

**SOBRANTES ALIMENTICIOS DE RESTAURANTE:CO-SUSTRATO PARA EL
MEJORAMIENTO DEL POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN DE RESIDUOS
AGROINDUSTRIALES**

**DIANA PEÑALOZA GARCÍA
JENNIFER KATHERINE RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ**

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

2015

**SOBRANTES ALIMENTICIOS DE RESTAURANTE :CO-SUSTRATO PARA EL
MEJORAMIENTO DEL POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN DE RESIDUOS
AGROINDUSTRIALES**

**DIANA PEÑALOZA GARCÍA
JENNIFER KATHERINE RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ**

**Trabajo de investigación presentado como requisito para optar por el título
de Ingeniero Químico**

DIRECTORES

HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ

Ing. Químico, M. Sc, PhD

LILIANA DEL PILAR CASTRO MOLANO

Ing. Química PhD

LUIS ENRIQUE LAMBIS BENÍTEZ

Ing. Químico

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

2015

DEDICATORIA

Detrás de cada sueño hay una inspiración, de cada meta cumplida un reto propuesto, gracias Dios por este reto que hoy es una meta cumplida

Gracias mamita y papito por estar siempre conmigo apoyándome y haciéndome mejor persona a ti abuelita que con tus consejos y oraciones siempre estabas ahí, realmente esto es posible por el inmenso apoyo que encontré en ustedes.

Katherine Rodríguez tu más que mi compañera de tesis, mi amiga mi apoyo constante una persona que se entrega de corazón a sus cosas a sus amigos, a ti Yisseth Sanchez que te convertiste en esa amiga constante y luchadora que me apoyó para superar momentos difíciles.

Gracias a todas las personas que a su paso dejaron más que una huella en mi vida, profesionales y amigos leales como tu Giovanni Monsalve, Gracias por que diste inicio a este sueño y creíste siempre en mí, motivándome a cumplir mis retos y mis metas.

Familiares y amigos que me apoyaron en algún momento convirtiendo momentos difíciles o tristes en una razón para seguir adelante.

A todos y cada uno de ustedes dedico este primer logro que nuestro padre Dios ha permitido se dé, así mismo Dios derrame bendiciones sobre ustedes.

Diana Peñaloza

DEDICATORIA

Este nuevo logro en mi vida es dedicado a Dios que siempre me ha brindado el temple la fuerza y la esperanza para no desistir de mis metas pese a las dificultades presentes en el camino, por haberme dado la dicha de pertenecer a una familia que a lo largo de mi vida me ha llenado de amor.

A mis padres por ser incondicionales, ejemplares, gracias a su apoyo, enseñanzas y consejos han hecho de mí la persona que soy hoy. A ustedes dedico este logro tan importante en mi vida y todos los que están por venir.

A mi alma gemela el mejor regalo que Dios me dio, mi confidente, compañera de viaje por esta vida y consejera mi hermanita gracias por tantos momentos compartidos juntas.

A Diana Peñaloza que más que compañera se convirtió en una amiga que me enseñó el verdadero significado de la amistad y la lealtad; sin su participación en este trabajo este logro no hubiese sido posible, mil gracias.

Katherine R.

AGRADECIMIENTOS

A la universidad industrial de Santander por abrirnos un día las puertas y hoy permitarnos salir como ingenieros. A la escuela de ingeniería química a nuestros docentes, a los cuales admiramos por sus grandes conocimientos y además su gran calidez humana.

Al grupo de biotecnología donde cada una de las personas que allí se encuentran y las que ya se han ido se convirtieron en más que compañeros de trabajo en amigos, profesionales de valor de ética. Luis Lambis Benítez y José Daniel Marín Batista ingenieros que nos enorgullece haber conocido y que formaron parte importante en el desarrollo de nuestro trabajo.

A nuestros directores de proyecto Ing. Química PhD Liliana Castro Molano, Ing. Químico M. Sc, PhD Humberto Escalante Hernández quienes confiaron en nosotras y nos apoyaron siempre.

A los señores Guillermo, Wilson y don Eduardo que siempre nos brindaron su apoyo su conocimientos y nos prestaron los materiales e implementos de laboratorio necesarios para nuestro trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. GENERALIDADES	21
1.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA	21
1.2 CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA	23
1.3 VARIABLES DE DESEMPEÑO Y ESTABILIDAD DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA	24
2. METODOLOGÍA	27
2.1 RECOLECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS.....	27
2.1.1 Sustratos	27
2.1.2 Co-sustrato.....	28
2.1.3 Inóculo.....	28
2.2 ENSAYOS DE BIOMETANIZACIÓN PARA LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES CON SAR	29
2.3 VARIABLES DE RESPUESTA Y ESTABILIDAD.....	31
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	33

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUSTRATOS, CO-SUSTRATO E INÓCULO.....	33
3.2 ENSAYOS DE POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN.....	34
3.2.1 Mezclas para Co-DA de gallinaza de jaula con sobrantes alimenticios de restaurante	34
3.2.2 Mezclas para Co-DA de residuos agrícolas con sobrantes alimenticios de restaurante	36
3.2.3 Mezclas para Co-DA de estiércol bovino fresco con sobrantes alimenticios de restaurante	37
3.3 VARIABLES DE RESPUESTA Y ESTABILIDAD.....	39
4. POTENCIAL ENERGÉTICO Y ECONÓMICO	43
5. CONCLUSIONES	47
6 .RECOMENDACIONES.....	48
BIBLIOGRAFÍA	49
ANEXOS	56

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Etapas de la DA.....	22
Figura 2. Etapas de la metodología	27
Figura 3. Volumen Acumulado de metano Co-digestión gallinaza de jaula con sobranes alimenticios de restaurante.....	34
Figura 4. Rendimiento de la Co-digestión gallinaza de jaula con sobranes alimenticios de restaurantes	35
Figura 5. Volumen acumulado de metano Co-digestión residuos agrícolas con sobranes alimenticios de restaurante.....	36
Figura 6. Rendimiento de la Co-digestión residuos agrícolas con sobranes alimenticios de restaurantes	37
Figura 7. Volumen acumulado de metano Co-digestión de estiércol bovino fresco con sobranes alimenticios de restaurante	38
Figura 8. Rendimiento de la Co-digestión estiércol bovino fresco con sobranes alimenticios de restaurante	39
Figura 9. Potencial Económico de Residuos Agroindustriales	45

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Producción de metano a partir de diversos residuos	24
Tabla 2. Condiciones de operación para Co-DA de los residuos agroindustriales	29
Tabla 3. Matriz estructura de experimento Co-DA de los residuos agroindustriales	31
Tabla 4. Variables de Respuesta de la DA.	32
Tabla 5. Caracterización fisicoquímica.....	33
Tabla 6. Variables medidas en el arranque y al final del proceso.....	40
Tabla 7. Potencial Energético y Económico de DA de residuos agroindustriales ..	43
Tabla 8. Potencial Energético y Económico de Co-DA de residuos agroindustriales	44
Tabla 9. Potencial Económico aprovechable en Colombia.....	46

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Recolección de la muestra de gallinaza de jaula.	56
Anexo B .Protocolo de toma de muestra de Residuos Agrícolas y Sobrantes Alimenticios de Restaurante	57
Anexo C. Protocolo de dilución de sólidos de los SAR	58
Anexo D. Caracterización fisicoquímica SAR.....	60
Anexo E. Caracterización fisicoquímica GJ	61
Anexo F. Caracterización fisicoquímica RA	62
Anexo G. Caracterización fisicoquímica EF	63
Anexo H. Método de desplazamiento alcalino	64
Anexo I. Determinación de la concentración de azúcares reductores totales (ART).....	66
Anexo J. Determinación de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), y alcalinidad total (AT)	68
Anexo K. Determinación de sólidos totales fijos y volátiles en muestras sólidas y semisólidas	70

NOMENCLATURA

AGV	Ácidos grasos volátiles
ART	Azúcares Reductores Totales
AT	Alcalinidad Total
Co-DA	Co-digestión anaerobia
DA	Digestión anaerobia
DNS	Dinitrosalicílico
EF	Estiércol Bovino Fresco
GJ	Gallinaza de jaula
LA	Lodo activado
PBM	Potencial de Biometanización
RA	Residuo Agrícola
RIS	Relación Inóculo - Sustrato
SAR	Sobrantes alimenticios de restaurante
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
VNTP	Volumen a condiciones normales
YPS	Rendimiento de producción de biogás

RESUMEN

TÍTULO: SOBRESANTES ALIMENTICIOS DE RESTAURANTE: CO-SUSTRATO PARA EL MEJORAMIENTO DEL POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES*.

AUTORES: Diana Peñaloza García
Jennifer Katherine Rodríguez Rodríguez.**

PALABRAS CLAVE: Co-digestión anaerobia, residuos agroindustriales, sobrantes alimenticios de restaurante, rendimiento de metano (YPS), potencial de biometanización (PBM).

CONTENIDO: El propósito de este estudio fue evaluar los sobrantes alimenticios de restaurante como co-sustrato para aumentar el potencial de biometanización de residuos agroindustriales: gallinaza de jaula (GJ), residuos agrícolas (RA) y estiércol bovino fresco (EF); los ensayos de biodegradación anaerobia se llevaron a cabo en múltiples biorreactores por lotes a temperatura mesófila de 39 °C. Para cada uno de los montajes experimentales se eligieron 5 mezclas (1:0, 1:3, 1:1, 3:1, 0:1). Las variables de respuesta medidas fueron el rendimiento de producción de metano, ácidos grasos volátiles, azúcares reductores totales, sólidos totales, sólidos volátiles, alcalinidad total. Los resultados obtenidos demuestran que los sobrantes alimenticios de restaurante son un co-sustrato idóneo para aumentar el potencial de biometanización co-digestando en una relación de mezcla adecuada en la co-digestión. Las mezclas con las que se logró mejorar el rendimiento de metano de los residuos agroindustriales fueron: GJ: SAR 1:1, RA: SAR 1:3 y EF: SAR 1:3; en donde se obtuvo un rendimiento de 0,74 m³ de CH₄ /kg SV, 0,45 m³ de CH₄ /kg SV y 0,53 m³ de CH₄ /kg SV respectivamente. Con los resultados obtenidos se realizó un estimado del potencial económico y energético de la co-digestión en donde se demostraron aumentos del 12 % 60 % y 30% en términos de kWh y \$COP en comparación con la mono digestión.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Humberto Escalante Hernández, Liliana del Pilar Castro Molano Luis Enrique Lambis Benítez

ABSTRACT

TITLE: SURPLUS FOOD RESTAURANT: CO-SUBSTRATE FOR IMPROVEMENT BIOMETHANATION POTENTIAL OF AGRO-INDUSTRIAL WASTE^{*}.

AUTHORS: Diana Peñaloza García
Jennifer Katherine Rodríguez Rodríguez.^{**}

KEY WORDS: Co-anaerobic digestion, surplus food restaurant, agro-industrial waste, methane yield (YPS), potential biomethanization (PBM)

CONTENT: the purpose of this study was evaluate the surplus food restaurant as co-substrate for improvement biomethanation potential of agro-industrial waste : manure cage (GJ), agricultural waste (RA) and fresh cattle manure (EF) .Anaerobic biodegradation tests were conducted in multiple batch bioreactors in a mesophilic temperature to 39° C. For each experimental set-ups, five mixing ratios were chosen (0:1, 3:1, 1:1, 3:1, 0:1). The response variables measured were: yield methane production, volatile fatty acids, total reducing sugars, total solids, volatile solids and total alkalinity. The results shown that surplus food restaurant are an ideal co-substrate for increase the biogas production of agroindustrial waste if it are mixed in a suitable ratio in the co-anaerobic digestion. Suitable mixtures with which it was possible to improve the performance of methane from agro-industrial waste were: 0,74 m³ de CH₄ /kg SV , 0,45 m³ de CH₄ /kg SV y 0,53 m³ de CH₄ /kg SV respectively. With results was calculated an estimate of economic and energy potential of the co-digestion where was shown increases of 12% to 60% and 30% in terms of kWh and \$ COP compared to mono-digestion. With results was calculated an estimate of economic and energy potential of the co-digestion where was shown increases of 12% to 60% and 30% in terms of kWh and \$ COP compared to mono-digestion.

^{*} Degree Work. Research Mode.

^{**} Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: Dr. Humberto Escalante, Liliana del Pilar Castro Molano, Luis Enrique Lambis Benítez.

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país de tradición agropecuaria. El sector avícola y ganadero, juegan un papel destacado en la industria pecuaria, con aproximadamente 141 millones de cabezas aves y 27 millones cabezas de ganado en el territorio nacional. Dichos sectores, generan en promedio 3.436.204 toneladas de gallinaza y 2.340.000 toneladas de estiércol bovino al año (Estrada, 2005; Ganadería Bovina, 2012). Por su lado, la industria agrícola, con más de 5 millones de hectáreas cultivadas en el país, representa para el departamento de Santander la producción de 189.280 toneladas anuales de residuos proveniente de cultivos de café, tomate, cacao, aguacate, cítricos entre otros , según la revista Evaluaciones agropecuarias de Santander (Eva, 2010). Dado el alto contenido de materia orgánica presente en las biomásas residuales como la gallinaza (GJ), estiércol bovino fresco (EF) y los residuos agrícolas (RA), la incorrecta disposición de los mismos puede generar un impacto ambiental significativo.

Tradicionalmente, la gallinaza, los residuos agrícolas y el estiércol bovino han sido dispuestos mediante el compostaje, el relleno sanitario y la incineración (Morales, 2007). Sin embargo, en los últimos años, la búsqueda de estrategias de valorización energética de biomásas residuales ha recibido mayor atención, dada la necesidad de alternativas energéticas renovables a los combustibles fósiles. Tecnologías como la digestión anaerobia, permiten simultáneamente la gestión y el aprovechamiento energético de residuos orgánicos.

La digestión anaeróbica (DA) es un proceso de biodegradación en el que un consorcio microbiano se encarga de producir a partir de materia orgánica biogás, estabilizando la materia, en un producto final con propiedades fertilizantes llamado Biol (Shin H.S et al., 2001). En este sentido la DA

responde a los problemas ambientales asociados a biomasas residuales, al disminuir la generación de olores, emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación de las aguas subterráneas (Speece, 1996).

La gallinaza, el estiércol bovino fresco y los residuos agrícolas son sustratos (Lambis et al., 2013) particularmente atractivos para la digestión anaerobia, si se toman en consideración propiedades fisicoquímicas como la alta humedad y el contenido de materia orgánica representada en carbohidratos, lípidos, proteína, lignina y hemicelulosa (Li et al., 2013). De hecho, se han reportado rendimientos de producción de metano para procesos de digestión anaerobia con la gallinaza, estiércol bovino y los residuos agrícolas de: $0,31 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$; $0,3 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$ y $0,32 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$ respectivamente (Abouelenien et al., 2009; Lehtomäki et al., 2007; Raposo et al., 2009). No obstante, dada la naturaleza específica de cada sustrato, pueden presentarse bajos rendimientos en DA asociados a factores con potencial inhibitorio para el proceso. El caso particular de la gallinaza de jaula, las concentraciones elevadas de nitrógeno y su posterior degradación en forma de iones de amonio, hacen su biodegradación anaerobia sensible a inhibición (Bujoczek et al., 2000). El estiércol bovino fresco presenta concentraciones bajas de carbono total, lo que incide directamente en un bajo potencial para la producción de biogás (Lehtomäki et al., 2007). Por último, la DA de los residuos agrícolas suele presentar problemas de inestabilidad debido al alto contenido de lignina que es una molécula polimérica compleja cuya ruptura selectiva en moléculas más pequeñas es difícil (Ning Yan et al., 2008).

La co-digestión anaerobia (Co-DA) es una alternativa tecnológica para mejorar el desempeño y la estabilidad de la digestión anaerobia y para compensar las desventajas de un determinado sustrato (Yenigun et al., 2013; Rajagopal et al., 2013). La co-digestión consiste en la digestión simultánea de sustratos con características complementarias, en términos nutricionales o de estabilidad,

que favorezcan el metabolismo microbiano a la hora de biodegradar materia orgánica (Mata-Alvares et al., 2014). Bajo esta perspectiva, un co-sustrato idóneo para la GJ, EF y RA, debe aportar carbono orgánico oxidable, ya sea para compensar las altas concentraciones de nitrógeno en el caso de la gallinaza de jaula o para aumentar el potencial de biometanización para el estiércol fresco y residuos agrícolas.

Los sobrantes alimenticios de restaurante (SAR) son un sustrato rico en carbono teniendo en cuenta sus altas concentraciones de carbohidratos, lípidos y proteínas, además contienen N, P, K, Na, Ca, Mg, Al, Fe, Zn y Mn (Kwon et al., 2004), una humedad entre 82-90 %, una fracción orgánica que varía en el rango de 85-90 % SV/ST y un potencial de biometanización reportado de 0,6 m³ CH₄ / kg SV (Ainia , 2007). Dadas estas características fisicoquímicas y su elevado contenido energético, los sobrantes alimenticios de comedores (SAR) pueden llegar a ser un co-sustrato ideal para la gallinaza, los residuos agrícolas y el estiércol bovino fresco.

Los estudios de la Co-DA se direccionan a la búsqueda de mezclas de sustrato/co-sustrato que favorezcan factores como la relación C/N, la humedad del medio y la disminución de compuestos inhibitorios (Mata-Álvarez et al., 2014). Una mezcla apropiada de sustrato y co-sustrato mejora el balance en la composición y disminuye el efecto inhibitorio en los compuestos tóxicos. En este sentido para un buen desempeño del proceso se requiere garantizar el efecto sinérgico de los sustratos (Astals et al., 2014).

Por lo anterior el presente trabajo se enfoca en la evaluación de los SAR como co-sustrato para el mejoramiento del potencial de biometanización de tres residuos agroindustriales: la gallinaza de jaula, el estiércol bovino fresco y los residuos agrícolas, variando las proporciones agregadas hasta encontrar la

relación más adecuada de la mezcla; trabajando con una relación inóculo-sustrato de 2.

1. GENERALIDADES

1.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso biológico en ausencia de oxígeno, mediante el cual un consorcio microbiano descompone la materia orgánica y produce un biogás (mezcla de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2); lodo como subproducto) que una vez estabilizado es utilizado como enriquecedor de suelos. La DA comprende 4 etapas: a) la hidrólisis de las macromoléculas (polisacáridos, lípidos y proteínas) b) la acidogénesis de los monómeros, C) la acetogénesis y d) la metanogénesis. Cada una de estas etapas es llevada a cabo por diferentes grupos de microorganismos (Figura 1).

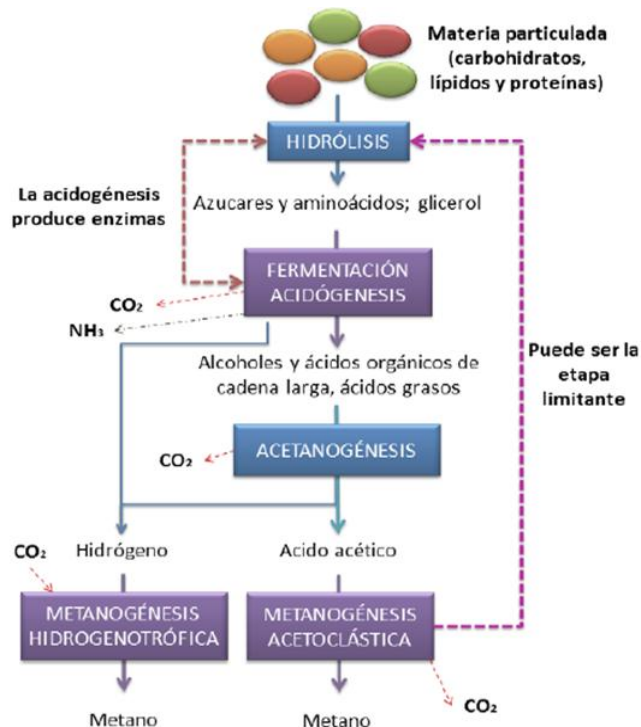
En la primera etapa de la DA la materia orgánica compuesta de moléculas complejas, es degradada a compuestos más simples que puedan ser metabolizados por los organismos. El grupo microbiano presente en la hidrólisis son las bacterias hidrolíticas, que producen ácido acético, compuestos monocarbonados, ácidos grasos orgánicos y otros compuestos policarbonados. En esta etapa las bacterias actúan sobre sustratos tales como celulosa, almidón, proteínas y grasas, transformándolos en compuestos orgánicos solubles, de esta forma los carbohidratos se convierten en azúcares simples, las grasas en ácidos grasos y glicerol y las proteínas se hidrolizan hasta péptidos y aminoácidos, liberando dióxido de carbono e hidrógeno (Castro, 2012). La evidencia de la hidrólisis se encuentra en la disminución de materia orgánica disponible para el proceso (SV) que ocurre en el transcurso de las etapas, ésta se evalúa con la medición de azúcares reductores totales (Angelidaki et al., 2011).

En la etapa de la Acidogénesis, los productos intermedios (monosacáridos) producidos en la etapa anterior son convertidos en ácidos orgánicos tipo acetato,

propionato, valerato, CO_2 y H_2 . La tercera etapa es la Acetogénesis donde las bacterias acetogénicas generan mayoritariamente acetato, H_2 y CO_2 utilizando hidrogeno y dióxido de carbono como fuente de energía (Bermúdez et al., 1988).

Finalmente en la etapa de la metanogénesis las arqueometanogénicas transforman el hidrógeno (H_2) y el dióxido de carbono (CO_2) en CH_4 y CO_2 ; esto se da debido a senderos de reacción anaerobia (Deppenmeier, 2002; Liu et al., 2008). La metanogénesis acetoclástica: el acetato se fracciona en CH_4 y CO_2 afectando el pH del sistema; la metanogénesis hidrogenotrófica: el dióxido de carbono se reduce a CH_4 , limitando el potencial de óxido-reducción del bioproceso (Castillo et al., 2007); y la metanogénesis metilotrófica, los compuestos metilados (metanol, metilaminas, sulfuro de dimetilo, etc.) se transforman a CH_4 (Chen et al., 2008).

Figura 1. Etapas de la DA



Fuente: (Angelidaki et al., 2011)

1.2 CO-DIGESTIÒN ANAEROBIA

La co-digestion comprende una digestion anaerobia donde se utiliza un sustrato principal con otros secundarios de características complementarias, con el objeto de compensar las carencias del sustrato principal; y de esta manera lograr mejorar los rendimientos en la producción de biogas (Mata-Álvarez et al., 2000). Debido a la mezcla de varios tipos de residuos como sustrato, existe el riesgo de introducción de sustancias inhibitoras al proceso, por lo cual es necesario seleccionar una relación adecuada de la mezcla del sustrato principal y los secundarios, con el fin de favorecer el sinergismo entre el balance de nutrientes humedad, y los microorganismos presentes en el sistema (Mata-Álvarez et al., 2000).

Usualmente los estiércoles animales como el estiércol bovino y la gallinaza, son usados para procesos de co-digestión anaerobia debido a su adecuado contenido de nitrógeno y amplios rangos de nutrientes (Morales et al., 2007; Li et al., 2014). Estudios han reportado una máxima producción de metano obtenido a partir de GJ de $0,47 \text{ m}^3 / \text{kg}$ sólidos volátiles (Li et al., 2014). Sin embargo, estudios recientes reportan valores de producción entre $0,13\text{-}0,35 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$ debido a inhibiciones asociadas a la elevada concentración de iones amonio y a bajas concentraciones de carbono orgánico oxidable total, precursor del metano (Sierra et al., 2013; Portal et al., 2013).

Así mismo para los residuos agrícolas se han obtenido rendimientos de producción de metano de $0,32 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$ (Raposo et al., 2009). Las biomásas residuales de este tipo suelen presentar bajos rendimientos de producción principalmente por su naturaleza lignocelulósica y la dificultad inherente en su degradación (Li et al., 2013). La tabla 1 presenta rendimientos de producción de metano reportados para la gallinaza, los residuos agrícolas y el estiércol bovino.

Tabla 1. Producción de metano a partir de diversos residuos

Residuo	Referencia	Rendimiento CH₄
GJ	Abouelenien <i>et al.</i> , 2009	0,31 m ³ /kg SV
RA	Raposo <i>et al.</i> , 2009	0,32 m ³ /kg SV
EF	Lehtomäki <i>et al.</i> , 2007	0,30 m ³ /kg SV

Una respuesta a las desventajas de la mono digestión anaerobia de gallinaza de jaula, residuos agrícolas y el estiércol bovino fresco puede ser la co-digestión con residuos, como los sobrantes alimenticios de restaurante, que proporcionan un alto contenido de materia orgánica y carbono oxidable total, presentes en formas más fácilmente biodegradable y disponible, logrando sumar en los sistemas de co-digestión la riqueza nutricional, en términos de macrocomponentes como carbohidratos, lípidos y proteínas, de los SAR, con la estabilidad y contenido micro nutritivo de residuos como la gallinaza de jaula, los residuos agrícolas y el estiércol bovino para obtener un proceso de mejor desempeño y estabilidad.

Numerosos estudios sobre la co-digestión de residuos agrícolas y estiércol de animales se han centrado en pretratamientos adecuados, rangos de operación óptimos, y la evaluación de la producción de metano en modo batch (Wang *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2010).

1.3 VARIABLES DE DESEMPEÑO Y ESTABILIDAD DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA

El biogás producido durante el proceso de digestión anaerobia es un mezcla de metano (CH₄: 55-65% en volumen), dióxido de carbono (CO₂: 30-40% en volumen), y trazas de sulfuro de hidrógeno (H₂S), hidrógeno (H₂) (Deepanraj *et al.*, 2014). Al ser

un proceso bioquímico complejo, la DA está determinada por la interacción de diversos factores como: temperatura, pH, azúcares reductores totales (ART), alcalinidad total (AT) que afectan el desempeño del proceso (El-Mashad et al., 2004). En este sentido el proceso de DA puede ser evaluado mediante el monitoreo de los siguientes parámetros:

Azúcares Reductores Totales (ART): La alta concentración inicial de ART favorece el arranque del proceso y promueve el buen funcionamiento del reactor durante la DA. Los ART son compuestos solubles fácilmente metabolizados por los microorganismos, permitiendo llevar a cabo las etapas de la DA (Madigan et al., 2006).

Relación C/N: la relación carbono nitrógeno (C/N) es un indicador utilizado para el control de sistemas de tratamiento biológico (Wang et al., 2012). Para una degradación óptima, la relación C/N debe estar entre 25/1 y 30/1 (Wang et al., 2012). Si la relación C/N es baja, los microorganismos no pueden metabolizar la materia orgánica y si es muy alta hay un exceso de nitrógeno que se acumula de manera amoniacal e inhibe el proceso (Hansen et al., 1998).

Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y pH: Los AGV son un producto intermedio en la DA, definido como la mezcla de los ácidos: acético, propiónico, butírico y valérico (Zhang et al., 2013). En la DA, los AGV producidos son convertidos finalmente en CH_4 Y CO_2 , debido a la acción del consorcio microbiano (bacterias acetogénicas metanogénicas); Sin embargo, la acumulación de AGV es un factor inhibitorio en la DA ya que representa caídas en el pH (Castillo et al., 2007).

Potencial de Biometanización (PBM): El PBM es la variable de respuesta que determina el máximo rendimiento de metano y la capacidad de biodegradabilidad de un sustrato. El PBM puede describirse como el volumen de metano acumulado

(medido en condiciones estándar de presión y temperatura) sobre la cantidad de sustrato adicionado en términos de SV ($\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{kg SV}$) (Angelidaki et al., 2011).

Temperatura: la DA se puede llevar a cabo en tres intervalos de temperatura: a) menos de 30 °C (proceso psicrófilico); b) 30-40 °C (proceso mesófilico) y c) 50-60 °C (proceso termófilico). No obstante, los microorganismos anaerobios son más activos en intervalos de temperatura mesófilico y termófilico. En el rango termófilico se asegura la destrucción de patógenos (Angelidaki et al., 2011).

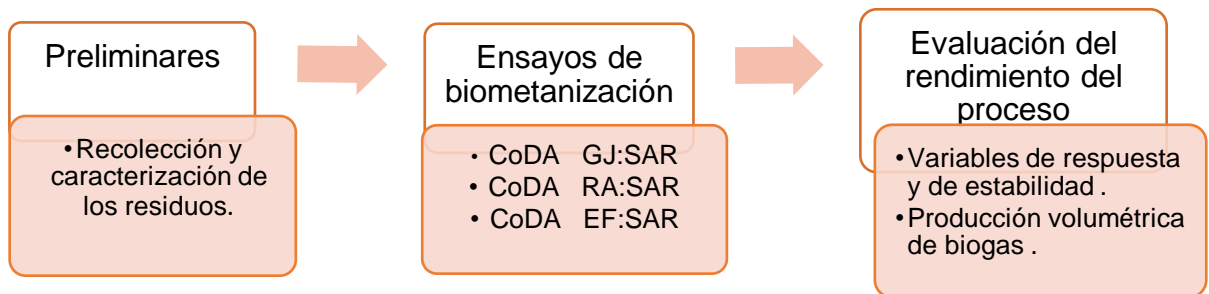
Alcalinidad Total (AT): la AT es la capacidad del sistema para soportar y amortiguar la presencia de ácidos sin disminuir su pH. Esto ocurre por el efecto buffer generado por la presencia de iones hidroxilo (OH^-), carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (H_2CO_3^-). Valores típicos de alcalinidad para DA, están entre 1500 y 7500 mg CaCO_3/L (Castillo et al., 2007).

Relación inóculo –sustrato (RIS): La RIS expresa la relación del contenido de SV del inóculo y sustrato. Un valor óptimo de RIS en el proceso de DA asegura la presencia de los grupos de bacterias necesarios para la biodegradación de la materia orgánica (Eskicioglu G ,2011).

2. METODOLOGÍA

Posteriormente a un estudio bibliográfico, se configuró una metodología en etapas orientadas a evaluar la producción de biogás a partir de la co-digestión de residuos agroindustriales con SAR, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Etapas de la metodología



2.1 RECOLECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS

2.1.1 Sustratos Para este estudio se utilizaron tres sustratos para co-digestar con sobrantes alimenticios de restaurante (SAR): Gallinaza de jaula (GJ) residuos agrícolas (RA) y estiércol bovino fresco (EF). La GJ fue recolectada en la empresa Incubadora Santander S.A, localizada en el municipio de Girón Santander. El protocolo de toma de muestra de GJ se presenta en el anexo A. Una vez se recolectaron las muestras se conservaron a 4°C en las instalaciones del laboratorio de biotecnología de la escuela de Ingeniería Química en la Universidad Industrial de Santander, para su posterior caracterización según el protocolo requerido de la APHA (American Public Health Association, 1998). Anexo E.

El segundo sustrato utilizado fue los residuos agrícolas (cascaras de tubérculos, verduras y fruta) recolectados diariamente durante una semana en el comedor de bienestar universitario de la UIS. El protocolo toma de muestra RA se presenta en el anexo B. Una vez recolectadas las muestras se homogenizaron y se conservaron a 4°C en las instalaciones del laboratorio de biotecnología de la Escuela de Ingeniería Química en la Universidad Industrial de Santander, para su posterior caracterización según el protocolo requerido de la APHA (American Public Health Association, 1998). Anexo F

El tercer sustrato fue el estiércol bovino fresco, el cual fue recolectado del frigorífico Vijagual municipio de Rio Negro –Santander, para ser trasladado a la Universidad Industrial de Santander en donde se almacenó a 4 °C para estabilizarlo y posterior a este tratamiento, caracterizarlo fisicoquímicamente, según el protocolo requerido de la APHA (American Public Health Association, 1998). Anexo G

2.1.2 Co-sustrato Se seleccionó como co-sustrato sobrantes alimenticios de restaurante (SAR) los cuales se recolectaron diariamente durante una semana del Comedor Universitario de la Universidad Industrial de Santander. Los SAR recolectados se homogeneizaron según el protocolo descrito en el anexo B. La mezcla homogénea se diluyó hasta alcanzar una concentración de sólidos volátiles de 130,9 g/kg para facilitar la manipulación y así su respectiva caracterización fisicoquímica de acuerdo al protocolo descrito por la APHA (American Public Health Association, 1998). El cual se muestra en el Anexo C.

2.1.3 Inóculo Se utilizó como inóculo lodo estiércol bovino activado (LA), el cual fue recolectado del frigorífico Vijagual municipio de Rio Negro –Santander, para ser trasladado a la Universidad Industrial de Santander en donde se almacenó en un bio-reactor para reducir el material endógeno durante seis meses. Posterior a este tratamiento, el inóculo se caracterizó fisicoquímicamente valorando: pH,

concentración de SV suspendidos, humedad, ART, AGV y densidad, según el protocolo requerido de la APHA (American Public Health Association, 1998).

2.2 ENSAYOS DE BIOMETANIZACIÓN PARA LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES CON SAR

Se realizó un ensayo de biometanización para la co-digestión de los residuos agroindustriales: gallinaza de jaula, residuo agrícola y estiércol bovino fresco con los SAR a diferentes mezclas.

Los ensayos se llevaron a cabo en operación discontinua en biodigestores con capacidad de 50 mL, cuyo volumen de operación fue 40 mL. Posteriormente se gasearon con nitrógeno durante 2 minutos para garantizar la anaerobiosis en el sistema, bajo las condiciones de operación que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de operación para Co-DA de los residuos agroindustriales

Variable	Valor
RIS	2
Temperatura [°C]	39
Volumen operación [mL]	40
Volumen real [mL]	50
SV LA [g/kg]	20
SV SAR [g/kg]	188
SV GJ [g/kg]	108
SV RA [g/kg]	91
SV EF [g/kg]	76
Agitación	manual – intermitente

La literatura reporta buenos desempeños de producción de biogás y estabilidad durante la biodegradación anaerobia para relaciones Inoculo-sustrato (RIS)

superiores a 1. Para este estudio se seleccionó una RIS de 2, en concordancia con lo sugerido por Álvarez & Calderón (2014). Para evaluar el rendimiento se utilizó la siguiente expresión matemática:

$$Y_{\frac{P}{S}} = \frac{\text{volumen de producto formada}}{\text{masa de sustratos consumidos}} \quad \text{Ec. 1}$$

$(Y_{\frac{P}{S}})$ Representa el cálculo matemático del rendimiento, correspondiente a un cociente del volumen acumulado de gas metano a condiciones normales, con respecto a la cantidad de carga orgánica adicionada de la mezcla; con Unidades de $\frac{m^3 \text{ metano}}{kg \text{ de SV agregados}}$.

Para las pruebas experimentales se utilizó cinco mezclas de sustrato co-sustrato, GJ: SAR, RA: SAR, EF: SAR de 1:0 ,3:1, 1:1, 1:3 ,0:1; expresadas en términos de SV tal como se observa en la Tabla 3. Cada experimento se realizó por triplicado en donde las mezclas 1:0 y 0:1 corresponden a la mono-digestión (DA) de sustrato y co-sustrato respectivamente.

Se realizó un experimento blanco con una cantidad fija de inóculo, con el fin de evaluar el desempeño de la co-digestión. La producción de biogás se determinó mediante el método de desplazamiento alcalino detallado en el Anexo H; según los protocolo de la APHA (American Public Health Association, 1998).

Tabla 3. Matriz estructura de experimento Co-DA de los residuos agroindustriales

Mezclas (%)		Sólidos Volátiles (g)		volumen operación (mL)
Sustrato	Co-sustrato	Sustrato	Co-sustrato	
-	100	0,00	0,32	40
25	75	0,08	0,24	40
50	50	0,16	0,16	40
75	25	0,24	0,08	40
100	-	0,32	0,00	40

Para la selección de la relación más adecuada, en la búsqueda de mejorar el potencial de biometanización de los residuos agroindustriales, se tuvo en cuenta como variable de respuesta el volumen normalizado de metano producido (V_{NTP}) expresado en mL de metano y el potencial de biometanización (PBM) reflejado en el rendimiento de producción de biogás (YPS) (ecuación 1).

Los resultados experimentales fueron analizados con el software estadístico Minitab 17 (17.11.0). El test de Fisher fue utilizado para verificar diferencias significativas, donde valores de p inferiores a 0,05 indica que existe diferencia significativa entre los valores experimentales. Para este análisis se tuvo en cuenta restar el experimento blanco para determinar el rendimiento total de la producción de biogás (Li et al., 2013). Así mismo se aplicó desviación estándar a las curvas representativas de cada ensayo.

2.3 VARIABLES DE RESPUESTA Y ESTABILIDAD

Con el objetivo de asegurar un buen inicio del bioproceso y garantizar la estabilidad a lo largo de éste, se cuantificó la concentración de ácidos grasos volátiles, alcalinidad total, consumo de sólidos, pH y capacidad buffer en los días inicial y final de la experimentación, para verificar que se encontraran dentro de los rangos establecidos.

En la tabla 4 se listan las variables monitoreadas, la frecuencia de monitoreo y el método usado para cuantificar dichas variables durante el desarrollo experimental.

Tabla 4. Variables de Respuesta de la DA.

Variables respuesta	Unidad	Frecuencia	Método
ART	mg/mL	inicio y final del experimento	Colorimétrico usando ácido 3-5 dinitrosalicílico (DNS) Anexo I
AT	mg CaCO ₃ /L	inicio y final del experimento	Titulación Anexo J
SV	g/L	inicio y final del experimento	Gravimétrico Anexo K
pH	----	inicio y final del experimento	Potenciométrico/NTC 5167
CH ₄	mL	inicio y final del experimento	Desplazamiento trampa alcalina
YPS	m ³ CH ₄ / kg SV	final experimento	Cálculo de YPS

Fuente: (Álvarez & Calderón 2014)

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUSTRATOS, CO-SUSTRATO E INÓCULO

En la tabla 5 se presenta la caracterización fisicoquímica de los sustratos, co-sustrato e inóculo utilizados en la experimentación.

Tabla 5. Caracterización fisicoquímica

Parámetro	Unidad	SAR	EF	GJ	RA	LA
ST	g/kg	190	151	226	140	29
SV	g/kg	188	76	108	131	20
SV/ST	%	0,98	0,50	0,47	0,93	0,68
pH	unidad de pH	8,21	6,80	7,69	7,77	7,54
AGV	mg/L	4560	3720	15604	1500	540
AT	mg CaCO ₃ /L	4000	7300	14000	2750	1
Densidad	g/mL	1,04	0,82	1,06	1,02	1
C/N	-	13	28	11	6	7

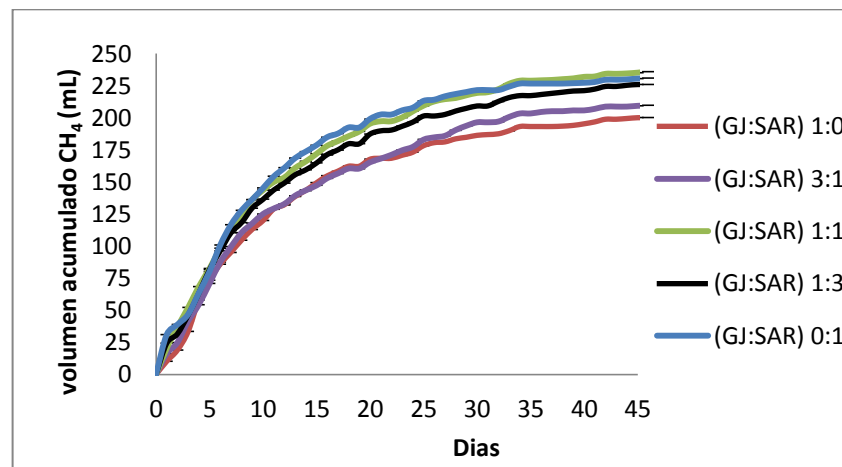
Las concentraciones de sólidos volátiles de los residuos se encuentran en un rango de 75-188 g/kg y sólidos totales entre 140-226 g/kg, indicando que hay materia orgánica disponible para la estabilización de estos residuos mediante la co-digestión (Álvarez et al., 2014). La concentración de ácidos grasos volátiles para el inóculo (LA) es baja con respecto a GJ, RA, EF; por ende el proceso tendrá un arranque con niveles bajo de inhibición (concentraciones de ácidos grasos volátiles menores a 8000 mg/L) (Cirne et al., 2007). La GJ ayuda a amortiguar la inhibición por ácidos grasos volátiles debido a su alta alcalinidad total (Carr et al., 2014). El pH de los sustratos y del inóculo se encuentra en el rango de operación (6,5 – 8,5) para el desarrollo de DA reportado en la literatura (Poh et al., 2009). La relación carbono nitrógeno de los sustratos y co-sustrato son bajas, sin embargo mediante la Co-DA se

conseguirá ajustar una relación de mezcla en donde la relación C/N esté cercana a 20, relación reportada como idónea para el proceso de DA (Wu et al., 2010; Zhong et al., 2013).

3.2 ENSAYOS DE POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN

3.2.1 Mezclas para Co-DA de gallinaza de jaula con sobrantes alimenticios de restaurante En la figura 3 se presenta la producción de metano de las mezclas de co-digestion comparadas con el control de mono digestión de GJ.

Figura 3. Volumen Acumulado de metano Co-digestión gallinaza de jaula con sobrantes alimenticios de restaurante.

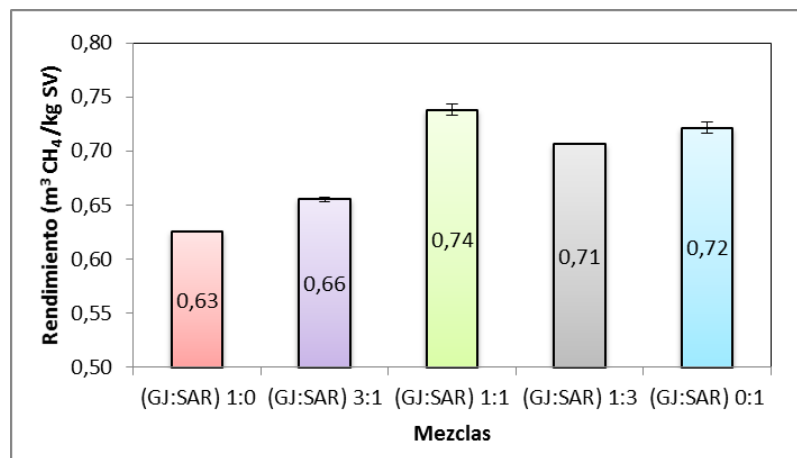


Se observa un comportamiento semejante para todas las mezclas a lo largo del proceso, alcanzando la estabilidad alrededor del día 40. Al realizar el análisis estadístico del volumen acumulado de metano se evidencia una influencia positiva de la co-digestión con un valor de $p = 0,019$ y un índice de confiabilidad del 95%, lo que indica que la adición del co-sustrato mejoró significativamente la producción de biogás.

Las curvas representativas de las diferentes mezclas sobrepasaron la producción del control (GJ: SAR)1:0.El control presentó una producción de metano de 200,13 mL CH₄; mientras que la mezcla 1:1 presentó la mayor producción de metano (235,25 mL CH₄), superando en 17,85% la producción del control.

De todas las mezclas estudiadas, la relación 3:1 presentó la menor producción de metano (209,39 mL CH₄); este comportamiento es coherente, dado que esta relación posee la mayor concentración de gallinaza de jaula y por ende posee altas concentraciones de nitrógeno, los cuales se degradan a compuestos inhibitorios como iones de amonio (Bujoczek et al., 2000). La relación 1:3 superó a la monodigestión en 12,92 % siendo esta mezcla la que mayor cantidad de SAR tiene, pero aun así no se tuvo la mayor producción de biogás, esto debido a que la etapa hidrolítica de los SAR es más rápida. En la Figura 4 se presentan los rendimientos de metano de las distintas co-digestiones.

Figura 4. Rendimiento de la Co-digestión gallinaza de jaula con sobrantes alimenticios de restaurantes

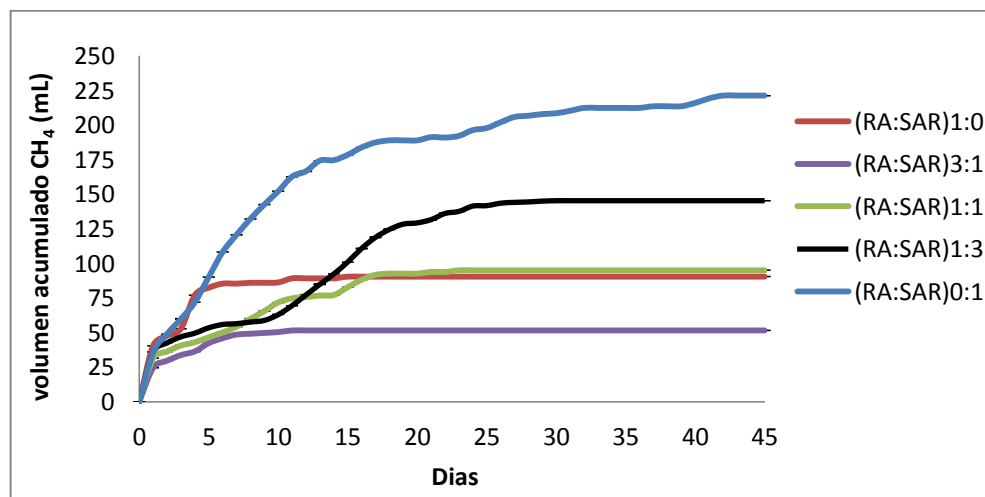


Se observa que la mezcla (GJ: SAR) 1:1 es la que presenta el mejor rendimiento (0,74 m³CH₄/kg SV), el cual es superior al obtenido por Lambis et al., (2013) (0,55 m³CH₄/kg SV). El rendimiento obtenido en la mezcla 1:3 (0,71 m³CH₄/kg SV) indica

que el proceso de co-digestión anaerobia de la gallinaza de jaula con los sobrantes alimenticios de comedores presenta altos rendimientos de producción de metano.

3.2.2 Mezclas para Co-DA de residuos agrícolas con sobrantes alimenticios de restaurante En la figura 5 se presenta la producción de metano de las co-digestiones comparadas con el control RA: SAR 1:0. Se observa que a partir del día 20 hubo una tendencia similar de las curvas y alrededor del día 30 se estabilizaron.

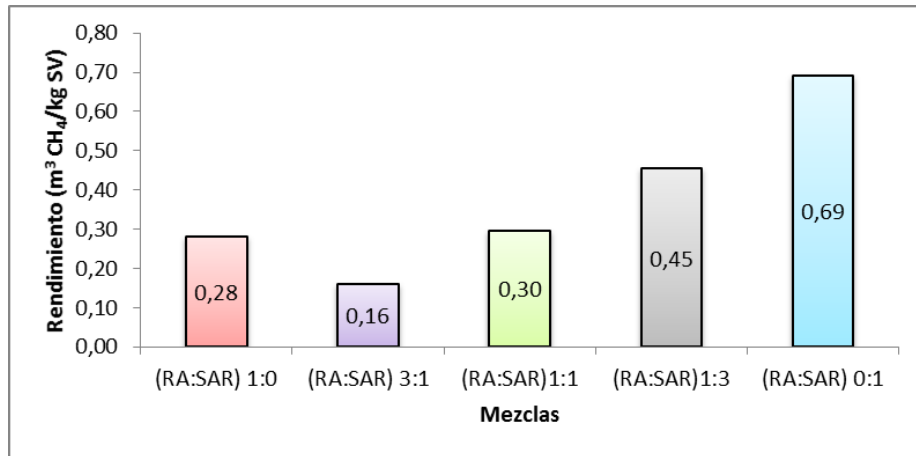
Figura 5. Volumen acumulado de metano Co-digestión residuos agrícolas con sobrantes alimenticios de restaurante



Al realizar el análisis estadístico del volumen acumulado de metano se evidenció una influencia positiva de la co-digestión con un valor de $p=0,0001$ y un índice de confiabilidad del 95% lo que indica que la adición del co-sustrato mejoró significativamente la producción de biogás. Las mezclas (RA:SAR) 1:1 y 1:3 superaron la producción del control; la mezcla 1:3 presentó la mayor producción de metano (145,32 ml CH_4) la cual supera en 60,64% la producción del control (90,46 ml CH_4) Para este ensayo experimental la relación 3:1 fue la que obtuvo la producción más baja (63,88 ml CH_4) y mayor contenido de RA , este comportamiento es debido a la lignina presentes en este residuo lo cual dificulta la ruptura selectiva en moléculas más pequeñas (Ning Yan et al., 2008) dificultando el

arranque del proceso y obtención de altos rendimientos para el ensayo experimental de dicha relación.

Figura 6. Rendimiento de la Co-digestión residuos agrícolas con sobrantes alimenticios de restaurantes

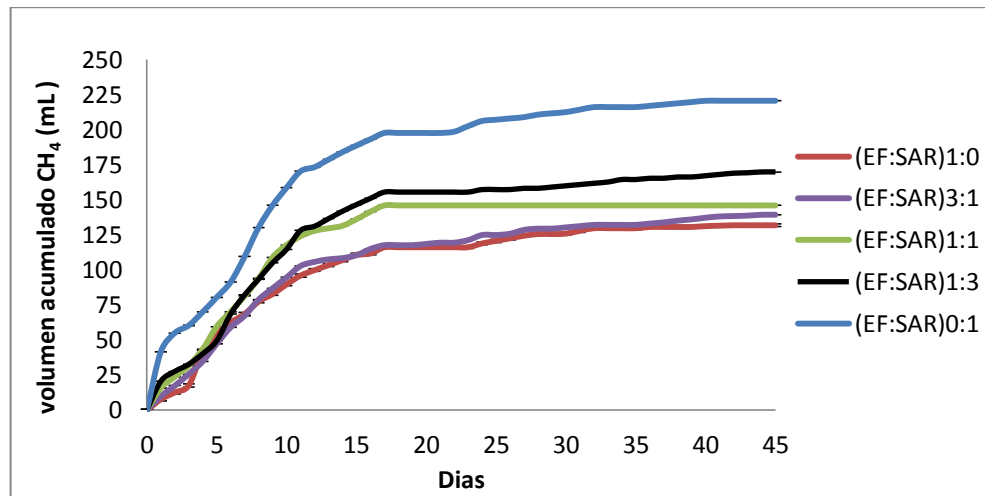


La figura 6 muestra los rendimientos de metano de las distintas mezclas, siendo la (RA: SAR) 1:3 la que presenta mejor rendimiento (0,45 m³ CH₄/kg SV); dicho rendimiento es mayor comparado con el rendimiento (0,32 m³ CH₄/kg SV) obtenido en la digestión de RA (Raposo et al., 2009).

Al realizar el análisis estadístico del volumen acumulado de metano, se evidenció diferencias significativas entre cada uno de los experimentos con un valor de p= 0.0001 con un índice de confiabilidad del 95%. Lo anterior confirma que la co-digestión de RA con SAR aumenta el rendimiento de metano en las mezclas adecuadas.

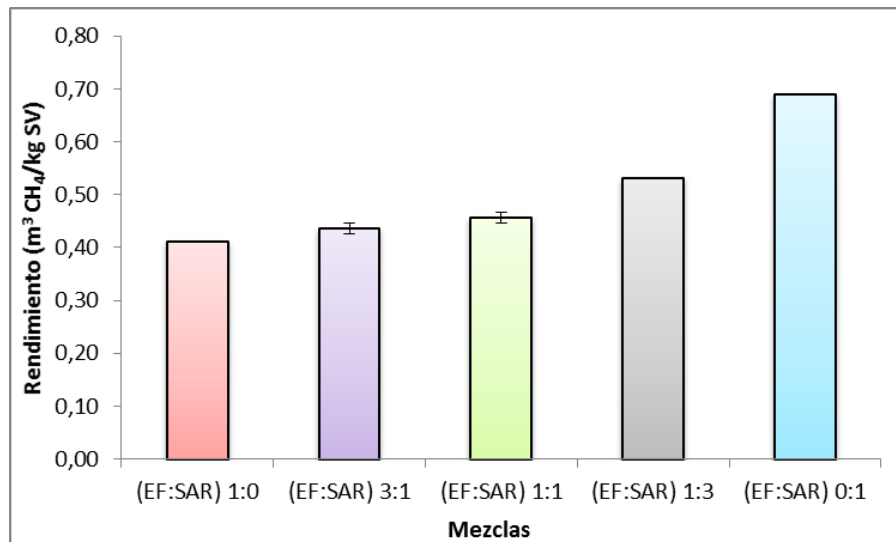
3.2.3 Mezclas para Co-DA de estiércol bovino fresco con sobrantes alimenticios de restaurante A continuación se presentan los rendimientos de la producción de metano para las diferentes mezclas EF: SAR 1:0, 3:1, 1:1, 1:3, 0:1 utilizadas para la Co DA, durante 45 días de operación.

Figura 7. Volumen acumulado de metano Co-digestión de estiércol bovino fresco con sobrantes alimenticios de restaurante



La figura 7 muestra la producción de metano de las mezclas comparadas con el control (EF: SAR) 1:0. Se observa una tendencia similar a lo largo del ensayo y una influencia positiva de la co-digestión ya que todas las mezclas superaron la producción del control. La mezcla 1:3 fue la que presentó mayor producción (169,93 mL CH₄) superando en 28,8% la producción del control (131,89 mL CH₄). La mezcla que presentó menor producción de metano fue 3:1 (138,48 mL CH₄), al igual que los anteriores ensayos esta mezcla es la que contiene mayor cantidad de residuo agroindustrial por lo que el bajo potencial para la producción de metano se debe a bajas concentraciones de carbono total, principal desventaja para la DA de este tipo de residuos (Lehtomäki et al., 2007).

Figura 8. Rendimiento de la Co-digestión estiércol bovino fresco con sobrantes alimenticios de restaurante



La figura 8 muestra los rendimientos de metano de las diferentes mezclas, siendo la (EF: SAR) 1:3 la que presenta mejor rendimiento (0,53 m³CH₄/kg SV); la cual es mayor comparado con el rendimiento (0,3 m³CH₄/kg SV) obtenido en la digestión de EF (Lehtomäki et al., 2007). Los SAR son un co-sustrato idóneo para la co-digestión de residuos agrícolas ya que brindan estabilidad y equilibrio nutricional para mejorar el rendimiento.

3.3 VARIABLES DE RESPUESTA Y ESTABILIDAD

La tabla 6 muestra que para los ensayos de Co-DA de los residuos agroindustriales los valores de pH se encuentran alrededor de 8, propiciando un arranque dinámico del proceso y favoreciendo el crecimiento microbiano (Raposo et al., 2006). Las concentraciones de azúcares se encuentran dentro de los valores que garantizan el arranque de la fase hidrolítica del bioproceso (Álvarez et al., 2014). Los procesos anaerobios alcanzan la estabilidad en rangos de 0,2-0,8 (AGV/AT) (Raposo et al., 2011). La relación AGV/AT determina la capacidad de

autorregular el pH dentro del proceso de DA (Kawai et al., 2014; Kalloum et al., 2014; Wang et al., 2014). Para este estudio La relación AGV/AT se mantuvo por debajo de 0,8, demostrando estabilidad en el proceso, capaces de soportar la presencia de agentes ácidos durante la DA, evidenciado en las figuras 3, 5 y 7.

Los ácidos grasos volátiles están estrechamente relacionados con cambios en el pH, alcalinidad, y la actividad metanogénicas. Concentraciones de AGV superiores a los 6000 mg/L pueden causar inhibición del proceso (Castillo et al., 2007). Para este estudio la mayor concentración de AGV fue de 3240 lo que indica que no se presentó inhibición por acumulación ácidos grasos volátiles.

Tabla 6. Variables medidas en el arranque y al final del proceso

GJ										
variables	1:0		3:1		1:1		1:3		0:1	
	inicio	final	inicio	final	inicio	final	inicio	final	inicio	final
SV (g/kg)	26,1	19,4	23,3	22,6	30,6	23,5	39,4	23,7	19,1	17,3
ART(mg/mL)	2,8	1,6	2,8	1,6	2,2	1,6	2,1	1,5	1,6	1,6
AGV (mg/L)	720	600	720	540	840	480	1080	480	1140	600
AGV/AT	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,4	0,2	0,3	0,2
pH	8,3	8,3	8,3	8,3	8,4	8,2	8,5	8,2	8,5	8,3
C/N	11,13		11,76	-	12,32	-	12,78	-	13,19	-
RA										
variables	1:0		3:1		1:1		1:3		0:1	
	inicio	final	inicio	final	inicio	final	inicio	final	inicio	final
SV (g/kg)	22,4	18	23	10,7	24,1	12,1	21,6	13,3	25,2	18,5
ART(mg/mL)	3,8	0,6	3,6	0,7	4,7	0,8	4,8	0,5	5,5	0,6
AGV (mg/L)	660	600	540	360	660	540	780	3240	1500	4380
AGV/AT	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	1,6	0,5	3,2
pH	8,0	8,3	8,2	8,2	7,7	8,0	8,0	5,8	7,8	5,9
C/N	5,84	-	7,52	-	9,31	-	11,19	-	13,19	-

EF										
variables	1:0		3:1		1:1		1:3		0:1	
	inicio	final	inicio	final	inicio	final	inicio	final	inicio	final
SV (g/kg)	12,5	11,5	19,6	19	28,1	14,8	26,1	19,1	28,1	20,6
ART (mg/mL)	3,2	0,6	4,2	0,7	2,8	0,7	3,2	1,5	1,6	1,1
AGV (mg/L)	600	180	960	300	720	420	1080	420	600	300
AGV/AT	0,4	0,1	0,7	0,2	0,4	0,2	0,6	0,2	0,1	0,3
pH	8,0	8,4	8,1	8,0	8,1	8,1	8,6	8,1	8,2	8,1
C/N	27,7	-	21,34	-	17,54		15	-	13,19	-

Para el ensayo de GJ: SAR las mezclas 1:1 y 1:3 presentaron un consumo de materia orgánica del 23% y 40% respectivamente, sobresaliendo de las otras mezclas; también se observa una capacidad buffer por debajo de 0.8, brindando estabilidad al proceso, indicando que hay un balance entre la población de microorganismos ácido-génicos y metanogénicos (Wan et al., 2011). Para la mezcla 1:1 el rango de AGV está entre 400-800 mg/L resultados similares a los obtenidos en Wilawan et al, 2014 .Durante el proceso biodegradativo de la mezcla 1:1 disminuyó el pH de 8.4 a 8.2 producto de cambios en la concentración de AGV.

Para el ensayo RA: SAR las mezclas 1:1 y 1:3 presentaron un consumo de materia orgánica del 50% y 39% evidenciando actividad de las bacterias hidrolíticas; por otra parte para la mezcla 1:3 presento l capacidad de amortiguar caídas por pH lo cual se evidencia en la capacidad buffer.

Para el ensayo EF: SAR la mezcla 1:3, fue la más representativa como se observa en figura 8, seguida de la 1:1.Observando los resultados experimentales mostrados en la tabla 6, la biodegradabilidad de la materia orgánica podrían ser la principal razón de este comportamiento ya que el consumo de ART a lo largo del ensayo para estas dos mezclas fueron de 46% y 27% respectivamente; por otra parte se evidencia que los valores de pH están dentro de rango óptimo de la DA.

Rendimientos de metano bajos pueden ser debido a desequilibrios de bacterias hidrolíticas, fermentativas, acetogénicas y arqueas acetanogénicas; generalmente estos desequilibrios son causados por una inadecuada relación de C/N, acumulación de AGV y alto contenido de nitrógeno total (Hansen et al., 1998; Li et al., 2013), como se evidencia en la mezcla 3:1 de la Co-DA de los residuos agroindustriales.

4. POTENCIAL ENERGÉTICO Y ECONÓMICO

Una manera de contextualizar en un panorama real la mejoría obtenida mediante la co-digestión de los residuos agroindustriales con SAR, es expresar en términos energéticos y monetarios esos aumentos. A partir de los resultados experimentales se realizó un estimativo de aprovechamiento energético de la mono digestión anaerobia de los residuos y de los mejores desempeños reportados para la co-digestión.

En la tabla 7 se presenta la cantidad de residuo en (g) utilizada para el montaje experimental en las mezclas 1:0 representativas del control de GJ, RA y EF y el potencial energético y económico correspondiente. Para la transformación de biogás en energía eléctrica fue usada la siguiente ecuación (Tricase C et al., 2009):

$$\text{Electricidad (kWh/año)} = \text{biogás (m}^3\text{/año)} * 1.9 \text{ (kWh /m}^3\text{)} \text{ Ec 2.}$$

Tabla 7. Potencial Energético y Económico de DA de residuos agroindustriales

Residuos Agroindustriales	Metano (m ³)	Energía (kWh)	Precio \$/kWh	Energía \$COP
Gallinaza de Jaula (1:0)	0,0002	0,0006	417,5	0,26
Residuo Agrícola (1:0)	0,00009	0,0003	417,5	0,12
Estiércol Bovino Fresco (1:0)	0,00013	0,0004	417,5	0,17

En la tabla 8 se presenta la cantidad de residuo utilizada para el montaje experimental de las mezclas que obtuvieron el mayor potencial de biometanización (GJ: SAR) 1:1, (RA: SAR) 1:3 y (EF: SAR) y el potencial energético y económico correspondiente.

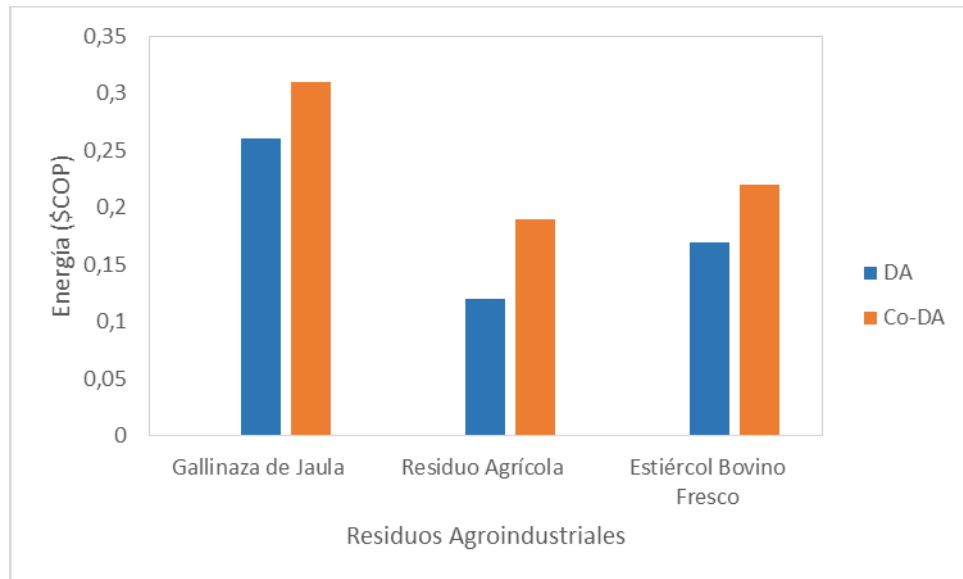
Tabla 8. Potencial Energético y Económico de Co-DA de residuos agroindustriales

Residuos Agroindustriales	Metano (m³)	Energía (kWh)	Precio \$/kWh	Energía \$COP
Gallinaza de Jaula (1:1)	0,000236	0,00075	417,5	0,31
Residuo Agrícola (1:3)	0,000145	0,00046	417,5	0,19
Estiércol Bovino Fresco (1:3)	0,000169	0,00054	417,5	0,22

A partir del metano producido durante la etapa experimental de la mezcla 1:1 GJ: SAR se pueden generar 0,00075 kWh que representarían un ahorro de \$COP 0,31 en energía eléctrica; siendo el residuo con el que se puede obtener el mayor potencial energético y económico. Se obtuvieron incrementos de valorización del 12%, 60% y 30% en las mejores mezclas de la Co-DA de GJ, RA Y EF respectivamente comparado con la mono digestión de cada uno de los residuos.

Según los datos obtenidos anteriormente se observa que es posible obtener beneficio energético y económico considerables implementando la co-digestión anaerobia para el aprovechamiento energético de los residuos agroindustriales. Granjas avícolas, agrícolas y del sector ganadero serían las principales beneficiarias de esta biotecnología que convierte los desechos sólidos generados en energía renovable.

Figura 9. Potencial Económico de Residuos Agroindustriales



La grafica 9 demuestra que aumenta considerablemente la generación energética a partir de la Co-DA de los residuos agroindustriales comparados con la DA de estos. La GJ representa el mayor potencial económico debido a su alto potencial de biometanización el cual garantiza disponibilidad de biogás para ser transformado a energía eléctrica.

Para contextualizar mejor el impacto que genera el aprovechamiento energético de los residuos agroindustriales mediante la Co-DA, se realizó un estimado de ahorro de energía en términos de \$MMCOP si se aprovecharan las toneladas generadas anualmente en Colombia.

En la tabla 9 se presentan las cantidades en toneladas de los tres residuos estudiados y que se generan por la agroindustria en Colombia anualmente, y el potencial económico y energético disponible para ser aprovechado mediante la Co-DA.

Tabla 9. Potencial Económico aprovechable en Colombia

Residuo	t/año	Metano (m³)	Energía (kWh)	Energía \$MMCOP Co-DA
GJ (1:1)	3436204	27462142	86963449	36263
RA (1:3)	71943813	2946099142	9329313949	3890323
EF (1:3)	2340000	94255200	298474800	124463

De los 3 residuos agroindustriales estudiados en este trabajo de investigación, los más significativos son los residuos agrícolas con 71943813 t/año (Escalante et al., 2010) seguido de la gallinaza de jaula con 3436204 t/año y el estiércol bovino fresco con 2340000 t/año (Estrada, 2005; Serrano, 2012). El potencial energético contenido en estos residuos puede ser aprovechado mediante la Co-DA, como lo muestra la tabla 9 se están dejando de aprovechar cerca de 9,39 E+9 kWh anuales de energía eléctrica renovable la cual representa beneficios económicos de más de \$MMCOP 3000000

5. CONCLUSIONES

- Considerando que las granjas avícolas, agrícolas y ganaderas son fuentes generadoras de residuos agroindustriales, y dada la posibilidad de generar sobrantes alimenticios de restaurante, estos últimos se posicionan como un co-sustrato asequible y aprovechable, para el aumento de los rendimientos de producción de metano de biomásas residuales como la gallinaza, residuos agrícolas y estiércol bovino.
- Las mezclas adecuadas con la que se logró mejorar el rendimiento de producción de metano de los residuos agroindustriales fueron: para la gallinaza de jaula la mezcla 1:1, para los residuos agrícolas la mezcla 1:3 y para el estiércol bovino fresco la mezcla 1:3; en donde se obtuvo un rendimiento de $0,74 \text{ m}^3$ de CH_4 /kg SV, $0,45 \text{ m}^3$ de CH_4 /kg SV y $0,53 \text{ m}^3$ de CH_4 /kg SV respectivamente.
- La implementación de sobrantes alimenticios en la co-digestión anaerobia con gallinaza de jaula, residuos agrícolas y estiércol bovino, representaría aumentos del 12% 60% y 30% respectivamente en términos energéticos (kWh) y económicos (\$COP) respecto a la digestión en solitario.

6 .RECOMENDACIONES

En miras a la transferencia tecnológica la continuación a este trabajo correspondería a la evaluación en régimen continuo de los resultados obtenidos, dado que en un contexto real la generación de este tipo de residuos es permanente y la aplicabilidad de esta tecnología debe ser evaluada en este mismo régimen.

BIBLIOGRAFÍA

A, S. Obtención de biogás a partir de gallinaza producida en la granja Bellavista-Horizontes al servicio de incubadora Santander. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2013

ABBOUELENIEN F., FUJIWARA W., NAMBA Y., KOSSEVA M., NISHO N., NAKASHIMADA Y. Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle. *Bioresource Technology*, 6368-6373. 2010

AINIA A. *Trends in Food Science & Technology*. Elsevier, 540-550. 2007

Álvarez E., Calderon D. Modelamiento del rendimiento de metano de los residuos sobrantes de restaurante UIS. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2014

ANGELIDAKI I., KARAKASHEV D., BATSTONE D., PLUGGE C., STAMS A. Biomethanation and Its Potential. *Water Science and Technology*, 327-351. 2011

ANGELIDAKI, I., ALVES, M., BOLZONELLA, D., BORZACCONI, L., CAMPOS, J. L., GUWY, A. J., KALYUZHNYI, S., JENICEK, P., VAN LIER, J. B. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, 59.5, 927-934. 2009

APHA-AWWA-WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association. 1998

ASTALS S., NOLLA-ARDÉVOL V., MATA-ALVAREZ. Anaerobic Co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions :Biogas and digestate. *Bioresource Technology*, 63-70. 2012

BERMÚDEZ J., CANOVAS M., MANJON A. IBORRA L., HOWELL J.A . La digestión anaerobia. España: Universidad de Murcia, secretariado de publicaciones. 1988 ISBN: 84-7684-102-7. 75p

BUJOCZEK G., OLESZKIEWICZ J., SPARLING R., CENKOWSKI S. High Solid Anaerobic Digestion of Chicken Manure. *Silsoe Research Institute*, 51-60. 2000

CARR M.,RIOS S. Modelamiento de la producción de metano a partir de co-digestion anaerobia de gallinaza de jaula con melaza de caña. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander. 2014

CASTILLO, E., VERGARA, M., CRISTANCHO, D., ARENAS L., MARTINEZ A., HERNANDEZ M., LUNA H., CASTILLOS J., SANDOVAL C. Digestión anaerobia una alternativa para el tratamiento de residuos sólidos urbanos. 2007

CHARLES W., WALKER L., CORD-RUWISHC R. Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 2329–2335. 2009

CHEN, Y., CHENG, J., CREAMER, K. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 4044–4064. 2008

CIRNE D G., PALOUMET X., BJORNSSON L., ALVES M., MATIASOON B. Anaerobic digestion of lipid-rich waste-Effects of lipids concentration. *Renawable Energy*, 965-975. 2007

DEEPANRAJ B., SIVASUBRAMANIAN V., JAYARAJ S. Biogas generation through anaerobic digestion process – an overview. *Research Journal Chemistry of Environment*, 80–93. 2014

DEPPENMEIER U. The unique biochemistry of methanogenesis . *Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology*, 223–283. 2002

EI-MASHAD H.M., ZEEMAN G., VAN LOON P., BOT A., LETTINGA G. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. *Bioresource Technology*, 191–201. 2004

ESCALANTE H., ORDUZ J., ZAPATA H., CARDONA M., DUARTE M. Atlas del potencial energetico de la biomasa residual en Colombia. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander . 2010

ESKICIOGLU C., GHORBANI M. Effect of inoculum/substrate ratio on mesophilic anaerobic digestion of bioethanol plant whole stillage in batch mode. *Process Biochemistry*, 1682–1687. 2011

ESTRADA M. Manejo y Procesamiento de la gallinaza. *Revista lasallista de Investigación* 2, 43-48. 2005

G, P. Mejoramiento del potencial de biometanizacion de la gallinaza de jaula a partir de la codigestión anaerobia con glicerol residual. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2013

G. BUJOCZEK., J. OLESZKIEWICZ., R. SPARLING., S. CENKOWSKI. High Solid Anaerobic Digestion of Chicken Manure. *Silsoe Research Institute*, 51-60. 2000

GANADERÍA BOVINA . Retrieved from Incoder: 2012<http://incoder.gov.co>

HANSEN K., ANGELIDAKI I., AHRING B. Anaerobic digestion of swine manure: Inhibition by ammonia. *Water Research*, 5-12. 1998

KALLOUM S., SALEM F., KOUKI H. Influence of Inoculums/Substrate Ratios (ISRs) on the Mesophilic Anaerobic Digestion of Slaughterhouse Waste in Batch Mode: Process Stability and Biogas Production. *Energy Procedia*, 57–63. 2014

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

KWON S.H., LEE D.H. . Evaluation of Korean food waste composting with fed-batch operations I: using water extractable total organic carbon content (TOC_w). *Process Biochemistry*, 1183–1194. 2004

L, C. Proceso Integral para la digestión anaerobia del bagazo de fique. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2012

LAMBIS L., GARCÍA, N. 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-sustrato. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2013

LEHTOMÄKI A., VIINNIKAINEN J., RINTALA J. Screening boreal energy crops and crop residues for methane biofuel production. *Biomass and Bioenergy*, 541-550. 2008

LI Y., ZHANG R., CHEN C., LIU G., HE Y., LIU X. Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, hemi-solid, and solid state conditions. *Bioresource Technology*, 406–412. 2013

LI Y., ZHANG R., HE Y., ZHANG C., LIU X., CHEN C., LIU G. Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover in batch. *Bioresource Technology*, 342-347. 2014

LIU C., YUAN X., ZENG G., LI W., LI J. Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 882–888. 2008

M, K. Ammonia inhibition in high-solids biogasification: An overview and practical solutions. *Environment Technology*, 355-365. 1999

MADIGAN M., MARTINKO J., P ARKER J., BROCK. *Biologia de los microorganismos*. Pearson Prentice Hall. 2006

MATA-ALVAREZ J., DOSTA J., ROMERO-GUIZAM S., FONOLL X., PECES M., ASTALS S. Critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 412-427. 2014

MATA-ALVAREZ J., MACÉ S., LLABRÉS P. Anaerobic digest of organic solid wastes an overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 3-16. 2000

MORALES E., MORONTA R., BERMUDEZ J., ROSALES N. Gallinaza: un residuo avícola como fuente alternativa para producción de biomasa microalgal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 41-48. 2007

POH E., CHONG X. Development of anaerobic digestion methods for palm oil mill effluent (POME) treatment. *Bioresource Technology* 100, 1–9. January 2009

RAJAGOPAL R., MASSÉ D., SHINGH G. A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia. *Bioresource Technology* , 632-64. 2013

RAPOSO F., BANKS C., SIEGERT I., HEAVEN S., BORJA; R. (). Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. *Process Biochemistry*, 1444–1450. 2006

RAPOSO F., BORJA R., MARTÍN M., RUBIA DE LA M A., RINCÓN B. Influence of inoculums-substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 70-77. 2009

SANTANDER, S. d. (). *Evaluaciones agropecuarias municipales . bucaramanga: Gobernacion de Santander.* 2010

SHIN H.S., HAN S.K., SONG Y.C., LEE Y. Performance of uasb reactor treating leachate from acidogenic fermenter in the two-phase anaerobic digestion of food waste. *Water Research*, 3441–3447. 2001

SPEECE R. E. *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatments.* USA: Archae Press. Septiembre 1996 Retrieved from <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es>

TRICASE C., LOMBARDI M. State of the art and prospects of Italian biogas production. *Renewable Energy*, 477-485. 2009

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

WANG K., YIN J., SHEN D., LII N. Anaerobic digestion of food waste for volatile fatty acids (VFAs) production with different types of inoculum: Effect of pH. *Bioresource Technology*, 395–401. 2014

WU X., YAO W.Y., ZHU, J., MILLER C. *Bioresource Technology*. Biogas and CH₄ productivity by codigesting swine manure with three crop residues as an external carbon source, 4042-4047. 2010

YAN N., ZAO C., CHEN W., LIU L., KUO Y. Selective degradation of wood lignin over noble-metal catalysts in two step process. *ChemSusChem*, Vol 1 626-629 . 2008

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

YEQING LI., RUIHONG ZHANG., YANFENG HE., CHENYU ZHANG., XIAOYING LIU., CHANG CHEN., GUANGQING LIU. Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover in batch. *Bioresource Technology*, 342-347. 2014

ZHANG, W.Z., CHI, L., LUO, Y.J., ZHANG, Z.Z., ZHANG, Z.J., WU, W.M. Enhanced methane production from Taihu Lake blue algae by anaerobic co-digestion with corn straw in continuous feed digesters. *Bioresour. Technol.*, 264–270. 2013

ANEXOS

Anexo A. Recolección de la muestra de gallinaza de jaula.

Materiales:

- Bolsa plástica con cierre hermético
- Cinta de enmascarar
- Espátula
- Recipientes plásticos de dos litros
- Guantes de látex
- Marcadores permanentes
- Nevera de icopor
- Tapa bocas

Procedimiento

La toma de muestras de gallinaza se debe realizar antes de ser llevada a la plant de abonos, preferiblemente en la jornada de la mañana.

1. Con una espátula tomar las muestras de gallinaza hasta llenar la totalidad de las bolsas y cerrar inmediatamente.
2. Rotular las bolsas con las muestras con lugar y fecha de toma de muestra.
3. Trasladar las muestras hasta el laboratorio en las neveras icopor.
4. En el laboratorio envasar las muestras en recipientes plásticos y refrigera

Anexo B .Protocolo de toma de muestra de Residuos Agrícolas y Sobrantes Alimenticios de Restaurante

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

Anexo C. Protocolo de dilución de sólidos de los SAR

Se realizó una dilución de los sólidos de los residuos sobrantes de comedores (SAR) con el objetivo de tener un mejor manejo en el experimento (reducción de la viscosidad).

De un balance de masa se tiene que:

$$\frac{ST_i}{1000+W_{H_2O}} = ST_f \quad (1) \quad \text{Y} \quad \frac{SV_i}{1000+W_{H_2O}} = SV_f \quad (2)$$

Dónde:

ST_i= sólidos totales **antes** de dilución (iniciales) de los RSC en [g/kg]

SV_i= sólidos volátiles **antes** de dilución (iniciales) de los RSC en [g/kg]

ST_f= sólidos totales **después** de dilución (finales) de los RSC en [g/kg]

SV_f= sólidos volátiles **después** de dilución (finales) de los RSC en [g/kg]

W_{H₂O}=Masa de agua que debe agregarse

Nótese que en las ecuaciones (1) y (2) se puede obtener un factor unitario para hacer diluciones con una masa de RSC diferente de 1000g al cual llamaremos α y se presenta en la ecuación (3).

$$\frac{W_{H_2O} \text{ g de Agua}}{1000 \text{ g de RSC}} = \alpha \quad (3)$$

PROCEDIMIENTO

1. Calcular el factor α para un valor de ST o SV deseado.

2. Calcular la cantidad de agua de dilución como: $(\text{Masa de sustrato}) \cdot (\alpha)$
3. Agregar la cantidad de agua de dilución calculada a los RSC sin diluir y revolver hasta homogenización.
4. Realizar el protocolo experimental de determinación de cantidad de ST y SV para corroborar el resultado.

Anexo D. Caracterización fisicoquímica SAR



ASISTENCIA TÉCNICA AGRÍCOLA
FOJARR
SUELOS
AGUAS
CONTROL DE CALIDAD

Bogotá, 9 de Octubre del 2014

ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

Muestra No. 17240

Empresa: Universidad Industrial de Santander
 Descripción: Residuos Agroindustriales
 Identificación: Muestra 3
 Otros datos: Proyecto Valoración Energética de Residuos.
 Características: Líquido espeso color rosado claro
 Procedencia: Bucaramanga, Santander

Orden de T# 52076

RESULTADOS ANALÍTICOS

	Resultados	
	Base Húmeda	Base Seca
Humedad, %	79,74	
ANÁLISIS ELEMENTAL		
Carbono, C, %	8,98	44,34
Hidrógeno, H, %	1,08	5,32
Oxígeno, O, %	7,54	37,23
Nitrógeno, N, %	0,68	3,36
Azufre, S, %	0,09	0,45
Poder Calorífico Inferior, Kcal/kg en base húmeda(Dulong)	769	

NOTA: El presente reporte preliminar ha sido tomado de la base de datos donde reposan los resultados analíticos y corresponde fielmente a la muestra analizada.


 Felipe Calderón Sáenz
 Director General T.P.3185

Anexo E. Caracterización fisicoquímica GJ



ASISTENCIA TÉCNICA AGRÍCOLA
CONTROL DE CALIDAD
FOURRA
SUELOS
AGURS

Bogotá D.C., 10 de Julio del 2015

ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

Muestra No. 18266
 Empresa: Universidad Industrial de Santander
 Descripción: Gallinaza
 Identificación: Ga
 Características: Producto café oscuro
 Procedencia: Bucaramanga - Santander
 Orden de T# 53837

RESULTADOS ANALÍTICOS

	Resultados	
	Base Húmeda	Base Seca
Humedad, %	78,31	
ANÁLISIS ELEMENTAL		
Carbono; C; %	6,09	28,06
Hidrógeno; H; %	0,79	3,65
Oxígeno; O; %	5,84	26,91
Nitrógeno; N; %	0,55	2,52
Azufre; S; %	0,10	0,44
Amonio; mg/kg	843,5	

NOTA: El presente reporte preliminar ha sido tomado de la base de datos donde reposan los resultados analíticos y corresponde fielmente a la muestra analizada.



Felipe Calderón Sánchez
 Director General T.P. 3186

Anexo F. Caracterización fisicoquímica RA



ASISTENCIA TÉCNICA AGRÍCOLA
FOFORA
SUELOS
AGUAS
CONTROL DE CALIDAD

Bogotá, 9 de Octubre del 2014

ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

Muestra No. 17238

Empresa: Universidad Industrial de Santander
Descripción: Residuos Agroindustriales
Identificación: Muestra 1
Otros datos: Proyecto: Valoración Energética de Residuos
Características: Producto gris oscuro con material vegetal
Procedencia: Bucaramanga, Santander
Orden de T#: 52076

RESULTADOS ANALÍTICOS

	Resultados	
	Base Húmeda	Base Seca
Humedad, %	77,38	
ANÁLISIS ELEMENTAL		
Carbono; C; %	4,97	21,95
Hidrógeno; H; %	0,59	2,63
Oxígeno; O; %	4,17	18,44
Nitrógeno; N; %	0,85	3,76
Azufre; S; %	0,10	0,44
Poder Calorífico Inferior; Kcal/kg (Dulong) en base húmeda	426	

NOTA: El presente reporte preliminar ha sido tomado de la base de datos donde reposan los resultados analíticos y corresponde fielmente a la muestra analizada.


Felipe Calderón Saenz
Director General T.P. 3186

Anexo G. Caracterización fisicoquímica EF



ASISTENCIA TÉCNICA AGRÍCOLA
CONTROL DE CALIDAD
FOFIRA
SUELOS
AGUAS

Bogotá D.C., 03 de Junio de 2015

ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

Muestra No. 18124

Empresa: Universidad Industrial de Santander
Descripción: Estiercol
Identificación: E2
Características: Producto sólido color café con alto contenido de humedad
Procedencia: Bucaramanga, Santander Orden de T# 53599

RESULTADOS ANALÍTICOS

	Resultados	
	Base Húmeda	Base Seca
Humedad; %	85,71	
ANÁLISIS ELEMENTAL		
Carbono; C; %	5,70	39,89
Hidrógeno; H; %	0,68	4,78
Oxígeno; O; %	4,79	33,50
Nitrógeno; N; %	0,21	1,44
Azufre; S; %	0,03	0,19

NOTA: El presente reporte preliminar ha sido tomado de la base de datos donde reposan los resultados analíticos y corresponde fielmente a la muestra analizada.



[Signature]
Felipe Calderón Saenz
Director General T.P.3186

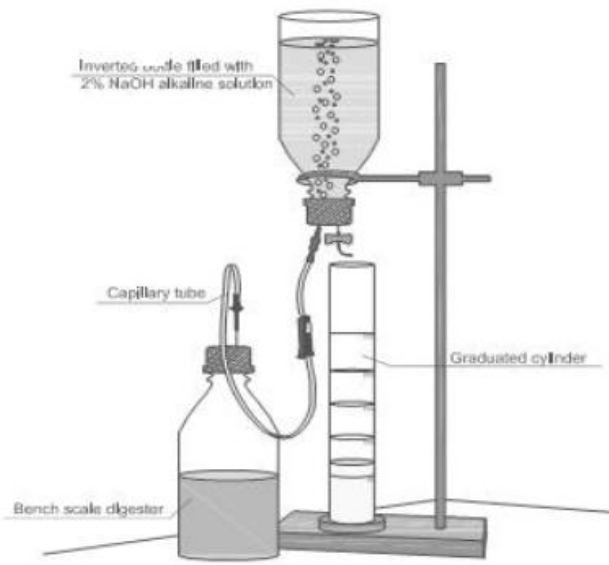
Anexo H. Método de desplazamiento alcalino

Materiales:

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

Procedimiento:

Cada reactor se conecta con la botella de desplazamiento alcalino por medio de una red de mangueras de plástico y agujas como se muestra en el esquema. El biogás producido en el reactor se burbujea en la solución alcalina con fenolftaleína como indicador y pH mayor que 12, en la cual el CO₂ 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 y otros gases en menor proporción generados por el sistema.



Esquema de montaje para la medición de volumen de metano.

Cálculo del volumen de biogás a condiciones normalizadas (VNTP).

Para poder comparar las producciones de biogás y por lo tanto el redimiendo, es necesario llevar el volumen de biogás a condiciones normalizadas.

$$VNTP = V * (Patm - P * V) * To * Po * T$$

V = Volumen de gas generado (mL).

$Patm$ = Presión atmosférica.

To = Temperatura estándar 273,15 (K).

Po = Presión estándar 1013.25 (mbar).

PV = Presión de vapor del agua.

Temperatura al momento de medir (K)

$$. PV = 10 * e^{(16.573 - (\frac{3988.42}{39.47 + T(^{\circ}K))})}$$

Anexo I. 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 400 μ L de reactivo a 200 μ L de muestra y 200 μ L de agua destilada usando tubos de ensayo tapa rosca.
- Someter a baño maría durante 5 minutos.
- Detener la reacción con choque térmico en un baño de hielo.
- Agregar 5 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 absorbancia 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 J. Determinación de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), y alcalinidad total (AT)

La determinación de los ácidos grasos volátiles se realiza 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 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 punto de burbuja 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 CaCO₃/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 K. 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 rumen o lodos aislados en procesos de tratamientos de aguas limpias y residuales entre otros.

Instrumentos:

- Placas de evaporación o cápsulas de cerámica
- Horno de mufla para operar a $550\pm 50^{\circ}\text{C}$
- Horno de secado operar a $103-105^{\circ}\pm 1\text{C}$
- Balanza de análisis

Procedimiento:

Sólidos volátiles

Ingresar un volumen conocido en una placa de evaporación limpia en un horno de secado a 105°c durante 24 horas

Análisis de la muestra

- Sólidos totales
- Caliéntese la placa en un horno a $103-105^{\circ}\text{C}$ durante una hora.
- Enfríense en el desecador, pése y consérvese en el desecador hasta que haya de usarse.

Análisis de la muestra

Muestra líquida: agítese para homogeneizarla, a continuación colóquese de 20 a 50 mL en una placa de evaporación y péseese, séquese a 103-105°C, durante un día, enfríese para equilibrar la temperatura en un desecador individual con desecante activo y péseese. Transfírase la muestra hasta un horno frío y caliéntese hasta 550±50°C e incinérese durante una hora, enfríese en desecador para equilibrar la temperatura y péseese.

Cálculos:

- % de sólidos totales= $(A-B) \times 100 / (C-B)$
- %sólidos volátiles= $(A-D) \times 100 / (A-B)$
- A= peso del residuo seco+ placa, mg
- B= peso de la placa
- C= peso de la muestra húmeda más la placa, mg
- D= peso del residuo + placa después de ignición, mg