSHI I., MANIOS T., 2010. *Co-digestion of sewage sludge with glycerol to boost biogas production*. Waste Manage. 30, 1849 1853.

FOUNTOULAKIS M.S., MANIOS T., 2009. *Enhanced methane and hydrogen production from municipal solid waste and agro-industrial by-products co-digested with crude glycerol*. Bioresour. Technol. 100, 3043–3047.

GALÍ, A., BENABDALLAH, T., ASTALS, S., MATA-ALVAREZ, J., 2009. *Modified version of ADM1 model for agro-waste application*. *Bioresour. Technol.* 100 (11), 2783-2790.

GELEGENISA J., GEORGAKAKIS D., ANGELIDAKI I., MAVRISA V., 2007. *Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure*. *Renewable Energy*. 32, 2147-2160.

GÓMEZ J.R., CANCINO J.F., 2011. *Caracterización de los productos obtenidos a partir de la fermentación de glicerol crudo con microorganismos nativos*. Universidad industrial de Santander. Escuela de Química. Bucaramanga, Colombia.

GONZALEZ.C, GARCIA.P., 2009. *Impact of substrate to inoculum ratio in anaerobic digestion of swine slurry*. *Biomass and bioenergy* 3. p. 1065–1069.

GUNASEELAN, V.N., 2004. *Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks*. *Biomass and Bioenergy* 26, 389–399.

KUMAR S. *Anaerobic Biotechnology for bioenergy production. Principles and Applications*. Editorial Blackwell Publishing, Estados Unidos. 2008, 29-63.

MA J., VAN WAMBEKE M., CARBALLA M., VERSTRAETE W., 2008. *Improvement of the anaerobic treatment of potato processing wastewater in a UASB reactor by codigestion with glycerol*. *Biotechnol. Lett.* 30, 861-867.

MANDIGAN M., MARTINKO J., PARKER J., BROCK., 2006. *Biología de los microorganismos*. Pearson Prentice Hall. 151-168.

MATA-ALVAREZ J., DOSTA J., MACÉ S., ASTALS S., 2010. *Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling*. *Critical Reviews in Biotechnology*, 1–13.

MLADENOVSKA, Z., S. DABROWSKI, AND B.K. AHRING. 2003. *Anaerobic digestion of manure and mixture of manure with lipids: biogas reactor performance and microbial community analysis*. *Water Science and Technology* 48:271-278.

MILLER G. 1959. *Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar*. *Analytical Chemistry*. 31 (3): 426-428.

MORENO, G. BUITRÓN., 2002. *Influencia del Origen del Inóculo en la Prueba de Biodegradabilidad Anaerobia*. XIII Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, Guanajuato, México. 21-28.

LAY J.J., LI Y.Y., NOIKE T. 1998. *The influence of pH and ammonia concentration on the methane production in high-solids digestion*. *Water Environment Research*. 70, 1075–82.

LI C., CHAMPAGNE P., ANDERSON B.C., 2011. *Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions*. *Bioresource Technology*. 102, 9471 9480.

PANDEY, P. NDEGWA, P. SOUPIR, M. ALLDREDGE, R. PITTS, M., 2011. *Efficacies of inocula on the startup of anaerobic reactors treating dairy manure under stirred and unstirred conditions*. *Biomass and bioenergy* 35. p. 2705- 2720.

POH.P, CHONG. M., 2009. *Development of anaerobic digestion methods for palm oil*. *Bioresource Technology*.,100. p. 1–9.

QUINTERO M., CASTRO L., ORTIZ C., GUZMÁN C., ESCALANTE H., 2012. *Enhancement of starting up anaerobic digestion of lignocellulosic substrate: fique's bagasse as an example*. *Bioresource Technology*. 108, 8 13.

QUINTERO M, RONDON Y., 2012. *Estudio preliminar de la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia del mucílago de café utilizando lodo estiércol de cerdo como incóculo*. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería química, Bucaramanga, Colombia.

RAPOSO F., DE LA RUBIA M.A., FERNÁNDEZ-CEGRÍ V., BORJA R., 2011. *Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16, 861 877.

RIAU, V., DE LA RUBIA, M.A., PEREZ, M., 2010. *Temperature-phased anaerobic digestion (TPAD) to obtain class Abiosolids: a semi-continuous study*. *Bioresource Technol.* 101 (8), 2706 2712.

ROBRA S., SERPADA R., DE OLIVEIRA A.M., ALMEIDA J.A., SANTOS J.V., 2010. *Generation of biogas using crude glycerin from biodiesel production as a supplement to cattle slurry*. *Biomass and bioenergy*. 34, 1330 1335.

ROSALES L., BERMÚDEZ J., MORONTA R, MORALES E, 2007. *Gallinaza: Un Residual Avícola como fuente alternativa de nutrientes para producción de biomasa microalgal*. *Revista Colombiana de Biotecnología*. 9 (1), 41 48.

SHWEDEL K, 2013. *La avicultura latinoamericana en 2012 y 2013: años de volatilidad, crecimiento y consolidación*. *Revista Industria Avícola*. 60 (1), 8 12.

SALMINEN E., RINTALA J., 2002. *Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review*. *Bioresource Technology*. 83, 13 26.

- SANTIBÁÑEZ C., VARNERO M.T., BUSTAMANTE M., 2011. *Residual glycerol from biodiesel manufacturing, waste or potential source of bioenergy: a review*. Chilean journal of agricultural research. 71(3), 469-476.
- SILES J.A., MARTÍN M.A., CHICA A.F., MARTÍN A., 2010. *Anaerobic co-digestion of glycerol and wastewater derived from biodiesel manufacturing*. Bioresource Technology 101, 6315-6321.
- SILVA G., MARCK M., CONTEIRO J., 2009. *Glycerol: A promising and abundant carbon source for industrial microbiology*. Biotechnology Advances. 27, 30-39.
- SIERRA A., 2013. *Obtención de biogás a partir de gallinaza producida en la granja bellavista-horizontes a servicio de incubadora Santander S.A.* Universidad Industrial de Santander. Escuela de Química, Bucaramanga, Colombia.
- SULAIMAN A., ZAKARIA M.R., HASSAN M.A., SHIRA Y., BUSUZ., 2009. *Co-digestion of palm oil mill effluent and refined glycerin wash water for chemical oxygen demand removal and methane production*. American Journal of Environmental Sciences 5:639-646.
- WANG, Q. KUNINOBU, M. OGAWA, H. KATO, Y., 1999. *Degradation of volatile fatty acids in highly efficient anaerobic digestion*. Biomass & Bioenergy, 16. p. 407-416.
- WARD A.J., HOBBS P.J., HOLLIMAN P.J., JONES D.L., 2008. *Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources*. Bioresource Technology. 99, 7928-7940.
- XIE S. 2012. *Methane production from anaerobic co-digestion of the separated solid fraction of pig manure with dried grass silage*. p 289.
- YADVIKA. SANTOSH. SREEKRISHNAN, T. SANGEETA, K. VINEET, R., 2004. *Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques -a review*. Bioresource Technology 95. p.1-10.

YENIGUN O., DEMIREL B. 2013. *Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review*. Process Biochemistry. 48: 901- 911.

ZENG S., YUAN X., SHIA X., QIU Y. 2010. *Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and orthophosphate release from anaerobic digestion of Microcystis spp.* Journal of Hazardous Materials, Vol 178, pp 89–93.

ANEXOS

Anexo A. Protocolo de toma de muestra de gallinaza de jaula (GJ)

MATERIALES

- Nevera.
- Pimpinas.
- Espátula.
- Pala.
- Tiras reactivas de pH.
- Guantes de látex.
- Tapa bocas.
- Bolsa plástica con cierre.
- Cinta de enmascarar.
- Marcadores permanentes.

PROCEDIMIENTO

1. Dirigirse a la planta de abonos ubicada en las mismas instalaciones de la granja y escoger la pila de gallinaza que provenga de galpones de levante y producción en los cuales aún no se haya incorporado el aserrín utilizado para su posterior compostaje.
2. Realizar un pequeño hueco con ayuda de una pala en el centro de la pila de manera que se tomen muestras de la parte más profunda de la misma.
3. Con la espátula, tomar las muestras de gallinaza hasta llenar la totalidad de las bolsas, sin dejar espacios de aire, medir pH y cerrar inmediatamente.
4. Rotular las bolsas con las muestras con nombre del lugar, día y fecha de la toma de muestra y trasladarlas hasta el laboratorio en las cabas.
5. Una vez se las muestras llegan al laboratorio, se envasan en las pimpinas donde se conservan totalmente selladas para que inicie el proceso de fermentación hasta ser utilizadas.

Anexo B. Protocolo de toma de muestra de inóculo

MATERIALES

- Pimpinas.
- Pala.
- Guantes de látex.
- Guantes de nitrilo.
- Cintas.

PROCEDIMIENTO

1. Seleccionar el estiércol (lodo líquido) de los bovinos.
2. Ingresar al estiercolero y con ayuda de una pala cavar hasta tomar el estiércol del centro de la pila.
3. Llenar la totalidad de los recipientes con la muestra, cerrar inmediatamente y reforzar con cinta.

Anexo C. Determinación de la Concentración de Azúcares Reductores Totales (ART)

El método DNS o del ácido 3-5 dinitrosalicílico es un método colorimétrico, desarrollado para la cuantificación de azúcares reductores.

REACTIVO DNS

- Mezclar y disolver en 250 ml de agua destilada 8 g de NaOH y 150 g de tartrato sodio potasio.
- Se agregan 5 g de ácido dinitrosalicílico.
- Aforar a 500 mL con agua destilada.
- Almacenar a temperatura ambiente y proteger de la luz.

PROCEDIMIENTO

- Agregar 4 mL de reactivo a 2mL de muestra y 2 mL de agua destilada usando tubos tapa rosca.
- Dejar en baño con agua en ebullición durante 5 minutos.
- Detener la reacción en un baño de hielo.
- Agregar 4 mL de agua destilada, y dejar reposando durante 15 minutos.

Leer densidad óptica a 540 nm contra un blanco obtenido en el procedimiento anterior pero agregando agua destilada en lugar de muestra.

CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA ESTANDAR DE GLUCOSA

Se preparan las muestras de glucosa con concentraciones conocidas, se aplica el método DNS y se lee su absorbencia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 540 nm.

Con los datos obtenidos se traza un gráfico lineal de la concentración de glucosa (azúcar reductor) como una función de absorción, y así se determina la ecuación que relaciona las dos cantidades.

Anexo D. Determinación de la concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGV), Alcalinidad Total (AT)

La determinación de los ácidos grasos volátiles se realizó por medio de una titulación, es un método a través del cual se determina el bicarbonato y los ácidos grasos volátiles en soluciones acuosas. La muestra es centrifugada o filtrada y se lleva a un pH de 3,0 con ácido clorhídrico (HCL) 0,1N; a este pH. El bicarbonato será convertido en dióxido de carbono y los ácidos grasos volátiles estarán presentes en solución en la forma no ionizada. Después la muestra es sometida a calentamiento hasta ebullición con un sistema de condensación para remover el CO₂, la solución restante se titula con hidróxido de sodio (NaOH) 0,1N hasta alcanzar un pH de 6,5. Los ácidos grasos volátiles (y quizás otros ácidos) serán convertidos ahora a su forma disociada.

Los equivalentes de bicarbonato y AGV se pueden calcular a partir de los volúmenes de ácido y base utilizados en la titulación (Rojas 1988).

Las relaciones utilizadas son las siguientes.

$$\text{Alcalinidad} = (B * N_{\text{HCl}} * 50.000)/V$$

En donde:

B= volumen de HCl usado para disminuir el pH en mL.

V= volumen de muestra tomada para el análisis en mL.

N_{HCl} = concentración de ácido clorhídrico (Normalidad).

Las unidades de alcalinidad son (mg de CaCO_3 /litro).

$$\text{ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES} = D * N_{\text{NaOH}} * 60.000/V$$

En donde

D= volumen de NaOH en mL requerido para elevar el pH después de haber usado HCL.

V= volumen de muestra tomada para el análisis en mL.

N_{NaOH} =concentración de hidróxido de sodio (normalidad).

Las unidades de Ácidos Grasos Volátiles son (mg de Ac. Acético/Litro).

Para la preparación de HCL y NaOH se utilizan los siguientes reactivos.

- Biftalato de potasio
- NaOH
- HCL
- Fenolftaleína.

Anexo E. Determinación de sólidos totales fijos y volátiles en muestras sólidas y semisólidas

Este método se aplica a la determinación de sólidos totales y fracciones volátiles en muestras sólidas y semisólidas como lodos aislados en procesos de tratamientos de aguas limpias y residuales entre otros.

Instrumentos:

- Placas de evaporación
- Horno de mufla para operar a $550\pm 50^{\circ}\text{C}$
- Desecador provisto de un descante que contiene un indicador colorimétrico de concentración de humedad
- Horno de secado operaciones $103-105^{\circ}\text{C}$
- Balanza de análisis

PROCEDIMIENTO

Sólidos volátiles

Incinérese una placa de evaporación limpia en un horno de mufla a $550\pm 50^{\circ}\text{C}$ durante una hora.

Análisis de la muestra

Transfiérase la muestra hasta un horno frío y caliéntese hasta $550\pm 50^{\circ}\text{C}$ e incinérese durante una hora, enfríese en desecador para equilibrar la temperatura y pése.

Sólidos totales

Caliéntese la placa en un horno a $103-105^{\circ}\text{C}$ durante una hora.

Enfríese en el desecador, pése y consérvase en el desecador hasta que haya de usarse.

Análisis de la muestra

Muestra líquida: agítese para homogeneizarla, a continuación colóquese de 20 a 50 g en una placa de evaporación y pésese, evapórese hasta desecación al baño maría, séquese a 103-105°C, durante una hora enfríese para equilibrar la temperatura en un desecador individual con desecante activo y pésese.

Cálculos:

$$\% \text{ de sólidos totales} = \frac{(A - B) \times 100}{C - B}$$

$$\% \text{ sólidos volátiles} = \frac{(A - D) \times 100}{A - B}$$

A= peso del residuo seco + placa, mg

B= peso de la placa

C= peso de la muestra húmeda + placa, mg

D= peso del residuo + placa después de ignición, mg

Anexo F. Método de desplazamiento Alcalino

(Método de medición volumen de metano)

MATERIALES

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

PROCEDIMIENTO

Cada reactor se conecta con la botella de desplazamiento alcalino por medio de una red de mangueras de plásticos y agujas. El biogás producido en el reactor se burbujea en la solución alcalina con fenolftaleína como indicador y pH mayor de 12, en la cual el CO_2 es absorbido y el volumen de gas metano desplaza un volumen igual de la solución alcalina. El volumen de la solución desplazada fuera de la botella en el recipiente colector es equivalente al volumen de metano generado en el sistema.

Método desplazamiento alcalino

