

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE
RECURSOS NATURALES



EFICIENCIA DE LA PRODUCCIÓN DE
BIOGAS A PARTIR DE RESIDUOS
ACEITOSOS DE FRITURA

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

AUTORES:

HERNÁN VILLANUEVA FERNÁNDEZ

JENNIFER MUSAI HINGA BLAS

ASESOR: Dr. MÁXIMO FIDEL BACA NEGLIA

Callao, octubre del 2018

PERÚ

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES

COMISION DE GRADOS Y TITULOS
ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS PARA OPTAR EL
TITULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES
N° 009-2018-JEDT-FIARN

Siendo las 15:50 horas del día lunes 29 de octubre de 2018, en el Auditorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales ubicado en la Av. Juan Pablo II 306-Bellavista-Callao; se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada "EFICIENCIA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS A PARTIR DE RESIDUOS ACEITOSOS DE FRITURA" presentada para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales de los Bachilleres Hernán Villanueva Fernández y Jennifer Musai Hinga Blas.

Contando con la asistencia del Jurado Evaluador y Asesor a fin de dar cumplimiento a la Resolución N° 069-2018-D-FIARN de fecha 24 de octubre de 2018, los mismos que están integrados por los siguientes docentes:

Mg. Teófilo Allende Ccahuana	Presidente
Lic. Janet Mamani Ramos	Secretaria
Blgo. Abelardo Virgilio Martin Isla Medina	Vocal
Dr. Máximo Fidel Baca Neglia	Asesor

Terminada la exposición y la absolución de las preguntas del Jurado Evaluador, se invita a los Bachilleres y al público en general se retiren del Auditorio para las deliberaciones del caso.

Luego de las deliberaciones el Jurado Evaluador acuerda **APROBAR POR UNANIMIDAD**, no habiendo observación alguna con el Calificativo de **MUY BUENO** y con ello dar por concluido el proceso de Sustentación de Tesis.

En señal de conformidad firman el Jurado Evaluador y Asesor, siendo las 16:50 horas del día 29 de octubre de 2018.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
OFICINA DE SECRETARIA GENERAL
EL SECRETARIO GENERAL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO que suscribe, UCHIFCA, Lic. Janet Mamani Ramos
Mg. Teófilo Allende Ccahuana, Presidente
Lic. Janet Mamani Ramos, Secretaria
Blgo. Abelardo Virgilio Martin Isla Medina, Vocal
Dr. Máximo Fidel Baca Neglia, Asesor
Calle 6 del 2018 del 2018



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
Oficina de Secretaria General
Lic. Cesar Guillermo Jauregui Villafuerte
Secretario General

DEDICATORIA

A las personas más importantes de mi vida, mis padres Marcelino Villanueva Sánchez y Marcelina Fernández Tocas, por su infinito apoyo y motivación para alcanzar una de mis metas, y a mis hermanos Marlet, Ederfrey, Samuel y Mequías; a ellos les dedico este pequeño logro.

Hernán Villanueva.

DEDICATORIA

Para conseguir las cosas que nunca pensaste que tendrías, es necesario hacer cosas que nunca pensaste que podrías hacer, quiero agradecer a mis padres Bertha Blas Espinoza y Miguel Hinga Paz por sus sabios consejos, su infinito apoyo, motivación y paciencia; por hacer de mí una mejor persona cada día.

A mis hermanos Miguel, Gonzalo y Valery.

A mis amigos, compañeros y colegas por compartir sus experiencias que me ayudaron en la continuación de mis objetivos.

Jennifer Hinga.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, nuestro agradecimiento a nuestro Dios por su guía suprema y la bendición de cada día, sin la cual no hubiésemos podido alcanzar esta meta.

Expresamos nuestro agradecimiento al Dr. Máximo Fidel Baca Neglia, Asesor de esta Investigación, por su orientación, colaboración, motivación y respaldo durante la realización del trabajo.

Al Mg. Alex Pilco Nuñez, por su orientación y gran aporte durante el desarrollo de la investigación.

Al Mg. Teófilo Allende Ccahuana, por el interés, apoyo, crítica y sugerencias, necesarias para la realización de este trabajo.

Al Frigorífico Camal "La Colonial", por su colaboración para la realización de esta investigación.

A cada uno de los profesores de la FIARN que nos orientaron para alcanzar esa meta, muchas gracias.

Los autores.

INDICE

TABLAS DE CONTENIDO	2
LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE GRÁFICOS	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	7
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	8
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	9
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.4. JUSTIFICACIÓN	9
1.5. IMPORTANCIA	10
1.6. LIMITACIONES	11
II. MARCO TEORICO	12
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	12
2.2. BASES TEÓRICAS	17
III. VARIABLES E HIPOTESIS	48
3.1. VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN	48
3.2. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	48
3.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	49
IV. METODOLOGÍA	50
4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	50
4.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	50
4.3. POBLACIÓN Y MUESTRA	54
4.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	55
4.5. PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	60
4.6. PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE DATOS	72
V. RESULTADOS	76
VI. DISCUSION DE RESULTADOS	94
6.1. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS CON LOS RESULTADOS	94
6.2. CONTRASTACIÓN DE RESULTADOS CON OTROS ESTUDIOS SIMILARES	94
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
IX. ANEXOS	108

TABLAS DE CONTENIDO

TABLA N° 01:	Los cambios químicos ocurren en el aceite vegetal durante el proceso de freír	17
TABLA N° 02:	Composición del biogás	21
TABLA N° 03:	Etapas de reacción química en un biodigestor anaeróbico	22
TABLA N° 04:	Productos químicos usados para ajustar la alcalinidad	39
TABLA N° 05:	Tiempo de Retención según temperatura	41
TABLA N° 06:	Tiempos aproximados de generación de grupos importantes de bacterias de aguas residuales	42
TABLA N° 07:	Relación C/N de algunos materiales orgánicos	44
TABLA N° 08:	Indicadores operacionales de las variables	49
TABLA N° 09:	Relación Estiércol/Agua	52
TABLA N° 10:	Diseño y niveles de tratamiento	53
TABLA N° 11:	Materiales seleccionados	63
TABLA N° 12:	Resultados de la determinación de sólidos totales (ST)	64
TABLA N° 13:	Resultados del análisis de parámetros físicos y químicos de los residuos aceitoso de fritura	77
TABLA N° 14:	Valores de presión interna en los biodigestores	78
TABLA N° 15:	Anova	79
TABLA N° 16:	Resultados de la prueba de Tukey	80
TABLA N° 17:	Configuración de los tratamientos para determinar la frecuencia más adecuada de inoculación de residuos aceitosos de fritura	81
TABLA N° 18:	Presiones para cada tratamiento	82
TABLA N° 19:	Anova	83
TABLA N° 20:	Comparación entre tratamientos A y D	83
TABLA N° 21:	Comparación entre tratamientos C y E	84
TABLA N° 22:	Comparación entre tratamientos A y C	85
TABLA N° 23:	Producción de biogás	86
TABLA N° 24:	Anova	87
TABLA N° 25:	Resultados de la prueba de Dunnett	88
TABLA N° 26:	Producción acumulativa de biogás	88
TABLA N° 27:	Volumen acumulado de biogás en litros	89
TABLA N° 28:	Registro del pH	91
TABLA N° 29:	Análisis cromatográfico de biogás al día 7	92
TABLA N° 30:	Análisis cromatográfico de biogás al día 30	92

LISTA DE FIGURAS

FIGURA N° 2.1:	Reacciones bioquímicas críticas del proceso de digestión anaeróbica y la producción del metano	24
FIGURA N° 2.2:	Esquema de las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica	26
FIGURA N° 2.3:	Temperatura VS producción de metano	34
FIGURA N° 2.4:	Equilibrio entre el ácido carbónico, la alcalinidad del bicarbonato y la alcalinidad del carbonato, así como el amoníaco y los iones de amonio	37
FIGURA N° 4.1:	Recolección de estiércol de bovino	54
FIGURA N° 4.2:	Biodigestor construido de tubo de PVC 4"	58
FIGURA N° 4.3:	Biodigestor construido de botella PET	59
FIGURA N° 4.4:	pH-metro digital	60
FIGURA N° 4.5:	Termohigrómetro digital	61
FIGURA N° 4.6:	Manómetro tipo bourdon	61
FIGURA N° 4.7:	Almacenamiento de muestras de biogás	62
FIGURA N° 4.8:	Determinación de biogás por el método del desplazamiento de volumen	73
FIGURA N° 4.9:	Equipo Cromatógrafo de Gases	74
FIGURA N° 5.1:	Prueba de llama del biogás	93

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO N° 5.1:	Presión interna (mbar) en biodigestores cargados con diferentes relaciones de estiércol/agua	79
GRÁFICO N° 5.2:	Presiones internas para cada tratamiento	82
GRÁFICO N° 5.3:	Comparación entre los tratamientos A y D	83
GRÁFICO N° 5.4:	Comparación entre los tratamientos C y E	84
GRÁFICO N° 5.5:	Comparación entre los tratamientos A y C	85
GRÁFICO N° 5.6:	Producción diaria de biogás	87
GRÁFICO N° 5.7:	Producción acumulativa de biogás	89
GRÁFICO N° 5.8:	Comportamiento del pH	91

RESUMEN

La presente investigación titulada "Eficiencia de la producción de biogás a partir de residuos aceitosos de fritura", ha sido desarrollada en razón de que el uso de los residuos aceitosos de fritura en biodigestores es una alternativa para aumentar la producción de biogás. La mayoría de los investigadores se centran principalmente en la generación de biodiesel a partir de los residuos aceitosos de fritura; sin embargo, existen otras alternativas importantes de aplicación como es su reaprovechamiento en la producción de biogás.

El objetivo de este estudio fue analizar el uso de los residuos aceitosos de fritura en la producción de biogás. Los experimentos se llevaron a cabo usando biodigestores tipo batch de 3 L con 2.4 L de volumen de operación, con tres tratamientos (A, B y C) cada uno cargado con mezcla de estiércol de vaca y agua en una proporción 1:2. Semanalmente se añadió residuos aceitosos de fritura al 2.5% y 5% a los tratamientos A y C, respectivamente; mientras que B fue el tratamiento control. La producción del biogás se evaluó durante 30 días a temperatura ambiental que osciló entre 25 a 30°C, el volumen del biogás producido se midió por el método del desplazamiento de volumen y el contenido de metano se cuantificó mediante la técnica de cromatografía de gases. Se encontró que el tratamiento C que trabajó con la inoculación de un 5% de residuos aceitosos de fritura, generó mayor producción de biogás acumulado, alcanzando 16.97 L y en cuanto al contenido de metano alcanzo un 52.9%; mientras que A y B alcanzaron 10.65 L y 10.28 L de biogás acumulado y 50.55% y 44.9% en cuanto al contenido de metano, respectivamente. Esta investigación demostró que la adición de los residuos aceitoso de fritura sí aumenta la producción de biogás.

Palabras claves: *biogás, residuos aceitosos de fritura y problema medioambiental.*

ABSTRACT

The present research entitled "Efficiency of the production of biogas from oily frying residues", has been developed because the use of oily waste frying in biodigesters is an alternative to increase the production of biogas. Most of the researchers focus mainly on the generation of biodiesel from oily frying residues, although there are other important alternatives for application such as reuse in the production of biogas.

The objective of this study was to analyze the use of oily frying residues in the production of biogas. The experiments were carried out using batch type biodigesters of 3 L with 2.4 L of operation volume, with three treatments (A, B and C) each loaded with mixture of cow manure and water in a 1: 2 ratio. Oily frying residues at 2.5% and 5% were added weekly to treatments A and C, respectively; while B was the control treatment. The biogas production was evaluated during 30 days at ambient temperature that oscillated between 25 to 30 ° C, the volume of the biogas produced was measured by the volume displacement method and the methane content was quantified by the gas chromatography technique. It was found that the treatment C that worked with the inoculation of 5% of oily frying residues, generated higher accumulated biogas production, reaching 16.97 L and in the methane content reached 52.9%; while A and B reached 10.65 L and 10.28 L of accumulated biogas and 50.55% and 44.9% in terms of methane content, respectively. This research showed that the addition of oily waste from frying does increase the production of biogas.

Keywords: biogas, oily frying residues and environmental problem.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación del problema.- El crecimiento de la población mundial, la industrialización y el consumo creciente de recursos naturales están produciendo niveles de desechos orgánicos cada vez más altos (Mata y Merino, 1990).

La mayoría de los desechos orgánicos no tiene un tratamiento adecuado, o la búsqueda de su mejor uso representa altos costos, y que muchas veces terminan en el medio ambiente contaminando cuerpos de agua y suelos. Tal es el caso de los residuos aceitosos de fritura provenientes de los restaurantes, viviendas o industrias que tienen como destino la red de las alcantarillas con las debidas consecuencias como malos olores, obstrucción en las alcantarillas, disminución de la cantidad de oxígeno disuelto afectando negativamente a la supervivencia de la vida acuática; además se sabe que por cada litro de aceite comestible usado que es vertido indiscriminadamente se contamina alrededor de 1000 litros de agua (INTI, 2012).

El problema de contaminación por los residuos aceitosos de fritura se agravará aún más con el tiempo si no se toman las acciones necesarias para su aprovechamiento, tratamiento y/o disposición adecuada; cabe citar que el consumo de aceite vegetal entre los años 1980 y 2000 aumentó rápidamente, en un 3.5 %, casi dos veces más que la población

mundial, la cual aumentó en 1.6 % (Abass O. Alade, Ahmad T. Jameel, Suleyman A. Muyubi, Mohamed I. Abdul Karim And Md. Zahangir Alam, 2011, p. 162), por consiguiente, se entiende que aumentó la generación de residuos aceitosos de fritura.

Actualmente existen alternativas para el aprovechamiento de los residuos aceitosos de fritura en la producción de combustibles, por sus características químicas que presentan estos residuos de altos potenciales energéticos (Schanbacher et al., 2005, citado en Díaz, Kreling, Botero y Murillo, 2006), la grasa vegetal posee un alto potencial energético debido a su composición química y alto contenido de lípidos degradables por bacterias anaeróbicas; por lo que al ser utilizadas en biodigestores para la producción de biogás, las grasas vegetales pueden elevar la producción de biogás de biodigestores operados con excretas animales.

El presente estudio pretende demostrar una alternativa de uso para los residuos aceitosos de fritura, mediante la incorporación en los procesos de transformación de biomasa en biodigestores para la producción del biogás.

1.2. Formulación del problema.-

¿El uso de residuos aceitosos de fritura permitirá aumentar la producción de biogás?

1.3. Objetivos de la investigación.-

1.3.1. Objetivo general

Analizar el uso de los residuos aceitosos de fritura en la producción de biogás.

1.3.2. Objetivos específicos.-

- a) Caracterizar física y químicamente los residuos aceitosos de fritura.
- b) Cuantificar la producción de biogás por el método de desplazamiento de volumen de agua por el biogás hacia una jarra graduada.
- c) Cuantificar la composición del biogás producido en función de %CH₄, CO₂, mediante la cromatografía de gases.

1.4. Justificación.- La presente investigación surge debido a la necesidad de proponer una alternativa de solución para los residuos aceitosos de fritura mediante su reaprovechamiento en la producción de biogás. Pues los residuos aceitosos de fritura que se generan en comedores, restaurantes, en casas, etc. habitualmente son vertidos a las redes del alcantarillado produciendo serios problemas ambientales debido a su lenta degradación.

Esta investigación constituye un aporte teórico de la temática estudiada; asimismo servirá como una fuente de consulta para futuras investigaciones sobre temas relacionados al que se estudia en esta

oportunidad y los datos obtenidos en este estudio pueden resultar de interés para empresas e instituciones dedicadas a proyectos de generación de biogás; por lo que, se justifica el desarrollo de la presente investigación.

Por lo tanto, en un futuro, el desarrollo y la implementación de la alternativa del uso de residuos aceitosos de fritura en la producción de biogás a gran escala, además generaría beneficios ambientales, energéticos y económicos, contribuyendo a reducir los impactos negativos que causa la eliminación de dichos residuos al ambiente.

1.5. Importancia.- Con el reaprovechamiento de residuos aceitosos de fritura en la producción de biogás, se aportará a la disminución de la liberación de dichos residuos al medio ambiente que afectan negativamente a los componentes del ambiente (agua y suelo), sistemas naturales, físicos o biológicos, componentes de las redes de alcantarillado, etc.

La aplicación del uso de residuos aceitosos de fritura en la producción de biogás puede ser realizado en zonas rurales, en donde generalmente se implementan biodigestores a gran escala; el cual contribuye al cuidado la salud de las personas, ya que evita el uso de la leña que tiene efectos negativos en el medio social y en el medio ambiente. Además, se cree que el uso de leña y otras formas de biomasa como combustibles para cocinar está directamente relacionado con la exposición a partículas

peligrosas del humo que producen estos combustibles al quemarse (Gautam et al., 2009).

1.6. Limitaciones.- Debido a que la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao no cuenta con equipos de medición y de análisis en sus laboratorios que fueron necesarios para la realización del proyecto, los análisis de laboratorio fueron realizados en instituciones externas siendo los costos enteramente asumidos por los investigadores.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio.-

2.1.1. Valorización integral de los residuos procedentes del procesado de aceites vegetales usados (AVUs), España.- El proyecto tuvo como objetivo principal revalorizar los residuos de los aceites vegetales usados mediante la tecnología de digestión anaerobia de los residuos y subproductos generados durante el refinado de aceites vegetales usados (AVU) con la finalidad de cerrar el ciclo y obtener cero residuos en el proceso global de reciclado de estos aceites. El proceso se llevó a cabo en un digestor anaerobio automatizado de escala semi industrial de 1.2 m³ de capacidad, se empleó como sustrato el purín de cerdo con la adición de los residuos de los AVUs, en una proporción de 5 a 1 (purín/mezcla de residuos AVU). El reactor utilizado fue discontinuo calefactado a 35°C, el proceso se dio en dos fases, una primera fase para reacciones acidogénicas y la segunda para las reacciones metanogénicas. En un primer arranque, la fase acidogénica con un tiempo de retención de 4.5 a 3 días con pH entre 5 a 6, y la fase metanogénica con un tiempo de retención de 25 a 17 días y pH en el rango de 7 a 7.5. Un segundo arranque se realizó a las mismas condiciones; como resultado final se obtuvo

para el primer arranque, la eliminación de sólidos volátiles de 55%, eliminación de DQOs del 75% y la obtención de metano (CH₄) en biogás del 65%. Y los resultados del segundo arranque fueron: eliminación de sólidos volátiles de 60% de, eliminación DQOs del 80%, y la obtención de metano (CH₄) en biogás del 65% (Ordax de Castro, 2013).

2.1.2. Evaluación de la productividad y del efluente de biodigestores suplementados con grasas residuales, en la Universidad EARTH, Costa Rica.- El estudio planteó desarrollar un sistema que permita el aprovechamiento de las grasas residuales en biodigestores para aumentar la producción y calidad del biogás. El experimento se realizó en biodigestores tipo Taiwán, de flujo continuo, contruidos con polietileno tubular transparente de 250 L de capacidad cada uno, siendo el 80% fase líquida y el 20% fase gaseosa, fueron instalados en fosas de tierra sobre el nivel del suelo. Se emplearon tres tratamientos por cuadruplicado, el tratamiento testigo (T₀) que solamente consistía en mezcla de boñiga y agua; T₂ y T₅ con mezcla de boñiga y agua suplementado con un 2.5 % y 5 % v/v de aceite residual desechado del proceso de fritura del comedor de la Universidad EARTH. El periodo de adaptación fue de 50 días y un tiempo de retención de 20 días, diariamente se alimentaba con 10 L de la mezcla (relación 3 a 1)

de agua con heces frescas de bovino (que contenía 20% de materia seca) y con la adición de aceite residual de fritura. Finalizada el proceso de transformación de la materia en los biodigestores, 56 días luego de estabilización, como resultado se obtuvo que T₀ presentó 69% de metano (CH₄), el T₂ 74% de CH₄ y el T₅ un 76% de CH₄. Al adicionar 5% de aceite residual se logró aumentar la producción de biogás en 95.5% con relación al T₀. También, se determinó que la materia orgánica se redujo significativamente. Así demostrándose que la biodigestión anaerobia es una alternativa muy buena para el tratamiento de las grasas residuales (Días et al., 2007).

2.1.3. Producción de biogás mediante digestión anaerobia de aguas residuales provenientes de la industria palmera, Colombia.- El trabajo evaluó el potencial de la producción de metano utilizando efluente de aceite de palma como sustrato, con el objetivo de evaluar las condiciones operativas para la digestión anaerobia como el pH y el tiempo de degradación que maximizan la producción de metano. Se utilizaron dos inóculos diferentes, el primero llamado inóculo PP, que era una mezcla de lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales y el estiércol de cerdo (en una relación 1:1 v/v). La segunda llamada inóculo LP, donde se utilizó lodo anaeróbico procedente de los

estanques de oxidación de la misma industria de molino de aceite de palma. Los experimentos se llevaron a cabo usando reactores discontinuos de 500 mL con 300 mL de volumen de operación por triplicado. La producción de metano se evaluó durante 30 días a $37 \pm 2^\circ\text{C}$, midiendo el volumen de metano producido por el método de desplazamiento alcalino utilizando una botella de Mariotte llena de NaOH 0,1N para la retención de CO_2 . Se encontró que la mezcla 1:1 v/v lodo anaerobio de planta de tratamiento de aguas residuales urbanas y estiércol de cerdo usado como inóculo, generó la mayor producción de metano acumulado, alcanzando 2,740 mL de metano ($0.343 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$), utilizando una relación de 2 g SV de inóculo/g SV de sustrato, sin necesidad de neutralizar el pH del sistema. Esta investigación demostró que es viable la producción de metano por digestión anaerobia utilizando como sustrato el efluente del molino de aceite de palma y otros residuos como inóculos, lo que permite resolver problemas de contaminación y usos inadecuados del suelo en el medio ambiente (Alcida et al., 2012).

2.1.4. Utilización de un residuo de una especie de aceite vegetal para la producción de biogás, India.- Estudiaron la producción de biogás a partir de los subproductos de la fruta hingan (*Balanites Aegyptiaca*), una especie potencial de aceite

vegetal considerado para la elaboración del biodiesel. Utilizaron la cubierta externa de hingan que contribuye con aproximadamente el 10 a 13% de la masa total de la fruta para la producción de biogás. La producción de biogás se llevó a cabo en dos biodigestores de 20 L, los cuales inicialmente fueron cargados con efluente de tanque séptico (mezcla de desechos humanos y agua) hasta la capacidad de 10 L, el pH se ajustó a 7 por adición de cal. Para estimular el crecimiento bacteriano, se añadió diariamente 200 mL de solución de alimentación (a base de papa que contiene almidón y glucosa). La producción de biogás a partir de hingan se llevó a cabo en reactor I y reactor II utilizando hingan seco en polvo más estiércol de vaca y solamente hingan, respectivamente. El hingan contienen lignina, por lo que previamente recibió pretratamiento alcalino en una jarra plástica de 500 mL; luego el polvo seco de hingan (80%) más estiércol fresco de vaca (20%) mezclaron en agua dulce y fue transferido al reactor I, luego eliminando la misma cantidad de contenido del reactor de metano, esto se repitió por 55 días. Para el reactor II, el polvo de hingan recibió pretratamiento alcalino y se utilizó como material de alimentación en el reactor II, esto se repitió por 55 días. Después de cargar los biodigestores, en el segundo día comenzó a producir biogás, sin embargo, dependiendo de la estación, tardó alrededor de 6 a 8 días para la estabilización del proceso de digestión. Se observó una ligera

variación en el rendimiento de gas en los dos biodigestores. El biodigestor I con material de alimentación hingan más estiércol de agua, dio un rendimiento medio de 35.03 L/kg y un rendimiento máximo de 54 L/kg de combinación; mientras el reactor II que fue alimentado con 100% de biomasa de hingan dio un rendimiento medio de gas de 34.35 L/kg y un rendimiento máximo de 52 L/kg de material de alimentación. El ligero aumento en el rendimiento medio de biogás en el caso del reactor I se debió al mayor número de microorganismos fermentativos presentes en el estiércol fresco de vaca que fue utilizado (Bhuyar et al., 2009).

2.2. Bases teóricas.-

2.2.1. Residuos aceitosos de fritura.- Son productos lipídicos de origen vegetal, utilizados en acciones de cocción y fritura, el cual se desnaturaliza por las altas temperaturas, modificando sus características organolépticas y fisicoquímicas del producto de origen, produciendo modificaciones en la composición de los ácidos grasos saturados que lo forman. Los cambios fisicoquímicos que se producen en el aceite de cocina incluyen principalmente, cambio de color, olor, viscosidad y cantidad de calorías (Man, Keat, y Abdul, 2010). Según Mangesh y Ajay (2006) también contiene partículas y cantidades aumentadas de sólidos polares totales,

moléculas poliméricas a medida que experimenta reacciones químicas (Panadare y Rathod, 2015).

**TABLA N° 01
LOS CAMBIOS QUÍMICOS OCURREN EN EL ACEITE VEGETAL
DURANTE EL PROCESO DE FREÍR**

	Reacciones químicas	Causa de la reacción	Cambio en la composición química
1	Hidrólisis	El contenido de agua en el alimento interactúa con el aceite de fritura a alta temperatura, la reacción con la humedad atmosférica	Aumento de la concentración de moléculas polares totales, producción de ácidos grasos libres, glicerol
2	Degradación térmica	La degradación de triglicéridos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno	Produce alcanos, alquenos, cetonas simétricas, ésteres oxopropilicos, CO y CO ₂ , compuestos diméricos
3	Oxidación	Reacción con aire atmosférico / oxígeno.	Formación de hidroperóxido, cambio en el contenido de dienos y trienos conjugados.
4	Polimerización	Reacciones con grupos acilo grasos insaturados a alta temperatura	Formación de triacilglicéridos polimerizados (PTG) Incluyendo dímeros y oligómeros.

Fuente: Traducido de C. Panadare y V. K. Rathod, 2015.

Los residuos aceitosos de fritura, por sus características químicas que presentan estos residuos de altos potenciales energéticos, actualmente se viene reaprovechando principalmente en la elaboración del biodiesel (Dias et al., 2007); sin embargo, existen muchas aplicaciones de los residuos aceitosos de fritura que aún no se explotan comercialmente a gran escala en comparación con el biodiesel. Los residuos aceitosos de fritura pueden utilizarse

como fuente de energía para diversas otras aplicaciones, como la producción de gas hidrógeno, la producción de petróleo pirolítico y la generación de electricidad. Algunos procesos químicos también pueden convertir a los residuos aceitoso de fritura en productos comercialmente importantes como los biolubricantes, las resinas, los polímeros biodegradables (Panadare y Rathod, 2015).

La grasa vegetal posee un alto potencial energético debido a su composición química y alto contenido de lípidos degradables por bacterias anaeróbicas que, al ser utilizadas en biodigestores para la producción de biogás, las grasas vegetales pueden elevar la producción de biogás de biodigestores operados con excretas animales (Schanbacher et al., 2005, citado en Días et al., 2007).

K. Khalisanni, K. Khalizani, M.S. Rohani y P.O. Khalid (2008), analizaron de manera detallada a los residuos aceitosos de fritura mediante cromatografía de gases y encontraron que el valor calórico de los residuos aceitosos de fritura era de 38.314 MJ/kg más alto que el aceite de cocina no utilizado, es decir aproximadamente 14 MJ/kg, por lo que los autores concluyen que los residuos aceitosos de fritura pueden ser una buena fuente de energía.

El análisis de diferentes propiedades de los residuos aceitosos de fritura, tales como el valor del ácido, la viscosidad, el perfil de

ácidos grasos y el poder calorífico, mostraron una notable diversidad de valores dependiendo de su fuente y modo de utilización (Panadare y Rathod, 2015); el cual es debido a que los residuos aceitosos de fritura experimentan un proceso de hidrogenación y degradación oxidativa durante la cocción o fritura, responsable de cambiar sus propiedades (Knothe y Steidley, 2009). Además, los residuos aceitosos de fritura contienen un 0.02% de humedad media, 0.003% de cenizas y alrededor de 99.919% de carbono fijo. Los metales pesados tales como Cr, Ni, Pb estaban ausentes mientras que Cd estaba presente en aproximadamente 0.041 ppm. en un estudio realizado por Khalisanni et al. (2008).

Panadare y Rathod (2015), mencionan que para los procesos de fermentación la concentración de los residuos aceitosos de fritura y la glucosa de grado técnico varía de 1 a 10% y requiere una optimización experimental que varía con diferentes procesos de fermentación. En general, se utiliza 5% de residuos aceitosos de fritura y 7 a 8% de glucosa de grado técnico. No obstante, encontraron que la concentración optimizada para proceso de fermentación en particular fue 5% de glucosa y 5% de residuos aceitosos de fritura, lo que dio también alta producción de biomasa y actividad de emulsificación.

2.2.2. Estiércol de bovino.- El estiércol de bovino es un material de desecho (materia orgánica en descomposición) del proceso de la digestión que se libera en el suelo desde el intestino de una vaca.

El estiércol es el producto que se obtiene de la fermentación anaeróbica sucedida en el intestino de los residuos alimentarios no utilizados por el rumiante. Esta fermentación sintetiza una considerable cantidad de proteína que es desperdiciada, junto con parte de la energía no aprovechada (Pérez y Viniegra, s.f.).

El estiércol de bovino tiene un alto contenido de nitrógeno y debido a la pre fermentación en el estómago de los rumiantes, se ha observado que es un material útil para la producción de biogás a través del estudio realizado a lo largo de los años (Chonkor, 1983 citado en Belayhun Assegid, 2014).

2.2.3. Biogás.- El biogás es una mezcla conformada principalmente por metano (CH_4) oscila entre un 50% y un 75% y dióxido de carbono (CO_2) entre un 25% y un 45%, que se genera por el proceso biológico de biodigestión anaerobia, que consta de una serie de reacciones bioquímicas en la que residuos orgánicos son degradados o consumidos por un conjunto de microorganismos (Red Mexicana de Bioenergía, 2017).

El biogás, además, contiene pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H₂), nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S); y tiene como promedio un poder calorífico entre 18.8 y 23.4 MJ/m³. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable (Rodríguez, 2014).

**TABLA N° 02
COMPOSICIÓN DEL BIOGAS**

Componentes	Composición
Metano (CH ₄)	50 – 75%
Dióxido de carbono (CO ₂)	25 – 45%
Agua (H ₂ O)	2 – 7% vol
Ácido Sulfhídrico (H ₂ S)	20 – 20 000 ppm
Nitrógeno (N ₂)	< 2% vol
Oxígeno (O ₂)	< 2% vol
Hidrogeno (H ₂)	< 1% vol

Fuente: Elaboración propia, basada en Tobares L., 2012.

2.2.4. Digestión anaerobia.- La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo a través del cual, en ausencia de oxígeno, la materia orgánica es transformada en biogás o gas biológico, formado principalmente por metano y anhídrido carbónico (Montes, 2008).

La digestión anaeróbica ha sido considerada como tecnología de residuos a energía y es ampliamente utilizada en el tratamiento de diferentes residuos orgánicos, por ejemplo: fracción orgánica de residuos sólidos municipales, lodos de depuradora, residuos de alimentos y estiércol animal (Li et al., 2009, citado en Belayhun Assegid, 2014).

2.2.5. Teoría científica de la digestión anaeróbica.- La digestión anaeróbica depende de consorcios de bacterias hidrolíticas y acidogénicas que trabajan con bacterias productoras de metano (metanógenos) que crecen en colonias estructuradas o películas para soporte estructural e intercambio metabólico (Guo L., 2010). En la Figura 2.2 (pág. 26) se muestran las distintas fases de la digestión anaeróbica.

**TABLA N° 03
ETAPAS DE REACCIÓN QUÍMICA EN UN BIODIGESTOR
ANAERÓBICO**

	Proceso	Bacteria	Salida
I	Hidrólisis	Bacteria de hidrólisis anaerobia	Monosacárido, aminoácidos y ácidos grasos
II	Acidogénesis	Formadores de ácido	Ácidos orgánicos, dióxido de carbono
III	Acetogénesis	Bacteria de formación de ácido acético	Ácido acético, dióxido de carbono, hidrógeno
IV	Metanogénesis	Bacterias de metano	Metano, dióxido de carbono, agua

Fuente: Traducido de Guo L., 2010.

La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea. La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas

(proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, H₂ y CO₂ (Varnero, 2011).

La hidrólisis es la solubilización de compuestos orgánicos particulados como la celulosa (Ecuación 1.1) y compuestos orgánicos coloidales como proteínas (Ecuación 1.2) en compuestos solubles simples que pueden ser absorbidos por las células bacterianas. Una vez absorbidos, estos compuestos sufren una degradación bacteriana que resulta en la producción de ácidos volátiles y alcoholes como etanol (CH₃CH₂OH) y propionato (CH₃CH₂COOH). Los ácidos volátiles se convierten en acetato e hidrógeno gaseoso. La producción de metano se produce por la degradación del acetato (Ecuación 1.3) y la reducción de dióxido de carbono por gas hidrógeno (Ecuación 1.4) (Gerardi, 2003).

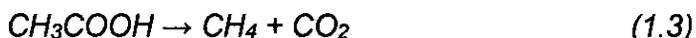
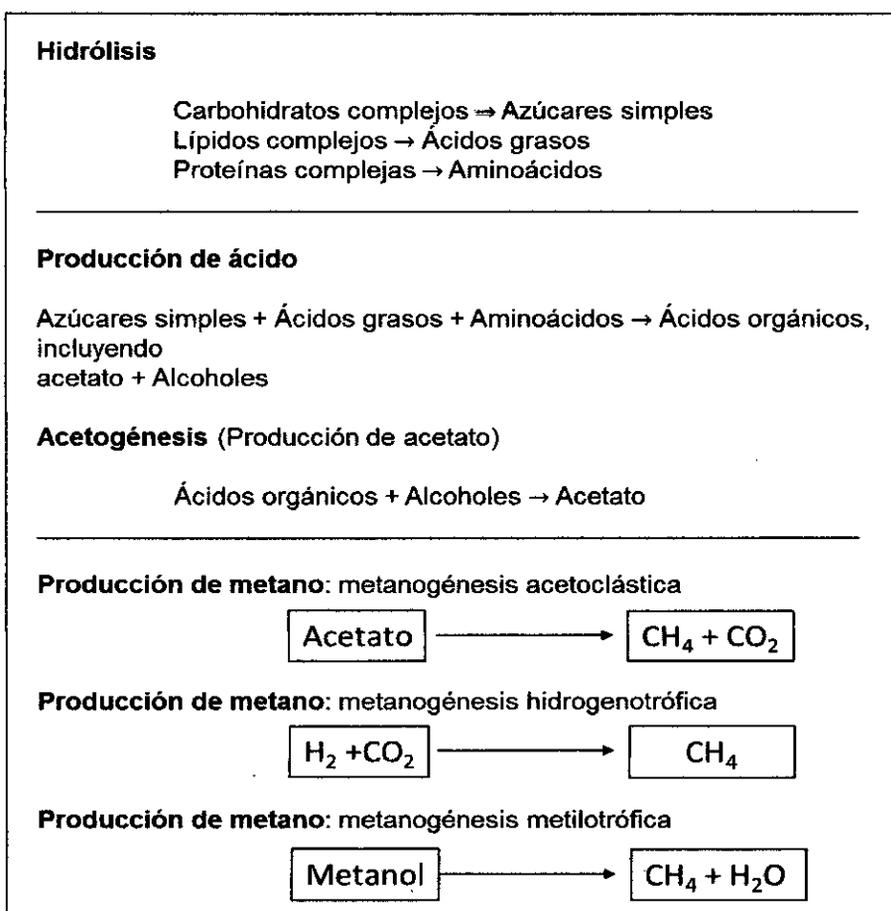


FIGURA N° 2.1

REACCIONES BIOQUÍMICAS CRÍTICAS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA Y LA PRODUCCIÓN DEL METANO



Fuente: Adaptado de The Microbiology of Anaerobic Digesters por Michael H. Gerardi, 2003.

Las reacciones bioquímicas críticas en el proceso de digestión anaeróbica y la producción del metano incluyen la hidrólisis, la

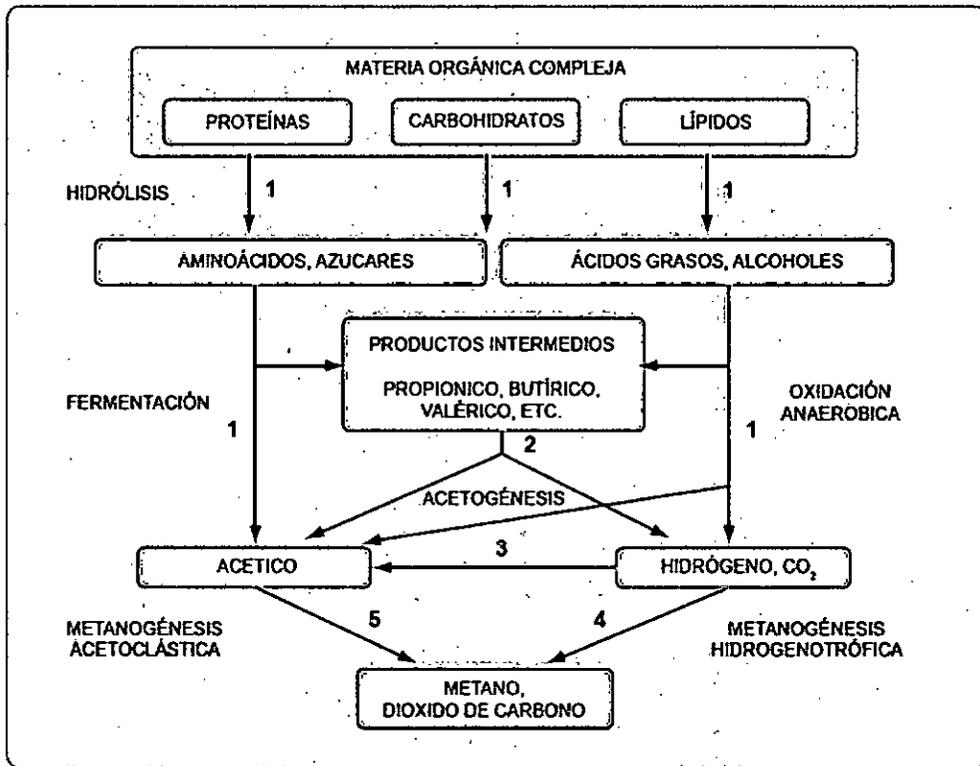
producción de ácido, la acetogénesis y la producción de metano que puede ocurrir mediante el uso de acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, y metanol.

Varnero (2011), define las cuatro etapas de la digestión anaerobia de manera detallada a continuación:

i. Etapa de la Hidrólisis.- La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos.

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

FIGURA N° 2.2
ESQUEMA DE LAS DISTINTAS FASES DEL PROCESO DE
DIGESTIÓN ANAERÓBICA



Fuente: Recuperado de Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991 citado en Varnero, 2011.

Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos.

Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiosa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura. La tasa de hidrólisis

depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pretratamientos fisico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores.

ii. Etapa fermentativa o acidogénica.- Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H_2) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema.

Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos.

iii. Etapa acetogénica .- Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H_2 y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno (H_2), a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*.

Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla H_2/CO_2) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas.

Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium aceticum*.

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

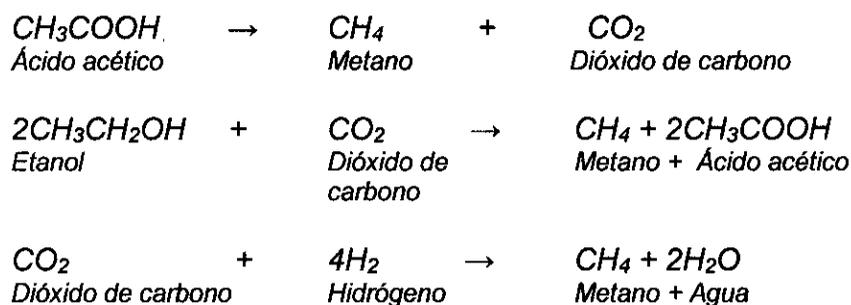
iv. Etapa metanogénica.- En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización.

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas.

Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariontes.

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen H₂/CO₂ y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas.

Según A. B. Karki, J. N. Shrestha y S. Bajgain (2005), los principales ácidos producidos por las bacterias formadoras de ácido en la etapa 2 son procesados por bacterias productoras de metano para producir metano. La reacción que tiene lugar en este proceso de producción de metano se llama metanización y se expresa mediante la siguiente ecuación:



La ecuación anterior muestra que muchos productos, por productos e intermedios, se producen en el proceso de digestión de insumos en un anaeróbico antes de que se produzca el producto final (metano).

2.2.6. Parámetros ambientales y operacionales del proceso.-

Siendo la digestión anaerobia un proceso bioquímico complejo, es necesario mantener las condiciones óptimas que permitan la realización tanto de las reacciones químicas dentro de la matriz líquida del reactor, como las reacciones bioquímicas intracelulares que dan vida a los organismos en juego (Montes M., 2008). Existen diferentes factores ambientales que afectan la acción de los microorganismos, como son la temperatura, el pH, los nutrientes y ciertos elementos de naturaleza toxica (Leite, Lopez y Sousa, 2004 citado en Fernández y Groppelli, 2012).

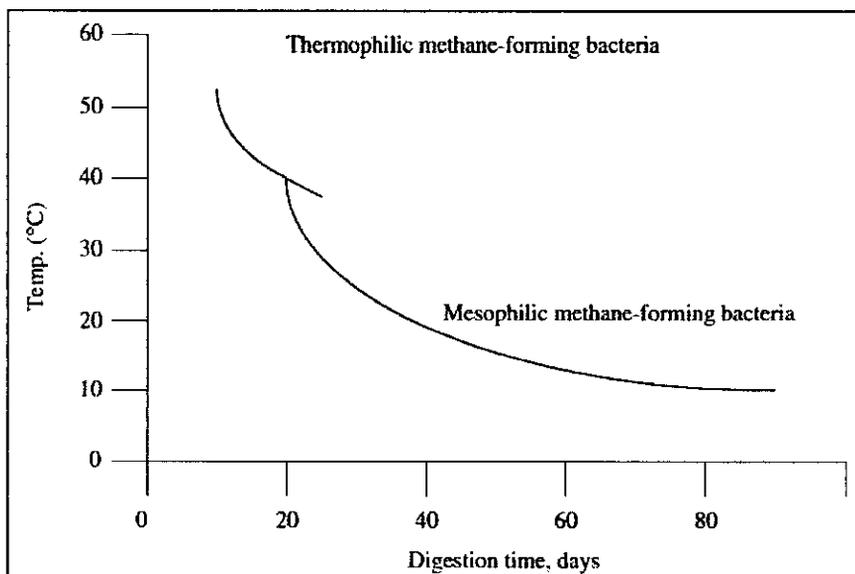
a.- Temperatura.- La temperatura es uno de los factores más importantes que afectan la actividad microbiana dentro de un digestor anaeróbico, y la producción de metano depende fuertemente de la temperatura. Las fluctuaciones de temperatura afectan la actividad de las bacterias formadoras de metano; mientras que el efecto de la temperatura en la etapa de la hidrólisis de residuos particulados y coloidales no es muy grande. Las bacterias hidrolíticas no son tan sensibles al cambio de temperatura como las bacterias formadoras de acetato y las bacterias que forman metano (Gerardi, 2003).

En la naturaleza, la formación de metano ocurre en diferentes rangos de temperaturas; psicrófilas (<30° C), mesófilas (30°C -

40°C) y termófilas (50°C - 60°C) (Yadvika et al., 2004 citado en Tadesse, 2010). Sin embargo, los rangos de temperatura mesófilos y termófilos son más favorables para que los anaerobios sean activos (Yadvika et al., 2004 citado en Tadesse, 2010). En general, las altas temperaturas dan una mayor tasa de producción de metano y permiten mayores tasas de carga, disminuyendo así el volumen del reactor necesario para un material específico. La digestión anaeróbica a temperatura termófila también proporciona una mejor higiene, es decir, la eliminación de patógenos. Sin embargo, los procesos termófilos son más sensibles a los altos niveles de amoníaco, liberados a partir de materiales ricos en proteínas (Yadvika et al., 2004 citado en Tadesse, 2010). Los procesos termófilos también son más costosos de calentar en comparación con los procesos mesófilos (Demetriades, 2008). El período de digestión en un proceso mesófilo generalmente requiere un tiempo comparativamente más largo, comúnmente entre 20 y 30 días. Sin embargo, en temperatura termófila, el gas puede producirse en mucho menos tiempo en comparación con la temperatura mesófila. La mayoría de los digestores anaeróbicos, especialmente los de las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales, operan en el rango mesofílico de temperatura (Gerardi, 2003).

La temperatura afecta la actividad biológica. Este efecto se debe principalmente al impacto de la temperatura sobre la actividad enzimática o las reacciones. Por lo tanto, los aumentos de la temperatura dan como resultado una mayor actividad enzimática, mientras que la disminución de la temperatura da como resultado una menor actividad enzimática. Debido al impacto de la temperatura en la actividad enzimática, el tiempo de retención de sólidos dentro de los digestores debería aumentar con la disminución de las temperaturas (Gerardi, 2003).

FIGURA N° 2.3
TEMPERATURA VS PRODUCCIÓN DE METANO



Fuente: Gerardi, 2003.

b.- pH.- La acidez del sustrato se mide por el pH, que es un parámetro importante que afecta el crecimiento de los microbios durante la digestión anaeróbica. La actividad enzimática aceptable

de las bacterias formadoras de ácido se produce por encima de pH 5.0, pero la actividad enzimática aceptable de las bacterias formadoras de metano no se produce por debajo de pH 6.2 (Gerardi, 2003). Para un rendimiento óptimo de los microbios, el pH en el digester debe mantenerse en el rango de 6.8 - 8.0. El valor de pH por debajo o por encima de este intervalo puede restringir el proceso en el reactor ya que los microorganismos y sus enzimas son sensibles a la desviación del pH (Yadvika et al., 2004 citado en Tadesse, 2010). También hay situaciones en la fermentación anaeróbica que pueden afectar mucho el pH en el digester. Estos incluyen altas cantidades de ácidos grasos volátiles, ácido acético y dióxido de carbono producidos por los microbios y el amoníaco. Estos factores pueden tener un impacto sobre el pH en el reactor y pueden inhibir la actividad de los microbios (Nijaguna, 2002; Yadvika et al., 2004 citado en Tadesse, 2010).

El pH en un digester anaeróbico inicialmente disminuirá con la producción de ácidos volátiles. Sin embargo, como las bacterias formadoras de metano consumen los ácidos volátiles y se produce alcalinidad, el pH del digester aumenta y luego se estabiliza. En tiempos de retención hidráulica mayor a 5 días, las bacterias formadoras de metano comienzan a consumir rápidamente los ácidos volátiles (Gerardi, 2003).

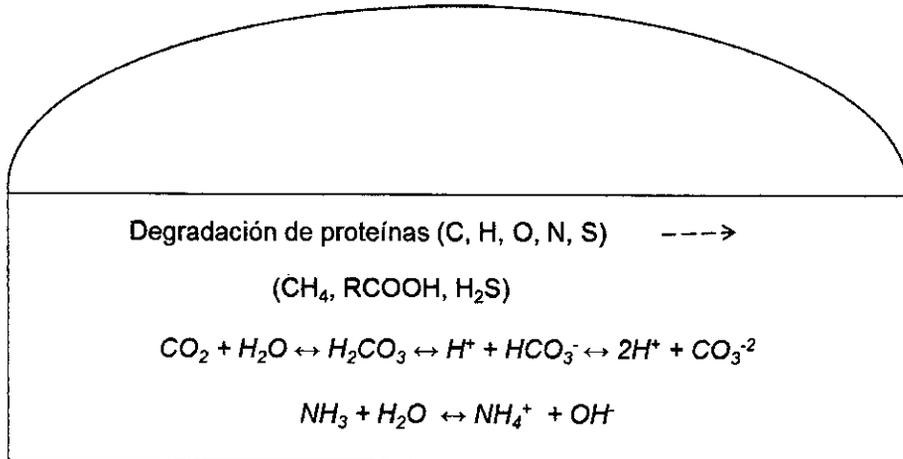
En un digestor anaeróbico que funciona correctamente, se produce un pH entre 6.8 y 7.2 a medida que los ácidos volátiles se convierten en metano y dióxido de carbono (CO₂). El pH de un sistema anaeróbico se ve significativamente afectado por el contenido de dióxido de carbono del biogás (Gerardi, 2003).

La alcalinidad está presente principalmente en forma de bicarbonatos que están en equilibrio con el dióxido de carbono en el biogás a un pH dado. Cuando los compuestos orgánicos se degradan, se libera dióxido de carbono. Cuando los aminoácidos y las proteínas se degradan, se liberan dióxido de carbono y amoníaco. La liberación de dióxido de carbono resulta en la producción de ácido carbónico, alcalinidad de bicarbonato y alcalinidad de carbonato (Ecuación 1.5). La liberación de amoníaco resulta en la producción de iones de amonio (Ecuación 1.6) (Gerardi, 2003).



El equilibrio entre el ácido carbónico, la alcalinidad del bicarbonato y la alcalinidad del carbonato, así como el amoníaco y los iones de amonio es una función del pH del digestor (figura 2.4, pág. 37). La alcalinidad del bicarbonato es la principal fuente de carbono para las bacterias formadoras de metano.

FIGURA N° 2.4
EQUILIBRIO ENTRE EL ÁCIDO CARBÓNICO, LA ALCALINIDAD
DEL BICARBONATO Y LA ALCALINIDAD DEL CARBONATO, ASÍ
COMO EL AMONIACO Y LOS IONES DE AMONIO

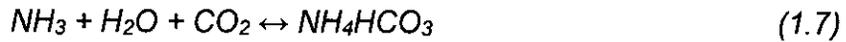


Fuente: Traducido de Gerardi, 2003.

Se introducen cambios significativos en alcalinidad o pH en un digestor anaeróbico mediante alimentación de sustrato o la producción de compuestos ácidos y alcalinos, tales como ácidos orgánicos e iones de amonio, respectivamente, durante la degradación de compuestos orgánicos en el digestor.

La alcalinidad en un digestor anaeróbico también se deriva de la degradación de compuestos de nitrógeno orgánico, como aminoácidos y proteínas, y la producción de dióxido de carbono a partir de la degradación de compuestos orgánicos. Cuando los aminoácidos y las proteínas se degradan, los grupos amino (-NH₂) se liberan y se produce alcalinidad. Cuando se liberan grupos amino, se produce amoníaco. El amoníaco se disuelve en agua

junto con dióxido de carbono para formar bicarbonato de amonio (NH_4HCO_3) (Ecuación 1.7).



Sin embargo, la degradación de los compuestos orgánicos produce ácidos orgánicos que destruyen la alcalinidad. Por ejemplo, como resultado de la degradación de la glucosa, se forma acetato (Ecuación 1.8). Este ácido destruye la alcalinidad, por ejemplo, el bicarbonato de amonio (Ecuación 1.9) y la alcalinidad no se devuelve hasta que ocurre la fermentación del metano (Ecuación 1.10).



Aunque la eficiencia del digester anaeróbico es satisfactoria dentro del rango de pH de 6.8 a 7.2, es mejor cuando el pH está dentro del rango de 7.0 a 7.2. Los valores de pH por debajo de 6 o por encima de 8 son restrictivos y algo tóxicos para las bacterias formadoras de metano (Gerardi, 2003).

Se pueden usar varios productos químicos para ajustar la alcalinidad y el pH en un digester anaeróbico (Tabla 4, pág. 39).

TABLA N° 04
PRODUCTOS QUÍMICOS USADOS PARA AJUSTAR LA
ALCALINIDAD

Sustancia química	Fórmula	Catión amortiguador
Bicarbonato de sodio	NaHCO ₃	Na ⁺
Bicarbonato de potasio	KHCO ₃	K ⁺
Carbonato de sodio (ceniza de soda)	Na ₂ CO ₃	Na ⁺
Carbonato de potasio	K ₂ CO ₃	K ⁺
Carbonato de calcio (cal)	CaCO ₃	Ca ²⁺
Hidróxido de calcio (cal viva)	Ca(OH) ₂	Ca ²⁺
Amoniaco (gas)	NH ₃	NH ⁴⁺
Nitrato de sodio	NaNO ₃	Na ⁺

Fuente: Traducido de Gerardi, 2003.

Debido a que las bacterias que forman metano requieren alcalinidad de bicarbonato, se prefieren las sustancias químicas que liberan alcalinidad de bicarbonato directamente. De estos productos químicos, el bicarbonato de sodio y el bicarbonato de potasio son quizás los mejores productos químicos de elección debido a su solubilidad deseable, manejo y efectos adversos mínimos dentro del digester. Por ejemplo, la sobredosis de estos productos químicos no hace que el pH del digester se eleve rápidamente por encima del óptimo. Además, de todos los cationes liberados por los productos químicos alcalinos utilizados para la adición de alcalinidad, el sodio y el potasio son los menos tóxicos para las bacterias en el digester.

Los productos químicos que liberan alcalinidad de hidróxido, por ejemplo, soda cáustica, no son efectivos para mantener la alcalinidad adecuada en el digestor debido al requerimiento de alcalinidad de bicarbonato de las bacterias que forman metano (Gerardi, 2003).

La cal (CaCO_3) se puede usar para aumentar el pH del digestor a 6.4, y luego se deben usar sales de bicarbonato o de carbonato (sodio o potasio) para aumentar el pH al rango óptimo. La cal aumenta el pH de forma rápida y espectacular, pero la cal no aumenta significativamente la alcalinidad. La sobredosificación con cal puede hacer que el pH exceda fácilmente el rango de pH óptimo (Gerardi, 2003).

c.- Tiempo de retención.- Es el tiempo que requieren los microorganismos para degradar toda la materia orgánica y generar los productos de dicho proceso. El tiempo de retención depende exclusivamente de la temperatura del lugar o región donde se vaya a construir el biodigestor. Así, a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención para generar los productos de la digestión (Toala, 2013).

El tiempo de retención también es el tiempo promedio que una muestra permanece en el digestor, es así que para un biodigestor que trabaja con estiércol de vaca se requiere un tiempo de

detención de 40 a 60 días dependiendo de la temperatura (A. B. Karki, et al. 2005).

TABLA N° 05
TIEMPO DE RETENCIÓN SEGÚN TEMPERATURA

Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

Fuente: Martí, 2008.

Debido a que el tiempo de generación, es decir, el tiempo requerido para que una población de bacterias duplique su tamaño, las bacterias formadoras de metano son relativamente largas en comparación con las bacterias aeróbicas y las bacterias anaerobias facultativas (Tabla 6, pág. 42), el tiempo de retención de sólidos típicos para los digestores anaeróbicos son mayor a 12 días. No se recomiendan tiempos de detención menor a 10 días. En tiempos de detención menor a 10 días se produce un lavado significativo de bacterias formadoras de metano, esto en caso de biodigestores continuos o semi continuos (Gerardi, 2003).

TABLA N° 06
TIEMPOS APROXIMADOS DE GENERACIÓN DE GRUPOS
IMPORTANTES DE BACTERIAS DE AGUAS RESIDUALES

Grupo bacterial	Función	Tiempo de generación aproximado
Organotrofos anaeróbicos	Formación de flóculos y degradación de orgánicos solubles en procesos de lodos activados y filtrado	15 – 30 min
Organotrofos anaerobios facultativos	Formación de flóculos y degradación de orgánicos solubles en procesos de lodos activados y filtrado, hidrólisis y degradación de orgánicos en el digestor anaeróbico	15 – 30 min
Bacterias nitrificantes	Oxidación de NH_4^+ y NO_2^- en procesos de lodos activados y filtrado	2 – 3 días
Bacterias formadoras de metano	Producción de metano en el digestor anaeróbico	3 – 30 días

Fuente: Traducido de Gerardi, 2003.

d.- Agitación.- Según Varnero (2011), los objetivos buscados con la agitación son: remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor y prevenir la formación de espumas y la sedimentación en el reactor.

La agitación aumenta la producción de gas y disminuye el tiempo de retención, esto es básicamente por cuatro razones:

- Distribución uniforme de la temperatura y sustrato en el interior del biodigestor.
- Distribución uniforme de los productos, tanto intermedios como finales.
- Mayor contacto entre el sustrato y las bacterias, evitando la formación de cúmulos alrededor de las bacterias.
- Evitar la acumulación de lodo en la parte superior del digestor, también llamada "nata" o "espuma" que dificulta la salida del biogás.

e.- Relación carbono-nitrógeno (C/N).- Los elementos necesarios tales como carbono, hidrógeno, nitrógeno, fósforo y muchos otros microelementos deben estar presente en cantidades adecuadas para el crecimiento normal de los microorganismos.

Se ha reconocido que todos los organismos vivos necesitan nitrógeno para la síntesis de proteínas. En ausencia de suficiente nitrógeno, las bacterias no podrían utilizar todo el carbono presente y el proceso sería menos eficiente. En general, una proporción de alrededor de 20-30:1 se considera mejor para la digestión anaeróbica. La relación C/N nunca debe ser mayor a 35, con un óptimo de 30. Si la relación C/N es muy alta, el nitrógeno se consumirá rápidamente y la velocidad de reacción disminuirá. Por otro lado, si la relación C/N es muy baja, el nitrógeno se liberará y

se acumulará en forma de amoníaco, que es tóxico bajo ciertas condiciones (A. B. Karki et al., 2005).

Los desechos animales, en particular el estiércol del ganado, tienen una relación C/N promedio de aproximadamente 24. Los materiales vegetales, como la paja y el aserrín, contienen un mayor contenido de carbono. La excreta humana tiene una relación C/N tan baja como 8. La relación C/N de algunos de los materiales comúnmente utilizados se presenta en la Tabla 7. (A. B. Karki et al., 2005).

TABLA N° 07
RELACIÓN C/N DE ALGUNOS MATERIALES ORGÁNICOS

Materia prima	Relación C/N
Estiércol de pato	8
Excreta humana	5
Estiércol de pollo	10
Estiércol de cabra	12
Estiércol de cerdo	18
Estiércol de oveja	19
Estiércol de vaca/estiércol de Búfalo	24
Estiércol de Elefante	43
Hojasca de maíz	60
Paja de arroz	70
Paja de trigo	90

Fuente: Elaboración basada en Karki, A.B and Dixit, K., 1984 citado en A. B. Karki et al., 2005.

f.- Nutrientes.- Al igual que en todas las operaciones bioquímicas, se requieren macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y micronutrientes (minerales traza) en el proceso anaeróbico para la síntesis de nueva biomasa. Sin embargo, una de las ventajas de

los procesos de digestión anaeróbica, frente a los procesos aeróbicos, es su baja necesidad de nutrientes derivada de los bajos índices de producción de biomasa que presentan los microorganismos anaeróbicos (Varnero, 2011).

2.2.7. Calidad del biogás.- El contenido de metano en el biogás es el indicador más importante de la calidad del biogás y su idoneidad para el uso de las necesidades energéticas (Makarevičienė, Kalenska, Skorupskaitė, Yunik y Gumbytė, 2013). Según Castillo y Vargas (2011), el biogás se puede considerar de buena calidad, si su coloración produce una llama de color azul transparente, sin emisión de malos olores.

En la presente investigación para determinar la calidad del biogás se cuantificó el contenido de metano y del dióxido de carbono mediante el equipo Cromatógrafo de Gases VARIAN modelo 450-GC. La cromatografía es un método de separación de los componentes de una muestra. En cromatografía de gases los componentes de una muestra vaporizada se separan como consecuencia de que se reparten entre una fase gaseosa y una fase estacionaria contenida en una columna. Al efectuar una separación cromatográfica de gases, la muestra se vaporiza (en caso de líquido volátil) y se inyecta en la cabeza de una columna cromatográfica. La elución se lleva a cabo mediante el flujo de una fase móvil de gas inerte o gas portador. A diferencia de la mayoría

de los otros tipos de cromatografía, la fase móvil no interactúa con las moléculas del analito su única función es transportar este último a través de la columna. Como gas portador se utiliza mayormente helio. La resolución cromatográfica se mide por la capacidad de resolver 2 picos contiguos (Zavala, 2012).

2.2.8. Sistema de cuantificación del gas.- El volumen de biogás generado se determina a través de medios volumétricos o manométricos. El primero mide el volumen de biogás manteniendo constante la presión mientras que el último mide el aumento de presión manteniendo el volumen constante (Qamaruz, 2010).

En la presente investigación, se empleó el método de desplazamiento de líquido. El montaje consistió en un recipiente (botella de PET) de 3 litros, en la parte superior del mismo se adaptó un tapón de jebe con dos orificios a través de los cuales se conectaron dos mangueras de ¼ pulgada. El biogás recolectado pasa a través de una de las mangueras al recipiente llenado de agua y a través de la otra manguera se desplaza el agua desde el interior del recipiente hacia una jarra graduada y la cantidad del volumen del líquido desplazado se considera equivalente al volumen de biogás producido.

2.2.9. Biodigestor.- Es un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el

material orgánico a fermentar en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio. El fenómeno de biodigestión ocurre, debido a la existencia de un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos presentes en el material fecal, que al actuar sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal, producen una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH₄), llamado biogás, sumamente eficiente si se emplea como combustible. El resultado de este proceso genera residuos con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica, (ideales como fertilizantes) que pueden ser aplicados frescos, pues el tratamiento anaerobio elimina los patógenos presentes en el sustrato (Campero, 2007 citado en Rivera, 2010).

2.2.10. Biodigestores de carga discontinua o régimen estacionarios.- Los biodigestores se cargan con las materias primas en una sola carga o lote. Después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían los biodigestores por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación. Esto se conoce también como biodigestores Batch o Batelada (Varnero, 2011).

CAPITULO III

VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1. Variables de la investigación.-

- Variable Independiente (X): Residuos aceitosos de fritura
- Variable Dependiente (Y): Producción de biogás

3.2. Operacionalización de las variables:

a) Operacionalización de la variable independiente: Residuos aceitosos de fritura.

Son productos lipídicos de origen vegetal, utilizados en acciones de cocción y fritura, el cual se desnaturaliza por las altas temperaturas, modificando sus características; para el presente estudio se emplearon botellas de plástico de 2 litros para su recolección y fueron medidos con una probeta graduada de 250 mL, para su inoculación en los biodigestores en las cantidades de 60 mL y 120 mL.

b) Operacionalización de la variable dependiente: Producción del biogás

El biogás generado durante la operación del sistema se cuantificó en litros; para ello se empleó el método de desplazamiento del

líquido. Y la calidad del biogás producido se determinó mediante el método de la cromatografía de gases, a través de la cuantificación del % CH₄ (metano) y el % CO₂ (dióxido de carbono) presente en las muestras analizadas.

TABLA N° 08
INDICADORES OPERACIONALES DE LAS VARIABLES

VARIABLES	INDICADORES	MÉTODO DE MEDICIÓN
INDEPENDIENTE <ul style="list-style-type: none"> Residuos aceitosos de fritura 	Volumen de residuos aceitoso de fritura empleados	Mediante una probeta graduada de 250 mL
DEPENDIENTE <ul style="list-style-type: none"> Producción de biogás 	<ul style="list-style-type: none"> Del volumen producido: biogás producido en litros (L) De la calidad: Concentración de metano (%CH₄) en el biogás producido 	<ul style="list-style-type: none"> Del volumen producido: método de desplazamiento de agua por el biogás hacia una jarra graduada De la calidad: método de la cromatografía de gases

3.3. Hipótesis de la investigación

El uso de los residuos aceitosos de fritura aumenta la producción de biogás.

CAPITULO IV

METODOLOGÍA

4.1. Tipo de investigación.- La presente investigación es explicativa y experimental. Se considera explicativa ya que se caracteriza por buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento causa-efecto. También se considera experimental, debido a que el investigador tiene un control sobre los tratamientos y asigna cada tratamiento a las unidades experimentales de manera aleatoria, con el fin de observar los efectos que se producen.

4.2. Diseño de la investigación.- La presente investigación es de carácter experimental. El estudio se desarrolló con 6 biodigestores que operaron al mismo tiempo a las mismas condiciones ambientales. Se utilizó un diseño muestreo aleatorio simple de 3x2; es decir, tres niveles de tratamiento por duplicado. Este estudio se centró principalmente en la producción de biogás; los experimentos se llevaron a cabo en un modo batch utilizando 6 recipientes acondicionados y utilizadas como pequeños biodigestores anaeróbicos de 3000 mL de capacidad a escala de laboratorio.

A continuación, se describen las configuraciones experimentales para una primera etapa en la que se determinó la carga óptima de relación estiércol/agua y la segunda etapa en la que se evaluó la

producción de biogás con la inoculación de residuos aceitosos de fritura:

4.2.1. Configuración experimental de los biodigestores para la determinación de la carga óptima de relación estiércol/agua.- La instalación experimental para la determinación de la carga óptima de relación estiércol/agua se realizó con la finalidad de determinar la proporción más adecuada entre el estiércol y el agua que se mezcla y se carga a los biodigestores para obtener una mayor producción de biogás; para ello se utilizaron biodigestores diseñados y contruidos a partir de tubos de PVC de 4 pulgadas de diámetro y 38 cm de longitud (véase la figura 4.2, pág. 58). Se trabajó con tres grupos de tratamiento por duplicado con tres diferentes relaciones de carga (estiércol/agua) como se puede ver en la Tabla 9 (pág. 52). Los experimentos se llevaron a cabo en modo discontinuo con biodigestores pequeños de 3000 mL de capacidad a escala de laboratorio, el cual permitió su fácil manipulación para el cargado y cierre hermético. Para determinar el volumen de trabajo de los biodigestores se tomó en cuenta que se generan entre 0.15 y 0.20 volúmenes de biogás por volumen de biodigestor/día (Bahamonde, 2017), se trabaja con el 80% del volumen total y el 20% restante queda para el almacenamiento del biogás producido (Verástegui, 1979 citado en Palomino, 2007). El periodo de evaluación fue de 30

días, tiempo requerido para que los microorganismos pueden degradar toda la materia orgánica y generar los productos de dicho proceso (Toala, 2013), para lo cual se tomó en cuenta la teoría de tiempo de retención según temperatura de la región dada por Martí (2008). La carga óptima se determinó en función a la presión interna del biogás producido, el cual se midió con un manómetro tipo bourdon de manera interdiaria durante el periodo de evaluación; entendiéndose que a mayor cantidad de biogás generado y acumulado en el espacio libre del biodigestor ejercerá mayor presión interna al momento de medir con el manómetro.

**TABLA N° 09
RELACIÓN ESTIÉRCOL/AGUA**

Tratamiento	Estiércol	Agua
R 1:1	988 g	988 mL
R 1:2	700 g	1400 mL
R 1:3	542 g	1626 mL

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Configuración experimental de los biodigestores para la producción de biogás mediante la inoculación de residuos aceitosos de fritura.- Para la producción de biogás mediante la inoculación de residuos aceitosos de fritura, se utilizaron 6 biodigestores pequeños a escala de laboratorio diseñados y contruidos a con botellas de PET (polietilen-tereftalato) material ligero, transparente, resistente, hermético de capacidad de 3000 mL; siendo el volumen de trabajo del 80% (2400 mL) y un espacio

restante el 20% (600 mL) para la retención de biogás producido. Se añadió la misma cantidad de mezcla de estiércol de bovino y agua a todos los digestores, cuya relación óptima previamente determinada fue de 1 a 2 (estiércol/agua).

**TABLA N° 10
DISEÑO Y NIVELES DE TRATAMIENTO**

Tratamiento	Cargado		Volumen de trabajo	Inoculación de Residuos Aceitosos de Fritura
	Agua	Estiércol (ρ=0.70 g/mL)		
A	1400 mL	700 g	2400 mL	2.5 % vol. trab.
B _(control)	1400 mL	700 g	2400 mL	-
C	1400 mL	700 g	2400 mL	5% vol. trab.

Fuente: Elaboración propia.

A los tratamientos "A" y "C" se inocularon 2.5% y 5% de residuos aceitosos de fritura, respectivamente, el cual fue una vez por semana (los días 7, 14, 21 y 28) durante el periodo de operación; mientras el tratamiento "B" fue considerado como blanco o control, es decir trabajó sin la inoculación de los residuos aceitosos de fritura. La determinación de la variable dependiente (producción de biogás) se realizó de la siguiente manera: el volumen del biogás producido se determinó por método de desplazamiento de volumen; mientras que la cuantificación del contenido de metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂) se realizó en un laboratorio por el método de la cromatografía de gases.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

Para el presente estudio la población de los residuos aceitosos de fritura fueron todas las pollerías que existen en la tercera zona de Collique del distrito de Comas y todas las casas que usan aceite vegetal en la Av. Los Platinos Mz R, Urbanización el Rosario del norte del distrito de San Martín de Porres.

4.3.2. Muestra.- Para el presente estudio se eligió la pollería “Las chosas” ubicada en la tercera zona de Collique, de donde se recolectó 1 L de muestra de residuos aceitosos de fritura; asimismo, de una vivienda ubicada en Los Platinos Mz “R” Lt 19 Urbanización el Rosario del norte, San Martín de Porres, se recolectó 1 L de muestra de residuos aceitosos de fritura, ambos fueron enviados al laboratorio para su análisis. Finalmente se eligió trabajar con residuos aceitosos de fritura generada en casa por tener menor índice de acidez, para ello se recolectaron la cantidad de 5 L.

Como sustrato para la producción de biogás se usó el estiércol fresco de bovino que fueron recolectados la cantidad de 20 kilogramos del Frigorífico Camal “La Colonial”, ubicado en Calle Alfa N°199- Parque Industrial – Callao.

4.3.3. Sitio del estudio.- La presente investigación se desarrolló en av. Los Platinos Mz "R" Lt 19 Urbanización el Rosario del norte del distrito de San Martín de Porres, Lima, Perú. Todos los biodigestores construidos a escala de laboratorio operaron a condiciones ambientales en la azotea del edificio, a una escala de temperatura ambiental de 25°C a 30°C en promedio.

**FIGURA N° 4.1
RECOLECCIÓN DE ESTIÉRCOL DE BOVINO**



Fuente: Elaboración propia

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1. Técnicas de recolección de datos.- Para la recolección de datos se utilizaron técnicas de medición directa de parámetros y técnicas experimentales de laboratorio.

La determinación de los sólidos totales (ST) del sustrato (estiércol de bovino) y de las características físicas y químicas de los residuos aceitosos de fritura, fueron realizadas en laboratorios acreditados; siendo los ST determinados por el método "peso del residuo seco"

en el Laboratorio del “Instituto de Investigación de Especialización en Alimentos” de la Universidad Nacional el Callao (UNAC) y los parámetros requeridos de los residuos aceitosos de fritura fueron analizados en el laboratorio de “Certificaciones del Perú S.A - CERPER”, según los métodos referenciados en el anexo, ítem 9.3.

En el caso de las técnicas de medición directa, se utilizó pH-metro portátil HANNA (modelo HI 98103) para el control del pH, directamente sobre la muestra de la mezcla cargada en los biodigestores; para el control de la presión interna en los biodigestores se utilizaron manómetros tipo bourdon weizz (con escala milibar) y galeazzi (con escala bar), el volumen de biogás generado en los biodigestores se cuantificó mediante el método de desplazamiento de volumen (ver figura 4.8, pág. 73). Cada uno de los datos fueron registrados en un cuaderno de apuntes para posteriormente ser procesadas usando el programa Excel versión 2016.

Las muestras de biogás fueron recolectadas en bolsas herméticas de polietileno y analizadas en el laboratorio de Investigación de Fisicoquímica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) mediante las técnicas cromatográficas y los resultados arrojados por el software del cromatógrafo de gases

fueron exportados como archivo pdf para posteriormente realizar los cálculos.

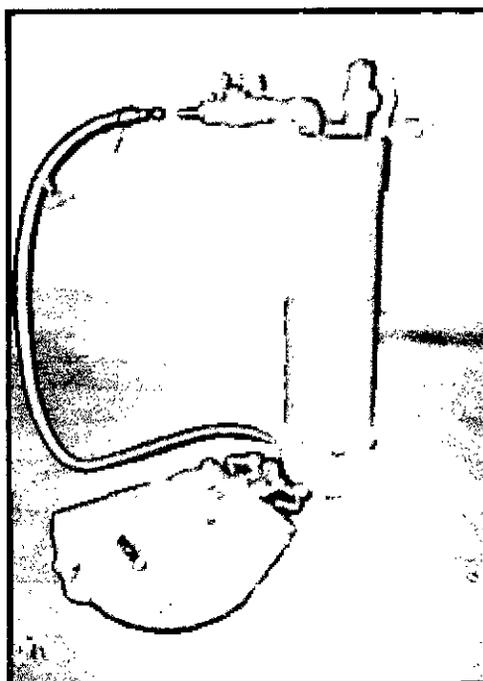
4.4.2. Instrumentos de recolección de datos.- Los equipos e instrumentos que permitieron realizar las mediciones fueron: el pH-metro portátil (medición de pH), manómetro (medición de presión interna en los biodigestores), termohigrómetro digital (medición de temperatura ambiente), jarra graduada, probeta graduada y el equipo cromatógrafo para analizar las muestras de biogás. A continuación, se detallan los materiales e instrumentos utilizados en la realización de la presente investigación:

a.- Para el diseño y construcción del biodigestor.- Materiales usados para la construcción de los biodigestores usados en la primera etapa de determinación de carga óptima (estiércol/agua):

- Tubos de 4"x38 cm.
- Llave de paso de 1/2"
- Uniones de plástico 1/2"
- Niples de plástico 1/2"
- Tapones de plástico 1/2" y de 4"
- Bushing 1/2"x 1/4"
- Adaptadores para gas de 1/2"
- Cinta teflón
- Cinta aislante
- Abrazaderas metálicas chicas

- Pegamento PVC
- Adaptadores PVC ½"
- Cuchilla
- Alicate
- Desarmador
- Bolsas colectoras

FIGURA N° 4.2
BIODIGESTOR CONSTRUIDO DE TUBO DE PVC 4"



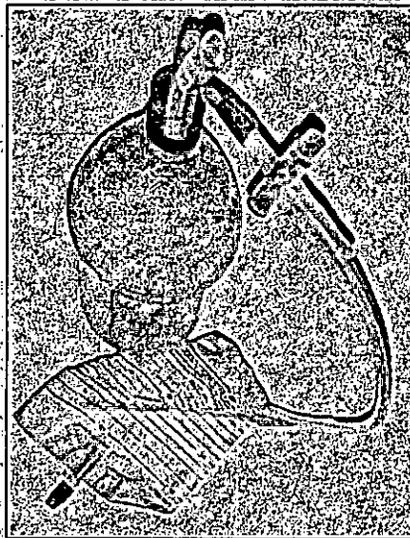
Fuente: Elaboración propia.

Materiales usados para la construcción de los biodigestores usados en la segunda etapa de producción de biogás con inoculación de residuos aceitosos de fritura:

- Recipientes (botellas PET) de 3 L de capacidad

- Tapones de goma
- Llaves de paso $\frac{1}{4}$ " de plástico
- Cinta aislante
- Pegamento PVC
- Bolsas colectoras con cierre hermético (utilizadas para almacenar muestras de biogás).

FIGURA N° 4.3
BIODIGESTOR CONSTRUIDO DE BOTELLA PET



Fuente: Elaboración propia.

b.- Materiales usados para la recolección del estiércol de bovino

- Baldes
- Bolsas plásticas
- Balanza de bolsillo
- Espátula

- Guantes y mascarillas

c.- Materiales usados para la recolección de los residuos aceitoso de fritura

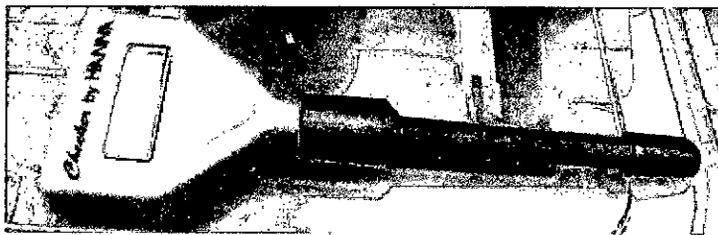
- Botellas plásticas con tapa hermética
- Embudo
- Probeta
- Guantes descartables

d.- Instrumento utilizado para la medición de pH.- La medición del pH en los biodigestores se realizó mediante un pH-metro digital (Checker Portable pH Meter de marca HANNA, modelo HI 98103).

La calibración del pH-metro se realizó utilizando soluciones buffer (patrón de pH 4.1 y 10).

FIGURA N° 4.4

pH-METRO DIGITAL MARCA HANNA, MODELO HI 98103



Fuente: Elaboración propia.

e.- Instrumento utilizado para la medición de la temperatura ambiental.- Para la medición de la temperatura ambiental se utilizó un Termohigrómetro digital de marca BOECO Germany y modelo SH-110 (ver figura 4.5, pág. 61).

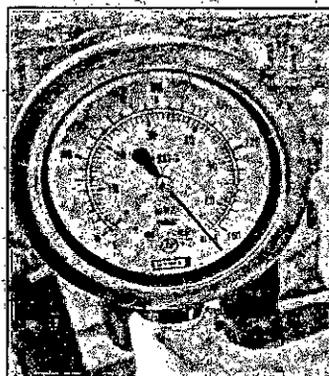
FIGURA N° 4.5
TERMOHIGRÓMETRO DIGITAL DE MARCA BOECO GERMANY,
MODELO SH-110



Fuente: Elaboración propia.

f.- Instrumento utilizado para la medición de presión en el biodigestor.- Para la medición y lectura de presión generada por la producción de biogás en el biodigestor se utilizó un manómetro tipo bourdon, el primero de marca weizz en un rango de 0-160 mbar, y el segundo marca Galeazzi en un rango de 0-4 bar, éste último debido a que en los biodigestores hubo días en donde se generaban presiones mayores a 160 mbar.

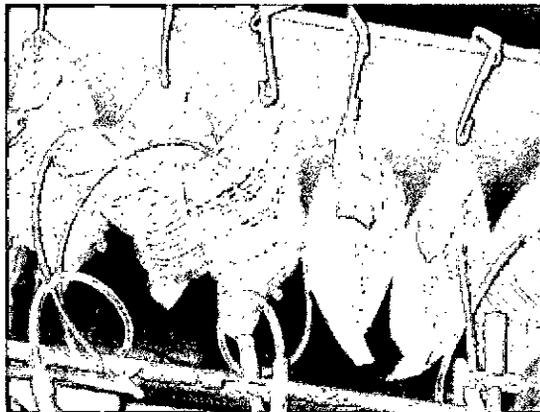
FIGURA N° 4.6
MANÓMETRO TIPO BOURDON



Fuente: elaboración propia.

f.- **Material utilizado para la recolección de muestras de biogás.**- Para almacenar las muestras de biogás se utilizaron bolsas colectoras con cierre hermético (figura 4.7), las cuales contaban con un diseño que permitía su adaptación al biodigestor a través de una manguera de ¼ pulgada, con un sistema anti retorno.

**FIGURA N° 4.7
ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS DE BIOGÁS**



Fuente: Elaboración propia.

4.5. Procedimientos de recolección de datos

4.5.1. Selección de materiales.- La selección de los materiales utilizados en la presente investigación se realizaron mediante el análisis de los criterios siguientes:

- **Disponibilidad;** que se encuentre disponible localmente y en las cantidades necesarias para asegurar el diseño de biodigestores a escala laboratorio y para la obtención del producto de interés.
- **Origen:** en caso del estiércol de bovino se eligió trabajar con el estiércol de aquellos que se alimentaban con pasto natural y en

caso de los residuos aceitosos de fritura fue elegido proveniente del uso de aceite vegetal en casas.

- **Facilidad de uso;** que no requiera de pre tratamiento, o en caso de requerirlo, que éste sea sencillo y económico.
- **Costo;** que el costo del material utilizado sea mínimo.

Los materiales seleccionados fueron aquellos que cumplieron con los criterios anteriores.

**TABLA N° 11
MATERIALES SELECCIONADOS**

Material	Origen	Característica
Estiércol de bovino	De animal que se alimenta con pasto natural	Fresco, generado en el día.
Residuos aceitoso de fritura	Provenientes del uso de aceite vegetal en casas	Bajo índice de acidez < 1

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2. Determinación de Sólidos Totales del sustrato (estiércol de bovino).- El sustrato (estiércol de bovino) fue analizado para determinar sólidos totales, esto debido a que los sólidos totales representan el peso del estiércol una vez seco y por tanto es la carga real de materia sólida que se estará introduciendo en el biodigestor. Estos análisis se realizaron en el "Instituto de Investigación de Especialización en Alimentos" de la Universidad Nacional del Callao (véase la tabla 12, pág. 64).

Procedimiento para la determinación de los ST:

1. Se pesan las capsulas de porcelana limpia y desecada.
2. Se toma una pequeña cantidad de volumen de muestra estiércol de bovino y se transfieren en las capsulas.
3. La cápsula se coloca para secado en el baño maría precalentada a la temperatura de ebullición del agua.
4. Se retira la cápsula del baño cuando se haya secado totalmente
5. Se seca la cápsula en el horno a 105°C, durante 2 horas.
6. Se lleva llevar la cápsula a un desecador y se deja enfriar aproximadamente por 2 horas, hasta temperatura ambiente.
7. Se pesa en la balanza analítica y se registra el peso de la cápsula con la muestra seca.

Calculo:

$$ST = \frac{(A - B) * 1000}{V}$$

Donde:

ST: Sólidos Totales, en mg/L

A: Peso final de la cápsula con el residuo seco, en gramos.

B: Peso inicial de la cápsula tarada en gramos.

V: Volumen de muestra desecada, en litros.

TABLA N° 12
RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES (ST)

Muestra	Cantidad	ST	Densidad
Estiércol de bovino	500 gr.	0,62033 g/mL	0.70 g/mL

Fuente: Elaboración propia

4.5.3. Análisis de parámetros físicos y químicos de los residuos aceitosos de fritura.- Los residuos aceitosos de fritura fueron analizados para determinar sus características fisicoquímicas (véase la tabla 13, pág. 77). Estos análisis se realizaron en el laboratorio de "Certificaciones del Perú S.A - CERPER".

a.- Determinación de las propiedades físicas de los residuos aceitosos de fritura:

- **Gravedad específica.-** Es la relación entre la masa de un volumen dado de una sustancia a un determinada temperatura y la masa de un volumen igual de agua a la misma temperatura. Esta constante no varía mucho para un aceite determinado cuando está puro y fresco, pero es afectada por la edad, rancidez y cualquier tratamiento especial que se le haga al aceite.

Para determinar la gravedad específica se realiza por duplicado sobre la misma muestra utilizando un picnómetro con una capacidad de 10 mL a 20°C.

Procedimiento:

1. Se pesa un picnómetro limpio y seco, registra su peso como m.
2. Se calibra el picnómetro, llenando de agua destilada a 20°C, se tapa con cuidado evitando la inclusión de burbujas de aire y se pesa en una balanza analítica y registrar el resultado como m_1 .

3. Se vacía el picnómetro, se enjuaga varias veces con alcohol etílico y luego con éter etílico; se deja secar completamente y, junto con todas sus partes, se pesa y registra el resultado como m .
4. Se llena completamente el picnómetro (limpio y seco) con la muestra preparada a 20°C , tapando cuidadosamente evitando la inclusión de burbujas de aire y se pesa en una balanza analítica y registro el resultado como m_2 .

Cálculo:

$$G_{S_{20}} = \frac{m_2 - m}{m_1 - m}$$

Donde:

- $G_{S_{20}}$ = gravedad específica a 20°C .
 - m = masa del picnómetro vacío, en gramos.
 - m_1 = masa del picnómetro con agua destilada, en gramos.
 - m_2 = masa del picnómetro con muestra, en gramos.
-
- **Índice de refracción.**- Es la relación entre la velocidad de una luz monocromática en el aire y su velocidad en la sustancia considerada, y es la relación entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción, cuando la luz pasa del aire a la sustancia. El índice de refracción depende de la composición de la muestra, la temperatura y la longitud de onda de la radiación utilizada.

El índice de refracción se mide usando un Refractómetro de Abbe. Su utilidad radica en casos como la identificación y caracterización de líquidos puros, grasas y aceites, comprobación de la pureza de diversos alimentos, determinación del contenido de agua en miel o en extractos de alimentos ricos en sacarosa (confituras, miel, jarabe de almidón, zumos, etc.).

Procedimiento:

1. La determinación se efectúa por triplicado sobre la misma muestra preparada.
 2. Se ajusta la temperatura del refractómetro a 20°C, y verificar la completa limpieza y sequedad de los prismas.
 3. Se coloca unas gotas de la muestra con una pipeta en el prisma inferior del refractómetro Abbe a 20°C.
 4. Como resultado final se reporta la media aritmética, aproximada, de los tres resultados de la determinación.
- **Humedad.-** Se define como la relación de la masa del agua presente en el aceite, o agua libre, y la masa dada de material respecto a su peso anhidro, expresada en porcentaje. Esta se determina por medio de una diferencia de peso después de haber puesto por tres horas y $103 \pm 2^\circ\text{C}$ un determinado peso de la muestra.

Procedimiento (método de la estufa):

1. La determinación se efectúa por duplicado sobre la misma muestra preparada.
2. Sobre el cristalizador previamente tarado, se pesa, con aproximación a 0.01 g, aproximadamente 5 g de muestra preparada.
3. Se coloca el cristalizador, junto con su contenido, durante 1 hora en la estufa calentada a $103 \pm 2^\circ\text{C}$. A continuación, se enfría hasta temperatura ambiente en el desecador y se pesa.
4. Se repite las operaciones indicadas en el paso 3 pero reduciendo el período de calentamiento a 30 min, hasta que la diferencia entre los resultados de dos operaciones de pesaje sucesivas no exceda de 0.002 g.

Cálculo:

$$\%H = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} * 100$$

Donde:

- %H = porcentaje de humedad de la muestra.
- m = masa de la cápsula, o masa del cristalizador, en gramos.
- m_1 = masa de la cápsula con la muestra, o masa del cristalizador con la muestra, antes del calentamiento, en gramos.

- m_2 = masa de la cápsula con la muestra, o masa del cristalizador con la muestra, después del calentamiento, en gramos.

Como resultado final se reporta la media aritmética de los dos resultados de la determinación, aproximada a centésimas.

b.- Determinación de las propiedades químicas de los residuos aceitosos de fritura:

- **Índice de Acidez (I).**- Es el número de miligramos de hidróxido de potasio requeridos para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en 1 g de grasa o aceite.

Procedimiento:

1. Se pesa 10 g de muestra en un matraz Erlenmeyer y se disuelve en 50 mL de etanol neutro caliente.
2. Se añaden 1 mL de fenolftaleína como indicador.
3. Se procede a la titulación de los ácidos grasos libres con la solución 0.1 N de hidróxido de sodio o de potasio hasta alcanzar el punto final correspondiente al indicador fenolftaleína (coloración rosada persistente durante 30 segundos). La solución se agita enérgicamente durante la titulación. El volumen de solución 0.1 N empleado en la titulación debe ser menor de 20 mL; en caso

contrario debe usarse la solución 0.5 N de hidróxido de sodio o de potasio.

4. Se anota el volumen gastado de la solución base utilizada.

Cálculo:

$$I = \frac{(\text{Volumen de NaOH}) \text{ mL} \times 0,1 \text{ eq/L} \times 1\text{L}/10^3\text{mL} \times 282 \text{ g/eq} \times 100}{\text{Peso de muestra (g)}}$$

- **Índice de Saponificación.-** Es el número de miligramos de hidróxido de potasio requeridos para saponificar 1g de grasa o aceite.

Procedimiento:

1. Se pesa 5 g de muestra en un matraz de 250 mL de capacidad.
2. Se añade 50 mL de la solución etanólica de KOH y se somete a reflujo suavemente hasta que se completa la saponificación (unos 30 minutos).
3. Se enfría, se añade 1 mL de solución indicadora fenolftaleína y titular el exceso de álcali con HCl 0.5 N se anota el volumen gastado.
4. Se realiza una titulación en blanco.

Cálculo:

Indice de saponificación

$$= \frac{(\text{Título blanco} - \text{Título muestra}) \times 0,5 \text{ eq/L} \times 56,1 \text{ g/eq}}{\text{Peso de muestra (g)}}$$

- **Índice de Yodo (Método de Wijs).**- Es una medida del grado medio de insaturación de ciertas sustancias orgánicas, expresado como centigramos de yodo absorbidos, bajo condiciones determinadas, por cada gramo de sustancia.

Procedimiento:

1. Se pesa 0.50 g de muestra en un Erlenmeyer de 250 mL con tapa y se agregan 10 mL de tetracloruro de carbono, 25 mL de solución de Wijs, se agita suavemente y se deja reposar en lugar oscuro durante 30 minutos. Se agrega 10 mL de KI al 15 %, luego se agrega 100 mL de agua destilada.
2. Se procede a la titulación lentamente con solución valorada $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.1 N hasta casi decoloración de la solución; añadiendo unas gotas de almidón al 1% se continúa la titulación hasta la desaparición del color azul.
3. Se realiza una determinación (titulación) en blanco.

Cálculo:

Índice de Yodo

$$= \frac{(\text{Título del blanco} - \text{Título muestra}) \text{mL. eq} \left(127 \frac{\text{g}}{\text{L}}\right) \left(\frac{\text{L}}{\text{eq}}\right) \left(\frac{100}{1000 \text{mL}}\right)}{\text{Peso de muestra (g)}}$$

- **Índice de Peróxidos.**- Esta prueba es empleada para cuantificar la alteración del aceite causada por el enranciamiento, en el cual se determinan los miliequivalentes de oxígeno activo contenidos en un

Kilogramo de grasa, calculados a partir del yodo liberado del yoduro de potasio, operando en las condiciones especificadas. Las sustancias que oxidan al yoduro de potasio en las condiciones descritas, las consideramos peróxidos u otros productos similares provenientes de la oxidación de la grasa, por lo cual el índice obtenido es considerado, con una aproximación bastante aceptable, como una expresión cuantitativa de los peróxidos de la grasa muestra.

Procedimiento:

1. Se pesa 5 g de muestra en un Erlenmeyer de 250 mL con tapa esmerilada.
2. Se agrega 30 mL de cloroformo/ácido acético (1:3), 0.5 mL de solución KI saturada, se agita y agrega 30 mL de agua.
3. Se realiza la titulación con el yodo liberado con $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.1 N hasta decoloración.
4. Se agrega 0.5 mL de solución de almidón y se termina la titulación cuando desaparece el color azul.

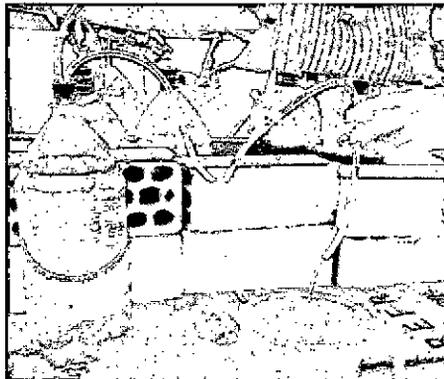
Cálculo:

$$\text{Índice de Peróxidos} = \frac{\text{Volumen } \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 (\text{mL}) \text{ N (meq) / mL}}{(\text{Peso de muestra})\text{g} * \left(\frac{1\text{kg}}{1000\text{g}}\right)}$$

4.5.4. Procedimiento para la determinación del volumen de la producción de biogás.- La medición del volumen producido se

realizó mediante el método de desplazamiento del volumen por el biogás producido hacia una jarra graduada. Para aplicar este método se utilizó una botella PET de 3 L, un tapón de goma con dos orificios mangueras transparentes de ¼ pulgada y una jarra graduada de 3 L (véase la figura 4.8).

FIGURA N° 4.8
DETERMINACIÓN DE VOLUMEN DE BIOGÁS POR EL MÉTODO
DESPLAZAMIENTO DE VOLUMEN



Fuente: Elaboración propia

Procedimiento:

- El biogás producido en los biodigestores fueron almacenados en bolsas colectoras herméticas de 2 L.
- Se conectó la bolsa a una de las mangueras que ingresaba a la botella llena de agua.
- La segunda manguera que salía del interior de la botella con agua se conectó a una jarra graduada de 3 L.

- Se abre la válvula de la bolsa colectora y el gas fluye a través de la manguera hacia el interior del recipiente y desplaza agua a través de la otra manguera hacia la jarra graduada.
- El volumen del líquido desplazado hacia la jarra indica la cantidad de biogás almacenado en la bolsa.

4.5.5. Determinación de la calidad de biogás producido.- Las muestras de biogás de los tres tratamientos fueron almacenadas en bolsas herméticas de 2 L y llevadas al laboratorio de Investigación de Fisicoquímica de la Facultad de Ciencias de la UNI; en donde el contenido de metano ($\%CH_4$) y dióxido de carbono ($\%CO_2$) de las muestras se cuantificaron mediante un cromatógrafo de gases VARIAN modelo 450-GC (figura 4.9).

**FIGURA N° 4.9
EQUIPO CROMATÓGRAFO DE GASES**



Fuente: Elaboración propia.

4.6. Procesamiento estadístico y análisis de datos.- Los datos recolectados durante la operación de los biodigestores para la determinación de la carga óptima de relación estiércol/agua, fueron analizados estadísticamente mediante el análisis de varianza (ANOVA) para comparar las diferencias de las medias que toma la variable dependiente con la finalidad de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, al nivel del 5% de probabilidad ($P \geq 0.05$) y al 95% de confianza. Después de haber comprobado que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, con el fin de tener mayores elementos para la toma de decisiones es importante saber dónde se encuentran dichas diferencias significativas y si éstas siguen unas tendencias que nos permitan una mejor toma de decisiones; para ello se recurrió a la prueba de Tukey, que nos permitió evaluar dicha diferenciación. La prueba de Tukey permite comparar todas las medias entre sí, tomándolas por pares. Asimismo, esta prueba establece un umbral HSD (Diferencia Honestamente Significativa), a partir del cual se establecen si hay diferencia significativa o no entre todas las posibles comparaciones múltiples. Las diferencias de medias que estén por encima de ese umbral se considerarán diferencias

significativas, las que no lo estén se considerarán diferencias no significativas.

Para la determinación del rendimiento de la producción de biogás mediante la inoculación de residuos aceitosos de fritura y su comparación con el tratamiento control, se utilizó el ANOVA y se determinó la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Al tener un tratamiento control y el interés de comparar cada una de las medias de los tratamientos contra el control, se recurrió a la Prueba de Dunnett que permite realizar las comparaciones múltiples, o sea la media del grupo control (grupo al que no se le aplica tratamiento) con las medias de los grupos experimentales (grupos que reciben tratamiento) y determinar el mejor tratamiento. Estos análisis se realizaron usando el programa Excel versión 2016.

CAPITULO V
RESULTADOS

5.1. Caracterización fisicoquímica de los residuos aceitosos de fritura.- La caracterización fisicoquímica de los residuos aceitosos de fritura sirvió para elegir los provenientes de uso en casa, ya que resultó menor acidez en relación a lo que proviene de una pollería.

TABLA N° 13
RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS DE FRITURA

Ensayo	Unidad	Aceite pollería*	Aceite doméstico**
Acidez	g de ácido oleico/100g	2.1	0.67
Densidad a 25°C	g/ml	0.9331	0.9181
Humedad	g/100g	< 0.01	0.02
Índice de Peróxido	meq oxígeno activo/kg	6.7	5.7
Índice de Refracción	-	1.475	1.4705
Índice de Saponificación	mg de KOH/g de grasa	197.76	194.62
Índice de Yodo(Wijs)	g de Iodo absorbidos/100g	122.49	118.81

Fuente: Elaboración propia.

*Aceite de pollería (residuos aceitosos de fritura generados en pollería) y **aceite doméstico (residuos aceitosos de fritura generado en casa).

5.2. Resultados de la determinación de la carga óptima (relación estiércol/agua).- Los resultados mostrados en la tabla N° 14 y representadas mediante el Gráfico 5.1 (pág. 79) corresponden a las mediciones de presiones en milibar que se realizaron con un manómetro tipo bourdon en las unidades de biodigestores de los 3 grupos de tratamiento cargados con estiércol/agua en la relación 1 a 1, 1 a 2 y 1 a 3, durante el periodo de operación de 30 días para la determinación de la carga óptima estiércol/agua para la producción de biogás en el presente estudio.

En cada uno de los biodigestores, se registraron valores de presión interna diferentes entre uno y el otro el cual indica que no todos producían la misma cantidad de biogás. A mayor producción y acumulación de biogás en el espacio libre del biodigestor, se entiende que ésta ejercerá mayor presión interna.

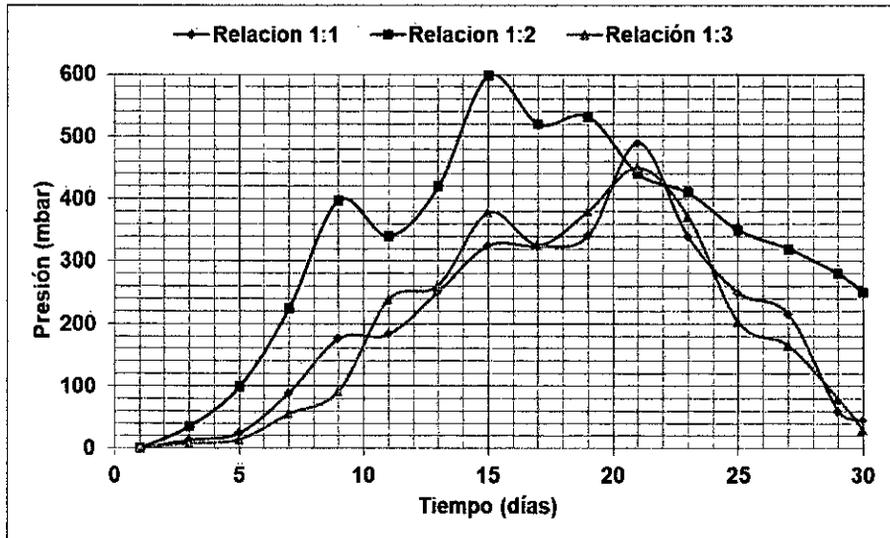
**TABLA N° 14
PRESION INTERNA (EN MILIBAR) EN LOS BIODIGESTORES**

RELACION (Estiercol:agua)	DÍAS															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	30
Relacion 1:1	0	13	25	89	176	183	252	325	324	341	490	339	250	215	60	45
Relacion 1:2	0	35	98	224	398	340	420	598	520	532	440	410	350	320	280	250
Relación 1:3	0	8	14	55	92	239	262	378	326	380	450	372	202	165	79	30

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 5.1

PRESIÓN INTERNA (mbar) EN BIODIGESTORES CARGADOS CON DIFERENTES RELACIONES DE ESTIÉRCOL/AGUA



Fuente: Elaboración propia

Al realizar el análisis estadístico ANOVA al nivel del 5% de probabilidad ($P \geq 0.05$) y al 95% de confianza con los resultados de la tabla N° 14, que son datos de presiones internas medidas en los tratamientos, se determinó que hay diferencias estadísticamente significativas; el cual indica que por lo menos un tratamiento es diferente como se muestra en la tabla 15.

TABLA N° 15: ANOVA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entregrupos	188457.32	2	94228.66	3.729017	0.031733012	3.204317292
Dentro de los grupos	1137106.55	45	25269.03			
Total	1325563.87	47				

Fuente: Elaboración propia.

Luego de determinar mediante el ANOVA que por lo menos un tratamiento es diferente, se aplicó la Prueba de Tukey al nivel del 5% de probabilidad ($P \geq 0.05$) y al 95% de confianza; con la cual se determinó que la mejor diferencia que existe es entre los tratamientos de la relación 1:2 y de la relación 1:3 como se muestra en la tabla 16.

**TABLA N° 16
RESULTADOS DE LA PRUEBA DE TUKEY**

	R 1:1	R 1:2	R 1:3
R 1:1		-130.53	4.66
R 1:2			135.19
R 1:3			

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el Excel, se determinó que la HSD (diferencia honestamente significativa) es de 135.12; y el único valor que supera es de 135.19, que es de la diferencia entre la relación 1:2 y 1:3. Se elige como el mejor tratamiento la relación 1:2 por tener una mejor media frente al resto de tratamientos.

5.3. Resultados de la evaluación de inoculación de residuos aceitosos de fritura según frecuencia semanal y quincenal.-

Para esta evaluación se trabajó con 5 grupos de biodigestores, cada grupo con dos unidades de biodigestores. Esto se realizó para determinar con qué frecuencia de inoculación de residuos

aceitosos de fritura se obtiene mejor producción de biogás. En la tabla N° 17 se muestran la configuración de los 5 tratamientos.

TABLA N° 17
CONFIGURACION DE LOS TRATAMIENTOS PARA
DETERMINAR LA FRECUENCIA MÁS ADECUADA DE
INOCULACIÓN DE RESIDUOS ACEITOSOS DE FRITURA

GRUPO DE TRATAMIENTO	% DE INOCULACIÓN	FRECUENCIA DE INOCULACIÓN
B _{control}	-	-
A	2.5%	Semanal
C	5%	Semanal
D	2.5%	Quincenal
E	5%	Quincenal

Fuente: Elaboración propia.

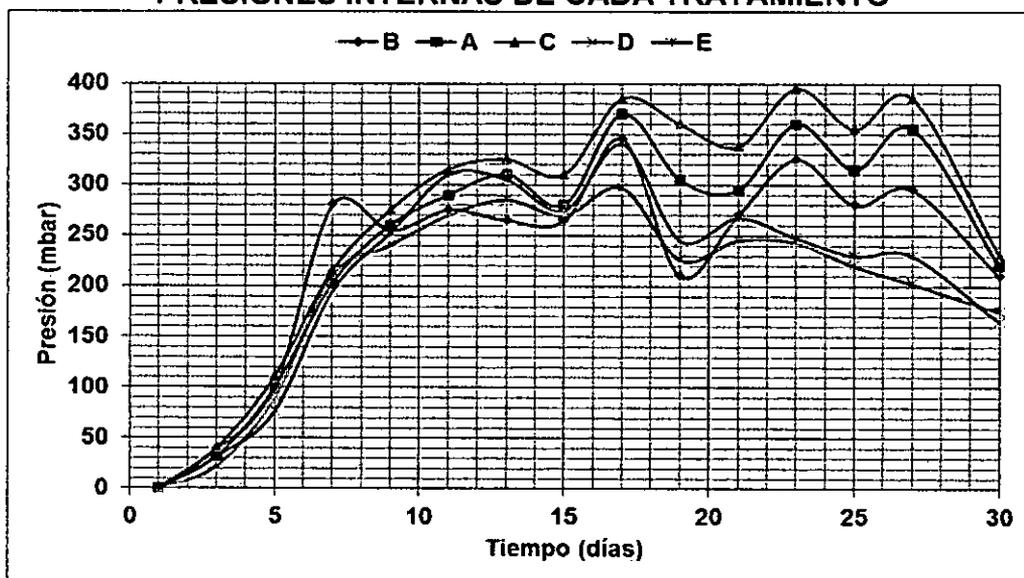
Todos los tratamientos trabajaron con una carga de una relación de estiércol/agua de 1 a 2. Los tratamientos A y C fueron inoculados con 2.5% y 5% de los residuos aceitosos de fritura, respectivamente los días 7, 14, 21 y 28 del periodo de evaluación; y los tratamientos D y E fueron inoculados con 2.5% y 5% de los residuos aceitosos de fritura, respectivamente los días 7 y 21 del periodo de evaluación. Se midieron las presiones internas en los biodigestores durante los 30 días de operación como se muestra en la tabla N° 18 y su representación mediante el Gráfico 5.2 (pág. 82).

TABLA N° 18
PRESIONES INTERNAS DE CADA TRATAMIENTO (en mbar)

TRATAMIENTO	DÍAS														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	30
B	0	38	98	280	255	275	265	265	345	210	270	325	280	295	210
A	0	32	99	203	260	290	310	280	370	305	295	360	315	355	220
C	0	40	110	215	275	315	325	310	385	360	337	395	355	385	230
D	0	22	90	210	240	270	285	270	297	226	245	243	220	202	175
E	0	31	76	195	252	310	305	275	340	245	267	247	230	230	165

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO N° 5.2
PRESIONES INTERNAS DE CADA TRATAMIENTO



Fuente: Elaboración propia.

Al realizar el análisis estadístico ANOVA al nivel del 5% de probabilidad ($P \geq 0.05$) y al 95% de confianza con los resultados de la tabla N° 18, se determina que no hay diferencia significativa entre los tratamientos, debido a que la F calculada es 0.981 menor al valor crítico que es de 2.502) como se puede observar en la tabla N° 19 (pág. 83).

TABLA N° 19: ANOVA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	46104.667	4	11526.167	0.981855	0.423165259	2.502656463
Dentro de los grupos	821742	70	11739.171			
Total	867846.67	74				

Fuente: Elaboración propia

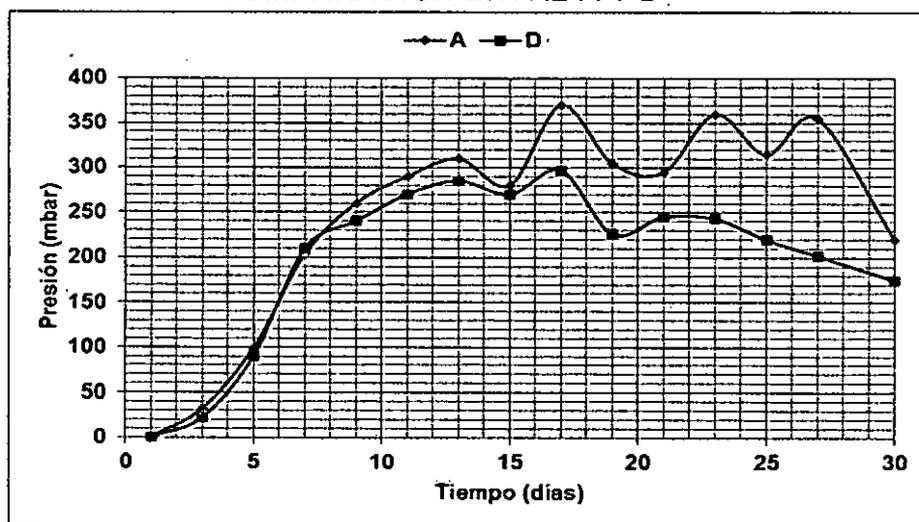
A continuación se muestra una comparación de los tratamientos de par en par, usando los datos de la tabla 18 (pág. 82).

**TABLA N° 20
COMPARACIÓN ENTRE A Y D.**

TRATAMIENTOS	DÍAS														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	30
A	0	32	99	203	260	290	310	280	370	305	295	360	315	355	220
D	0	22	90	210	240	270	285	270	297	226	245	243	220	202	175

Fuente: Elaboración propia.

**GRÁFICO N° 5.3
COMPARACIÓN ENTRE A Y D.**



Fuente: Elaboración propia

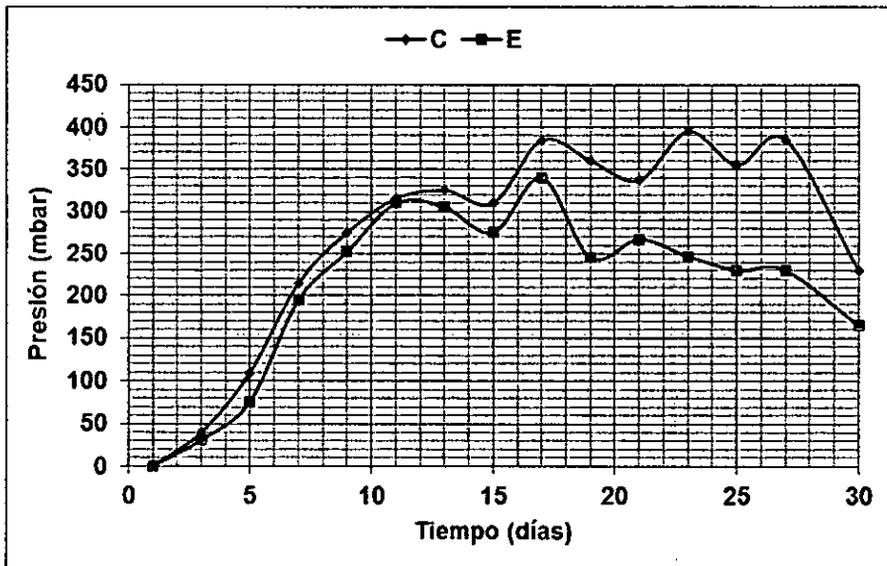
El grafico 5.3 (pág. 83) muestra la comparación de presiones internas registradas en los tratamientos A y D, que trabajaron con una inoculación del 2.5% de residuos aceitosos de fritura, inoculados con una frecuencia semanal y quincenal, respectivamente. Siendo el tratamiento A mejor frente a D, debido a que la media es de 246.27, mayor a la media del D que es de 199.67.

TABLA N° 21
COMPARACIÓN ENTRE C Y E

TRATAMIENTOS	DÍAS														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	30
C	0	40	110	215	275	315	325	310	385	360	337	395	355	385	230
E	0	31	76	195	252	310	305	275	340	245	267	247	230	230	165

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO N° 5.4
COMPARACIÓN ENTRE C Y E



Fuente: Elaboración propia

El grafico 5.4 muestra la comparación de presiones internas registradas en los tratamientos C y E, que trabajaron con una

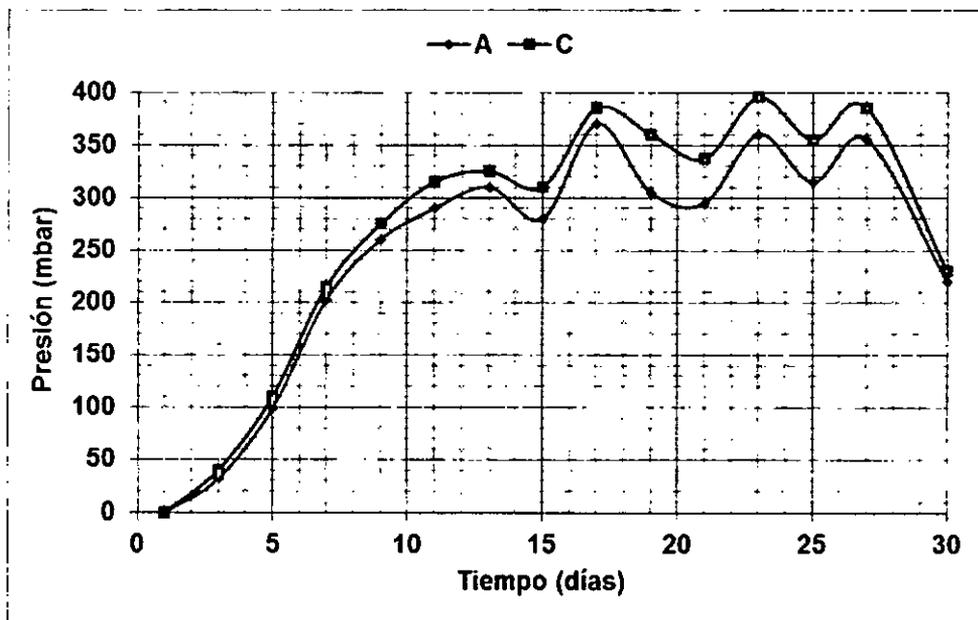
inoculación del 5% de residuos aceitosos de fritura, inoculados con una frecuencia semanal y quincenal, respectivamente. El tratamiento C resultó ser mejor que el tratamiento E, ya que la media obtenida estadísticamente para C es de 269.13 mayor que la de E que es 211.20.

TABLA N° 22
COMPARACIÓN ENTRE A Y C

TRATAMIENTOS	DÍAS														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	30
A	0	32	99	203	260	290	310	280	370	305	295	360	315	355	220
C	0	40	110	215	275	315	325	310	385	360	337	395	355	385	230

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO N° 5.5
COMPARACIÓN ENTRE A Y C



Fuente: Elaboración propia

El gráfico 5.5 muestra la comparación de presiones internas registradas de los tratamientos A y C que trabajaron con inoculación

semanal de residuos aceitosos de fritura al 2.5 % y 5%, respectivamente. El tratamiento C es mejor estadísticamente, ya que su media es de 269.13 mayor al de A que es de 246.27.

De las comparaciones realizadas de par en par, tomando en cuenta la media estadística de cada tratamiento se obtiene las mejores medias para los tratamientos C, A y B, en forma descendente.

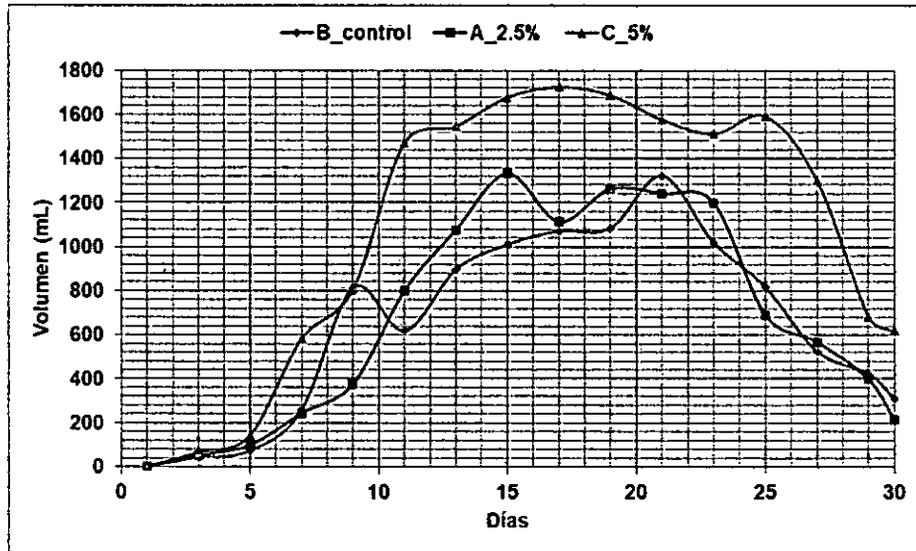
5.4. Resultados de la evaluación de producción de biogás. - En la etapa de evaluación de la frecuencia de inoculación del aceite se determinó que los mejores tratamientos fueron C, A inoculado semanalmente con 5%, 2.5% de residuos aceitoso de fritura, respectivamente; por lo que se volvió a experimentar con estos grupos incluido el tratamiento control (B), por un periodo de 30 días. Los resultados de la producción de biogás que fueron cuantificados por el método de desplazamiento de volumen se muestran en la tabla N° 23 y su representación mediante el gráfico N° 5.6 (pág. 87).

TABLA N° 23: PRODUCCION DE BIOGÁS (mL)

TRATA- MIENTO	DÍAS															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	30
B (Control)	0	42.64	72.16	258.00	816.11	618.28	897.08	1009.46	1071.91	1084.51	1321.51	1019.51	816.92	523.72	422.50	309.00
A (Al 2.5%)	0	50.11	98.00	242.00	376.00	800.32	1076.50	1331.35	1113.49	1260.76	1240.00	1199.10	690.36	568.00	396.00	213.00
C (Al 5%)	0	64.94	142.00	580.00	804.00	1468.00	1545.00	1677.60	1724.00	1687.50	1577.00	1510.54	1592.00	1302.00	682.00	618.00

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 5.6 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS



Fuente: Elaboración propia

Al realizar el análisis estadístico ANOVA al nivel del 5% de probabilidad ($P \geq 0.05$) y al 95% de confianza con los resultados de la tabla N° 23, que son datos de volumen de biogás producido en los tratamientos, se determinó que hay diferencias estadísticamente significativas ($F_{\text{calculado}}=3.26 > F_{\text{crítico}}=3.20$); el cual indica que por lo menos un tratamiento es diferente como se muestra en la tabla 24.

TABLA N° 24: ANOVA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1767677.7	2	883838.85	3.265968	0.047376324	3.204317292
Dentro de los grupos	12177937	45	270620.82			
Total	13945615	47				

Fuente: Elaboración propia.

A razón de determinar cuál es el mejor tratamiento se recurrió a la Prueba de Dunnett, que es una herramienta estadística que permite realizar las comparaciones múltiples del tratamiento control con los otros tratamientos.

**TABLA N° 25
RESULTADOS DE LA PRUEBA DE DUNNETT**

Medias de los tratamientos	Comparación con el tratamiento control	Valor teórico del estadístico
$\bar{Y}_B = 642.71$		$D_\alpha = 260.11$
$\bar{Y}_A = 665.94$	$\bar{Y}_A - \bar{Y}_B = 23.23$	
$\bar{Y}_C = 1060.91$	$\bar{Y}_C - \bar{Y}_B = 418.20$	

Fuente: Elaboración propia.

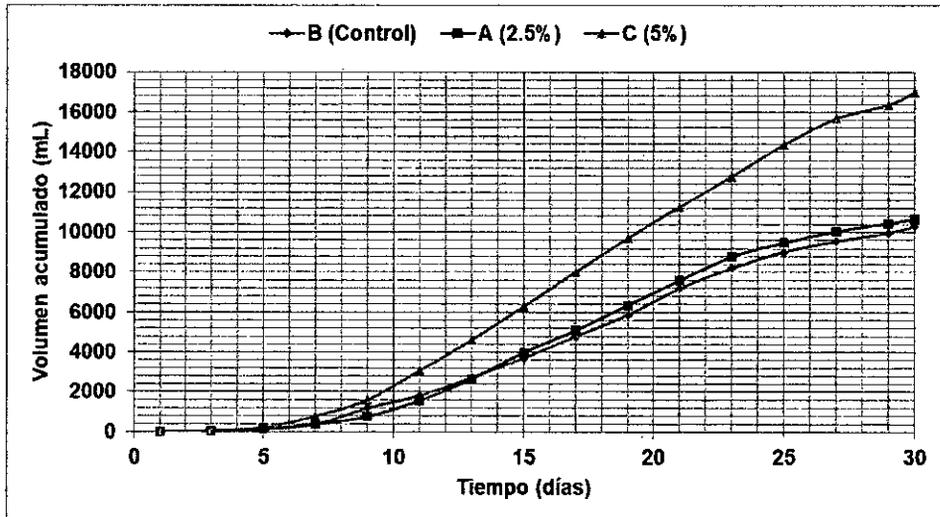
La Prueba de Dunnett, indica que el mejor tratamiento es "C" que trabajó con residuos aceitosos de fritura al 5% inoculado semanalmente, seguido por el biodigestor "A" que trabajó con 2.5% de residuos aceitosos de fritura. El biodigestor B (control) dio menor producción que A y C.

**TABLA N° 26
PRODUCCION ACUMULATIVA DE BIOGÁS**

TRATAMIENTO	DÍAS															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	30
B (Control)	0	42.64	114.80	372.80	1188.91	1807.19	2704.27	3713.73	4785.64	5870.16	7191.67	8211.18	9028.10	9551.82	9974.32	10283.32
A (Al 2.5%)	0	50.11	148.11	390.11	766.11	1566.43	2642.93	3974.28	5087.77	6348.53	7588.53	8787.63	9477.89	10045.99	10441.99	10654.99
C (Al 5%)	0	64.94	206.94	786.94	1590.94	3058.94	4603.94	6281.55	8005.55	9693.05	11270.05	12780.59	14372.59	15674.59	16356.59	16974.59

Fuente: Elaboración propia.

**GRÁFICO N° 5.7
PRODUCCIÓN ACUMULATIVA DE BIOGÁS**



Fuente: Elaboración propia

El gráfico 5.7 nos muestra la producción acumulativa de biogás, en la que se muestra la mayor producción de biogás para el tratamiento "C" que fue inoculado con 5% de residuos aceitosos de fritura (alcanzando 16.97 L), para el tratamiento "A" que trabajó con inoculación de 2.5% de residuos aceitosos de fritura fue de 10.65 L y el tratamiento "B" (control) se obtuvo una producción de 10.28 L en los 30 días de operación.

**TABLA N° 27
VOLUMEN ACUMULADO DE BIOGÁS**

Tratamiento	Volumen acumulado al día 30
A	10.65 L
B (control)	10.28 L
C	16.97 L

Fuente: Elaboración propia

Fórmula para determinar el porcentaje de variación de la producción de biogás en los tratamientos A y C respecto al tratamiento control B:

$$\Delta V_{X/B} = \left[\frac{V_X - V_B}{V_B} \right] * 100$$

Donde:

- $\Delta V_{X/B}$: Incremento de producción de biogás en el tratamiento inoculado con x% de residuos aceitosos de fritura.
- V_X : Volumen generado en el tratamiento inoculado x% de residuos aceitosos de fritura.
- V_B : Volumen generado en el tratamiento control.

La fórmula dada ha sido adaptada de la UNION Revista Iberoamericana de Educación Matemática N° 24, desarrollada por Espinel, Bruno y Plasencia (2010).

- Incremento de producción de biogás en el tratamiento A, donde se inocularon 2.5% de residuos aceitosos de fritura:

$$\Delta V_{A/B} = \left[\frac{V_A - V_B}{V_B} \right] * 100 = \left[\frac{10.65 - 10.28}{10.28} \right] * 100 = 3.59\%$$

- Incremento de producción de biogás en el tratamiento C, donde se inocularon 5% de residuos aceitosos de fritura:

$$\Delta V_{C/B} = \left[\frac{V_C - V_B}{V_B} \right] * 100 = \left[\frac{16.97 - 10.28}{10.28} \right] * 100 = 65.07\%$$

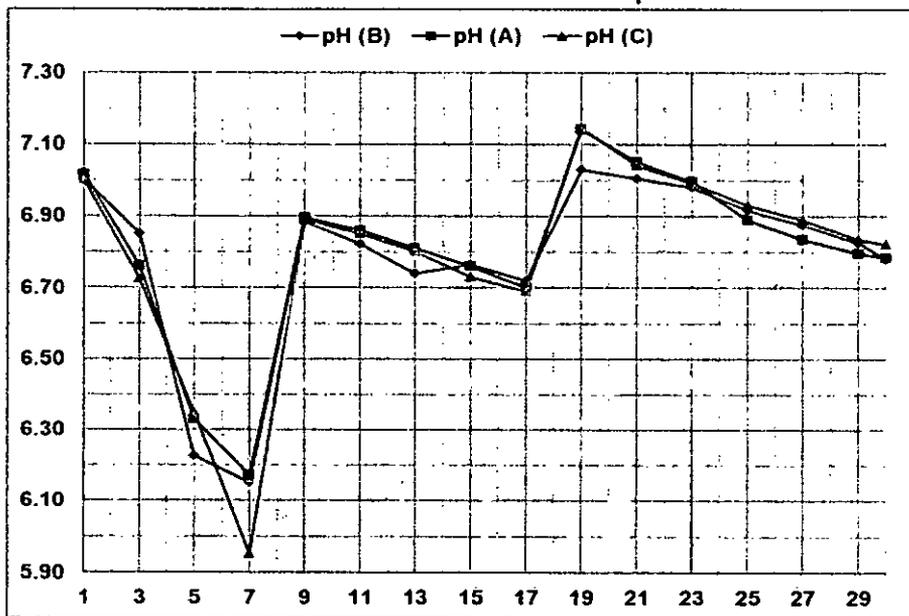
5.5. Resultados de la medición del pH.- Durante la operación de los biodigestores se realizó la medición interdiaria de pH con un pHmetro digital.

**TABLA N° 28
REGISTRO DE PH**

TRATAMIENTO	DÍAS															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	30
B	7.00	6.85	6.23	6.15	6.89	6.82	6.74	6.77	6.72	7.03	7.01	6.98	6.92	6.88	6.83	6.78
A	7.02	6.76	6.33	6.17	6.90	6.86	6.81	6.76	6.70	7.14	7.05	7.00	6.89	6.84	6.80	6.79
C	7.00	6.73	6.35	5.95	6.89	6.85	6.80	6.73	6.69	7.15	7.04	6.99	6.93	6.89	6.84	6.82

Fuente: Elaboración propia.

**GRÁFICO N° 5.8
COMPORTAMIENTO DEL pH**



Fuente: Elaboración propia

Este gráfico nos muestra el comportamiento del pH en los biodigestores. Según Gerardi (2003), en un biodigestor que funciona correctamente, se produce un pH óptimo entre 6.8 y 7.2; sin

embargo, el valor más bajo se registró de 5.95 al día 7, por lo que se añadió bicarbonato para ajustar el pH en los biodigestores con lo cual se logró mantener dentro del rango óptimo.

5.6. Resultados del análisis cromatográfico de las muestras de biogás.- Durante la operación de los biodigestores se tomó muestra en dos tiempos: el primero fue de la producción de la primera semana:

**TABLA N° 29
ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DE BIOGÁS AL DÍA 7**

MUESTRA	COMPOSICIÓN		
	% AIRE	% CH ₄	% CO ₂
A	49.9	49.5	0.42
B	89.5	9.9	0.09
C	91.1	18.0	0.23

Fuente: Elaboración propia

La segunda muestra llevada al laboratorio fue de la recolección de la cuarta y última semana de operación:

**TABLA N° 30
ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DE BIOGÁS AL DÍA 30**

MUESTRA	COMPOSICIÓN		
	% AIRE	% CH ₄	% CO ₂
A	20.7	50.55	28.6
B	27.2	44.9	27.7
C	18.3	52.9	28.6

Fuente: Elaboración propia

- **Fórmula para calcular la variación porcentual de metano en la muestra A respecto a la muestra B:**

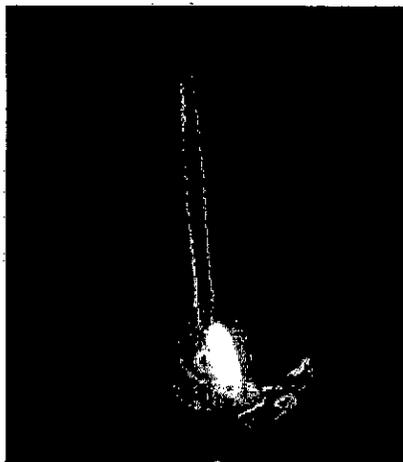
$$\Delta CH4_{A/B} = \left[\frac{\%CH4_A - \%CH4_B}{\%CH4_B} \right] * 100 = \left[\frac{50.55 - 44.90}{44.90} \right] * 100 = 12.58\%$$

- **Fórmula para calcular la variación porcentual de metano en la muestra C respecto a la muestra B:**

$$\Delta CH4_{C/B} = \left[\frac{\%CH4_C - \%CH4_B}{\%CH4_B} \right] * 100 = \left[\frac{52.90 - 44.90}{44.90} \right] * 100 = 17.81\%$$

5.7. Resultados de la prueba de llama del biogás producido

**FIGURA 5.1
PRUEBA DE LLAMA DEL BIOGÁS PRODUCIDO**



Fuente: Elaboración propia

En esta figura se observa la prueba de llama de color azul. Esta prueba se realizó al final del proceso de operación de los biodigestores.

CAPITULO VI

DISCUSION DE RESULTADOS

6.1. Contrastación de hipótesis con los resultados.- La producción del biogás se evaluó durante 30 días a temperatura ambiental que osciló entre 25 a 30°C, midiendo el volumen por el método del desplazamiento de volumen y el contenido de metano se cuantificó mediante la técnica de cromatografía de gases. Se encontró que el tratamiento C que trabajó con la inoculación de un 5% de residuos aceitosos de fritura, generó mayor producción de biogás acumulado, alcanzando 16.97 L y en cuanto al contenido de metano alcanzó un 52.9%; mientras que A y B alcanzaron 10.65 L y 10.28 L de biogás acumulado y 50.55% y 44.9% en cuanto al contenido de metano, respectivamente. Esta investigación demostró que la adición de los residuos aceitoso de fritura sí aumenta la producción de biogás. Esto quiere decir que la hipótesis de la investigación “El uso de residuos aceitosos de fritura aumenta la producción de biogás” queda demostrada.

6.2. Contrastación de resultados con otros estudios similares.- Los resultados obtenidos en la presente investigación, indica que con la inoculación de residuos aceitosos de fritura al 5% se obtiene un aumento de la producción de biogás en un 65.07% y asimismo mejora su calidad en un 17.81% con relación al

tratamiento control, de manera similar Dias, E. et al. (2007) obtuvieron en un biodigestor tubular de flujo continuo trabajó con mezcla de boñiga con suplementación de grasas residuales del 2.5% y 5%, obteniendo mejores resultados para el 5% que la producción de biogás aumenta en un 95.5% y asimismo mejora su calidad en un 14.8% con relación al tratamiento control.

J. V. Thanikal et al. (2015), estudiaron la digestión anaerobia de una mezcla de residuos de vegetales y aceite vegetal usado en cocina, utilizando biodigestores discontinuos de 6 L, de secuenciación anaeróbica operados a temperatura 35°C. El tratamiento que operó sólo con residuos vegetales dio un rendimiento de biogás de 200 a 325 mL/hora, mientras que el segundo tratamiento donde se añadió 5 mililitros de aceite aumentó el caudal de biogás a 425 mL/hora. Los autores concluyen que la codigestión de sustrato vegetal con aceite usado en cocina mostró un aumento en la producción de biogás del 30%.

Asimismo, Bhuyar, L. et al. (2009), estudiaron la producción de biogás a partir de subproductos de una especie de aceite vegetal (*Belanites Aegyptiaca*), en con dos tratamientos I y II, utilizando hingan seco en polvo más estiércol de vaca y solamente hingan, respectivamente. El tratamiento II con material de alimentación hingan mas estiércol de vaca dio un rendimiento medio de 35.03

L/Kg y un rendimiento máximo de 54L/Kg; mientras que el tratamiento alimentado con 100% biomasa de hingan dio un rendimiento medio de 34.35 L/Kg y un rendimiento máximo de 52L/Kg de biogás. Los autores concluyen que el ligero aumento en el rendimiento medio en el caso del tratamiento I se debió al mayor número de microorganismos fermentativos presentes en el estiércol fresco de vaca que fue utilizado.

Panadare y Rathod (2015), mencionan que para los procesos de fermentación la concentración de los residuos aceitosos de fritura y la glucosa de grado técnico varía de 1 a 10% y requiere una optimización experimental que varía con diferentes procesos de fermentación. En general, se utiliza 5% de residuos aceitosos de fritura y 7 a 8% de glucosa de grado técnico. No obstante, encontraron que la concentración optimizada para proceso de fermentación en particular fue 5% de glucosa y 5% de residuos aceitosos de fritura, lo que dio también alta producción de biomasa y actividad de emulsificación.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones.- Habiendo evaluado el uso de residuos aceitosos de fritura en la producción de biogás, se concluye lo siguiente:

- Se caracterizó física y químicamente los residuos aceitosos de fritura (de pollería y de uso doméstico) a través de los siguientes parámetros (gravedad específica, índice de refracción, humedad, índice de acidez, índice de saponificación, índice de yodo, índice de peróxidos), habiéndose obtenido resultados similares para ambas muestras; el aceite de uso doméstico presentó menor índice de acidez, por lo que se eligió para trabajar en las pruebas experimentales a fin de no alterar el pH en los tratamientos, considerando la bibliografía la cual menciona que para un rendimiento óptimo de los microbios, el pH en el digestor debe mantenerse en el rango de 6.8 - 8.0. El valor de pH por debajo o por encima de este intervalo puede restringir el proceso en el reactor ya que los microorganismos y sus enzimas son sensibles a la desviación del pH (Yadvika et al., 2004 citado en Tadesse, 2010).

- Se cuantificó el volumen de biogás mediante el método de desplazamiento de volumen de agua por el biogás hacia una jarra graduada. Se encontró que el tratamiento C que trabajó con la inoculación de un 5% de residuos aceitosos de fritura, generó mayor producción de biogás acumulado, alcanzando 16.97 L; mientras que el tratamiento A inoculado con 2.5% de residuos aceitosos de fritura y el tratamiento B (control) alcanzaron 10.65 L y 10.28 L de biogás acumulado durante los 30 días de operación.
- Se cuantificó la composición del biogás (%CH₄ y %CO₂) mediante el método de cromatografía de gases. Se encontró 52.9% de CH₄ y un 28.6% de CO₂ para el tratamiento C que trabajó con 5% de residuos aceitosos de fritura inoculados de manera semanal, 50.55% de CH₄ y un 28.6% de CO₂ para el tratamiento A que trabajó con 2.5% de residuos aceitosos de fritura inoculados de manera semanal y 44.9% de CH₄ y un 27.7% de CO₂ para el tratamiento B (control). El contenido de CH₄ obtenido en los tratamientos C y A, representan un incremento en un 17.81% y 12.58% respecto al tratamiento B (control). Estadísticamente se demostró que el tratamiento C fue el mejor tratamiento.

7.2. Recomendaciones.-

- La aplicación a grandes escalas de la tecnología de biodigestores, tomando en cuenta los resultados obtenidos en la presente investigación es recomendable, ya que al usar los residuos aceitosos de fritura al 5% se obtiene mayor producción de biogás.
- La implementación de este tipo de alternativas es recomendable por ejemplo en las granjas, centros de acopio y procesamiento de animales o subproductos de los mismos, brindaría una fuente alternativa de energía ambientalmente amigable para sus procesos.
- La metodología aplicada en la presente investigación puede ser aplicado por las empresas e instituciones que se dedican a desarrollar proyectos sociales en las zonas rurales, orientadas a la mejora de la calidad de vida de las personas; incluso puede ser aplicado por empresas como camales, granjas, restaurantes en zonas campestres a fin de reaprovechar los residuos de aceites usados en la cocina y estiércol de animales.

CAPITULO VIII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 8.1. Alcida, D. et al. (2012). Producción de biogás mediante digestión anaerobia de aguas residuales provenientes de la industria palmera. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM), Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- 8.2. Arce, J. (2011) Diseño de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del litoral. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1593/15/UPS-GT000209.pdf>
- 8.3. Argentina: Buscan optimizar la producción de biodiesel a partir de aceite de microalgas. Lunes, 04 de junio de 2015
[enlinea].<http://www.aquahoy.com/index.php?id=1353&option=comcontent&task=view>
- 8.4. Abass O. Alade, Ahmad T. Jameel, Suleyman A. Muyubi, Mohamed I. Abdul Karim And Md. Zahangir Alam (2011). Removal of oil and grease as Emerging Pollut ants of Concern (EPC) In Wastewater Stream (IIUM Engineering Journal, Vol. 12, No. 4, 2011: Special Issue on Biotechnology Alade et al. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/267787292_Removal_of_O

il_and_Grease_as_Emerging_Pollutants_of_Concern_EPC_in_Wastewater_Stream.

8.5. Bahamonde, P. (2017). Curso formación especializada en biogás para profesionales, modulo 2 – diseño de plantas pequeñas. Chile. Disponible en <https://www.4echile.cl/4echile/wp-content/uploads/2017/11/Biogas-modulo2-Diseno-Plantas-Pequeñas-11-2017.pdf>

8.6. Belayhun Assegid (2014). M.Sc. Thesis. Biogas production from co-digestion of cow dung and banana peels. Haramaya University, Ethiopia.

8.7. Bhuyar, L. B. et al. (2009). Utilization of a Vegetable Oil Species Residue for Biogas Production, L.B. Bhuyar, et al. / *International Energy Journal* 10 (2009) 157-166, India.

8.8. Castillo, D. y Vargas, C. (2011). Obtención de Biogás a Partir de Excremento de Cuy en Condiciones Ambientales en Tacna Perú. *Revista Ciencia & Desarrollo* 13, 84-91.

8.9. C. Panadare, V. K. Rathod, “Applications of Waste Cooking Oil Other Than Biodiesel: A Review”. *Iranian Journal of Chemical Engineering, Vol. 12, No. 3 (Summer 2015), IChE, p. 55 – 76.*

8.10. Demetriades, P. (2008). Thermal pre-treatment of cellulose rich biomass for biogas production. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. ISSN 1101-8151 ISRN SLU.

- 8.11.** Diagnóstico ambiental: Gestión de aceites vegetales y grasas de origen animal usados en la ciudad de Neuquen, 2012. <http://coaliccioncivicaari.org.ar/publication/view/informe-sobre-gestion-de-aceites-vegetales-y-grasas-animales-en-neuquen/>
- 8.12.** E.D. Dias, J.C. Kreling, R. Botero, J.V. Murillo (2007). Evaluación de la productividad y del efluente de biodigestores suplementados con grasas residuales. Disponible en http://www.researchgate.net/publication/238749162_EVALUACION_DE_LA_PRODUCTIVIDAD_Y_DEL_EFLUENTE_DE_BIODIGESTORES_SUPLEMENTADOS_CON_GRASAS_RESIDUALES
- 8.13.** Espinel, Bruno y Plasencia (2010). La comprensión de gráficas de porcentaje de variación en situaciones cotidianas. UNION Revista Iberoamericana de Educación Matemática N° 24, páginas 83-102 ISSN: 1815-0640. Disponible en http://www.fisem.org/www/union/revistas/2010/24/Union_024_010.pdf
- 8.14.** Fernández, F. y Groppelli, E. (2012). Puesta en marcha del biodigestor anaeróbico para el tratamiento de los residuos sólidos biodegradables en el Municipio de Oro Verde, Provincia de Entre Ríos, Argentina. Publicación Electrónica Jornadas GIRSU 2012.
- 8.15.** Gautam, R.S., Baralb, S. Hera, 2009. Biogas as a sustainable energy source in Nepal: Present status and future challenge; Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13:248–252.

- 8.16.** Guo, L. (2010). Potential of biogas production from livestock manure in China -GHG emission abatement from manure-biogas-digestate system. *Master's Thesis within the Industrial Ecology programme*. Department of Energy and Environment, *Division of Energy Technology*, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- 8.17.** INTI, 2012 (Instituto Nacional de Tecnología Industrial del Ministerio de Producción de Argentina)
- 8.18.** IPE (Instituto Peruano de Economía, 2015). Disponible en <http://www.ipe.org.pe/content/hogares-con-un-mejor-ambiente>
- 8.19.** J. V. Thanikal et al. (2015), Anaerobic Co-Digestion of Vegetable Waste and Cooked Oil in Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR). *Int'l Journal of Advances in Agricultural & Environmental Engg. (IJAAEE)* Vol. 2, Issue 1 (2015) ISSN 2349-1523 EISSN 2349-1531.
- 8.20.** Karki, A., Shrestha, J. y Bajgain, S. (2005). *BIOGAS As Renewable Source of Energy in Nepal, Theory and Development* ISBN: 99946-34-76-3.
- 8.21.** Knothe, G. and Steidley, K. R., "A comparison of used cooking oils: A very heterogeneous feedstock for biodiesel", *Bioresour. Tech.*, 100 (23), 5796 (2009)
- 8.22.** Khalisanni, K. Khalizani, K., Rohani, M. S. and Khalid, P. O., "Analysis of waste cooking oil as raw material for biofuel production",

Global J. Environ. Res., 2 (2), 81 (2008)]

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.414.3929&rep=rep1&type=pdf>

8.23. Lorena Tobares Trabajo seleccionado en el 3er. Congreso Latinoamericano y del Caribe de Refinación (Buenos Aires, octubre 2012). La importancia y el futuro del biogás en la Argentina.

Disponible en

http://www.petrotecnica.com.ar/1_2013/Petrotecnica/PdfsSinPublic/LaImportancia.pdf

8.24. Mata y Merino, (1990). Población y medio ambiente en Costa Rica (en línea). Asociación Demográfica Costarricense. San José, CR. 16 p. Consultado el 12 de agosto del 2015.

<http://ccp.ucr.ac.cr/bvp/pdf/medioambiente/poma1990.pdf>

8.25. Man, K. L. Keat, T. L. and Abdul, R. M., "Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review", *Biotechnol. Adv.*, 28 (4), 500 (2010).

8.26. Mangesh, G. K. and Ajay, K. D., "Waste cooking oils an economical source for biodiesel: A review", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45 (9), 2901 (2006)

8.27. Makarevičienė, Kalenska, Skorupskaitė, Yunik, Gumbytė y Aleksandras (2013). The use of Oilseed Meal for the Production of

Biogas. Stulginskis University, Lithuania. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

8.28. Martí J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. GTZ-Energía. Bolivia.

8.29. Ordax de Castro, Carlos (28 de febrero, 2013), presentó los resultados del Proyecto VALUVOIL: Valorización integral de los residuos procedentes del procesado de aceites vegetales usados (AVUs). España

8.30. Palomino, V. (2007). Tratamiento de Residuos Sólidos Domésticos mediante Biodigestores para la obtención de Biogás y Bioabonos. Tesis de pregrado de ingeniería ambiental de la UNALM, Perú.

8.31. Pérez, P. y Viniestra G., s.f. potencial uso del estiércol en la alimentación de los bovinos. Laboratorio de biotecnología, instituto de investigaciones médicas, universidad nacional autónoma de México, p. 242. Recuperado de:

<http://fmvz.unam.mx/fmvz/cienciavet/revistas/CVvol1/CVv1c10.pdf>

8.32. Qamaruz N. (2010). The Applicability of Batch Tests to Assess Biomethanation Potential of Organic Waste and assess scale up to Continuous Reactor Systems. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the Degree of PhD in Environmental Engineering in the University of Canterbury.

8.33. Red Mexicana de Bioenergía, 2017. Recuperado de

http://rembio.org.mx/?page_id=643

8.34. Recortes de Prensa – Agosto 18 de 2006, PORTAFOLIO, Aceite de cocina moverá buques [en línea].

<http://www.cco.gov.co/recortes%20de%20prensa/Recortes%20de%20Prensa%20agagos%2018%202006.doc>

8.35. Rivera, M. (2010). Producción de abono orgánico y biogás mediante Biodigestión Anaeróbica de Lodos Activos. Seminario de Título para Optar al Título de Ingeniero Agrónomo y al Grado Académico de Licenciado en Agronomía. Universidad de La Serena, Facultad de Ciencias, Escuela de Agronomía – Chile.

8.36. Rodríguez, L. (2014). Viabilidad Técnica para producción de Biogás a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos – FORSU -Bogotá. Disponible en

<http://repository.ean.edu.co/bitstream/handle/10882/1560/RodriguezLuis2014.pdf?sequence=1>

8.37. Smith, K.; A. L. Aggrawal and R. M. Dave (1983) Air Pollution and Rural Biomass Fuels in Developing Countries: A Pilot Study in India and Implications for Research Policy, Atmospheric Environment, 17(11).

<http://ehsdiv.sph.berkeley.edu/krsmith/publications/Atmos%20Environment%2083.pdf>

8.38. Saucedo, J. (2007). Degradación y estabilización acelerada de residuos sólidos urbanos (RSU) por tratamientos aerobios y anaerobios.

http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcnica/informe_tecnico_dgcnica_2007_08.pdf

8.31. Toala, E. (2013). "Diseño de un biodigestor de polietileno para la obtención de biogás a partir del estiércol de ganado en el rancho verónica". Tesis de Grado previo a la obtención del título de ingeniero en biotecnología ambiental. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas. Riobamba – Ecuador.

8.32. Varnero, M. (2011). Manual de Biogás, FAO Santiago de Chile.

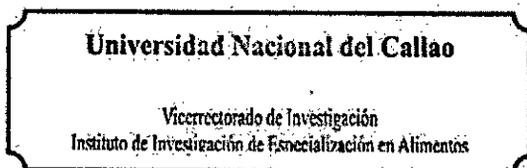
8.33. Zavala C. (2012). "Caracterización de compuestos livianos de petróleo y pesticidas organoclorados por cromatografía de gases". Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ciencias. Lima – Perú.

CAPITULO IX

9.1. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿El uso de residuos aceitosos de fritura permitirá aumentar la producción de biogás?	<p>Objetivo General: Analizar el uso de los residuos aceitosos de fritura en la producción de biogás.</p> <p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caracterizar física y químicamente los residuos aceitosos de fritura. • Cuantificar la producción de biogás por el método de desplazamiento de líquido por el biogás a una jarra graduada. • Cuantificar la composición del biogás producido en función de %CH₄ y %CO₂, mediante el cromatógrafo de gases. 	El uso de los residuos aceitosos de fritura aumenta la producción de biogás.	<p>Dependiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Producción de biogás <p>Independiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Residuos aceitosos de fritura 	<p>De la variable dependiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Del volumen de biogás producido en litros (L) • De la calidad: % de CH₄ en la muestra <p>De la variable independiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Volumen de residuos aceitosos de fritura en mililitros (mL) 	Diseño experimental realizado a escala de laboratorio, en biodigestores diseñados de 3000 mL, con volumen de trabajo 80% y el 20% de espacio libre donde se almacenaba la producción diaria de biogás.

9.2. Constancia de análisis de estiércol fresco de bovino



RESULTADOS ANÁLISIS QUIMICO

SOLICITANTES : Jennifer Hinga Blas y Hernán Villanueva Fernández
DIRECCIÓN LEGAL : Alumnos FIQ
RUC: S/R Teléfono: 4531528
ANALISIS : Sólidos totales ml
IDENTIFICACIÓN MUESTRA : Estiércol Vacuno
CANTIDAD RECIBIDA : 500 gr.
MARCA(S) : Sin marca.
FORMA DE PRESENTACIÓN : Líquido viscoso
FECHA DE RECEPCIÓN : 06/07/16
ENSAYOS SOLICITADOS : Determinación de Sólidos Totales

RESULTADOS:

Sólidos totales **0,362033 grs/ml**

Adicionalmente: **determinación de la densidad de la muestra 0,703 grs/ml**

Condiciones utilizados en el Laboratorio
Temperatura 120 - 125 °C

Métodos utilizados en el laboratorio
Peso de residuo seco

Fecha de recepción: 05 de Julio del 2016

Fecha de emisión: 06 de Julio del 2016

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**
INSTITUTO DE INVESTIGACION DE ESPECIALIZACION EN ALIMENTOS
Ing. C. Mabel Emma Chavez
DIRECTORA (E)

Ciudad Universitaria, Pabellón IEA/CET 2do p
Av. Juan Pablo II N°306 Bellavista-Colao
Tel: 0445-2323
iea@unac.pe

9.3. Constancia de análisis de parámetros fisicoquímicos de los residuos aceitosos de fritura



INFORME DE ENSAYO N° 1-01973/17

Pag 01

Solicitante : JENNIFER HINGA BLAS.
 Domicilio legal : Av. Los Platanos Mz. R L1. 19 - Urb. El Rosario del Norte - San Martín de Porres
 Producto declarado : ACEITE DOMESTICO
 Cantidad de Muestras para el Ensayo : 1 muestra x 500 mL
 Muestra proporcionada por el solicitante
 Identificación de la muestra : MUESTRA 1 FM 08/03/17
 Forma de Presentación : En frasco de plástico cerrado
 Fecha de recepción : 2017 - 03 - 08
 Fecha de inicio del ensayo : 2017 - 03 - 08
 Fecha de término del ensayo : 2017 - 03 - 13
 Ensayo realizado en : Laboratorio de Física Química
 Identificado con : NIS 17003263 (EX-04748-2017)
 Validez del documento : Este documento es válido solo para la muestra descrita

Ensayo	LC	Unidad	Resultado
Acidez	-	g de ácido oleico/100 g	0.67
Densidad a 20°C	-	g/mL	0.9181
Humedad	0.01	g/100 g	0.02
Índice de Peróxido	-	meq oxígeno activo /kg	0.7
Índice de Refracción	-	-	1.4705
Índice de Saponificación	-	mg de KOH/g de grasa	194.82
Índice de Yodo (IYI)	-	g de Iodo absorbido/100 g	119.81

LZ: Límite de aceptación

MÉTODOS

Acidez: ISO 658:2009 Animal and vegetable fats and oils - Determination of acid value and acidity
 Densidad a 20°C: AOCs Co - 18a - 03, Ed. 2009. SECTION 2009 - Specific Gravity Of Oil and Liquid Fats
 Humedad: ISO 663:2016 Animal and Vegetable Fats and Oils - Determination of Moisture and Volatile Matter Content
 Índice de Peróxido: ISO 2160:2007 Animal and vegetable fats and oils - Determination of Peroxide Value
 Índice de Refracción: AOCs - Co T-43, Ed. Edición: 2009 Refractive Index
 Índice de Saponificación: ISO 2487:2013 ANIMAL AND VEGETABLE FATS AND OILS - DETERMINATION OF SAPONIFICATION VALUE
 Índice de Yodo (IYI): ISO 2916:2013 Animal and Vegetable fats and oils - Determination of Iodine value

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad del material de producto o como evidencia del alcance de la calidad de la entidad que lo produce

Calle, 17 de Marzo de 2017
 RT

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.

BLGO. JUAN LÓPEZ HIDALGO
 C.P. N° 18273
 SUPERVISOR LABORATORIO
 FOTOGRAFÍA: M. BARRERA

CALLAO
 Oficina Principal
 Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
 T. (511) 319 9000
 info@cerper.com - www.cerper.com

CHIMBOTE
 Urb. José Carlos Mariátegui s/n
 Centro Cívico, Nuevo Chimbote
 T. (043) 311 048

PIURA
 Urb. Angamos IE Av. Panamericana
 Nro. 0 Mz-A Loto - 02 - Plaza
 T. (073) 322 908 / 9575 63161

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"

INFORME DE ENSAYO N° 1-01974/17

Pág. 1/1

Solicitante : JENNIFER HINGA BLAS.
 Domicilio legal : Av. Los Plátanos Mz. R.L. 19 - Urb. El Rosario del Norte - San Martín de Porres
 Producto declarado : ACEITE DE PALLERIA
 Cantidad de Muestras para el Ensayo : 1 muestra a 500 mL.
 Muestra proporcionada por el solicitante
 Identificación de la muestra : MUESTRA 2 FM C053717
 Forma de Presentación : En frasco de plástico cerrado
 Fecha de recepción : 2017 - 03 - 06
 Fecha de inicio del ensayo : 2017 - 03 - 06
 Fecha de término del ensayo : 2017 - 03 - 13
 Ensayo realizado en : Laboratorio de Física Química
 Identificado con : NIS 17003285 (CXAJ-04748-2017)
 Validez del documento : Este documento es válido solo para la muestras descritas

Ensayo	LC	Unidad	Resultado
			al
Gravedad	-	g de 40ml alcohol/100 g	0.90
Densidad a 20°C	-	g/ml	0.9221
Humedad	0.01	g/100 g	0.01
Índice de Peróxidos	-	mg de iones activo /kg	0.7
Índice de Refracción	-	-	1.4790
Índice de Saponificación	-	mg de KOH/g de grasa	197.26
Índice de Yodo (IYI)	-	g de Iodo absorbido/100 g	122.48

LC: Límite de especificación

MÉTODOS

Gravedad: ISO 369:2009 Animal and vegetable fats and oils - Determination of acid value and acidity
 Densidad a 20°C: AOCS Cc - 12c-43, 9th. EDITION 2009. Specific Gravity Of Oils and Liquid Fats
 Humedad: ISO 662:2016. Animal and Vegetable Fats and Oils - Determination of moisture and volatile matter content
 Índice de Peróxidos: ISO 3962:2007. Animal and vegetable fats and oils. Determination of Peroxide Value
 Índice de Refracción: AOCS - Cc 7-25, 9th. Edition. 2009 Refractive Index
 Índice de Saponificación: ISO 3657:2013. ANIMAL AND VEGETABLE FATS AND OILS - DETERMINATION OF SAPONIFICATION VALUE
 Índice de Yodo (IYI): ISO 3961:2013. Animal and Vegetable fats and oils. Determination of iodine value

OBSERVACIONES

Prohíbe la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
 Las actividades de los ensayos no deben ser utilizadas como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce

Calle, 17 de Marzo de 2017

RT

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.

BLGO. JUAN LÓPEZ HIDALGO
 C.I.P. N° 12279
 SUPERVISOR LABORATORIO
 QUÍMICO E HIDROLOGÍA

CALLAO
 Oficina Principal
 Av. Santa Rosa 601, La Pinta - Callao
 T. (511) 519 9000
 info@cerper.com - www.cerper.com

CHIMBOTE
 Urb. José Carlos Mariátegui s/n
 Centro Cívico, Nuevo Chimbote
 T. (043) 311 048

PIURA
 Urb. Argemone IE Av. Panamericana
 Nro. 0 Mz-A Lote - 02 - Piura
 T. (073) 322 908 / 9575 63161

“EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE”

9.4. Constancia de análisis cromatográfico del biogás



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS

LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE FÍSICOQUÍMICA

INFORME TÉCNICO n°61
OH-A-061/FC/LIQ

SOLICITANTE : Ing. Hernan Villanueva Fernandez
PRODUCTO : 3 muestras de gas
FECHA DE RECEPCION : 23.03.18
ENSAYO : Cromatografía de gases
ANALISTA : Ing. Enrique Neira

Resumen de resultados

Los gases fueron envasados en bolsas de uso clínico

Archivo	Muestra	Aire (% vol)	Metano (% vol)	CO ₂ (% vol)
Gas90-muestra A	A	49,9	49,5	0,42
Gas88-muestraB	B	89,5	9,9	0,09
Gas84-muestraC	C	91,1	18,0	0,23

Atentamente,



Dr. Gino Picasso
Jefe de Laboratorio de Investigación de Físicoquímica

Av. Túpac Amaru Nº 210-Lima 25-Perú Apartado 31-139

Telefax: 3813868; anexo 17 E-mail: gpicasso@uni.edu.pe

NOTA: Esta constancia es del primer análisis de las muestras de biogás.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS

LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE FISCOQUÍMICA

INFORME TÉCNICO n°63
OH-A-063/FC/LIQ

SOLICITANTE : Ing. Hernan Vilanueva Fernandez
PRODUCTO : 3 muestras de gas
FECHA DE RECEPCION : 11.05.18
ENSAYO : Cromatografía de gases
ANALISTA : Ing. Enrique Neira

Resumen de resultados

Los gases fueron envasados en bolsas de uso clínico

Archivo	Muestra	Aire	CH ₄	CO ₂
Gas96-A	A	20,7	50,5	28,6
Gas95-B	B	27,2	44,9	27,7
Gas97-C	C	18,3	52,9	28,6

Atentamente,



Dr. Gino Picasso
Jefe de Laboratorio de investigación de Fiscoquímica

Av. Túpac Amaru N° 210-Lima 25-Perú Apartado 31-139

Telefax: 3813868, anexo 17 E-mail: gpicasso@uni.edu.pe

NOTA: Esta constancia es de segundo análisis de las muestras de biogás.

9.5. Cálculos de la determinación de la carga óptima.

Para la corrida de los datos en Excel se ha tomado los datos de la tabla 14 (pág. 78):

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Relacion 1:1	16	3126.5	195.41	21464.97
Relacion 1:2	16	5215	325.94	30011.53
Relación 1:3	16	3052	190.75	24330.60

ANALISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entregrupos	188457.32	2	94228.66	3.72901711	0.031733012	3.204317292
Dentro de los grupos	1137106.55	45	25269.03			
Total	1325563.87	47				

PRUEBA DE TUKEY:

HSD: Diferencia Honestamente Significativa

HSD	135.12
Multiplicador	3.40
MSE	25269.03
n	16

Comparación de medias para su análisis con la HSD:

	R 1:1	R 1:2	R 1:3
R 1:1		130.53	4.66
R 1:2			135.19
R 1:3			

Nota: el único valor mayor a la HSD es el resultado de la diferencia entre los tratamientos de R 1:2 y R 1:3; por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa.

9.6. Cálculos de la determinación del mejor tratamiento en la producción de biogás

Para la corrida de los datos en Excel se ha tomado los datos de la tabla 23 (pág. 86):

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
B (Control)	16	10283.32	642.71	177539.02
A (Al 2.5%)	16	10654.99	665.94	232972.01
C (Al 5%)	16	16974.59	1060.91	401351.43

ANALISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1767677.69	2	883838.85	3.2659677	0.047376324	3.204317292
Dentro de los grupos	12177936.82	45	270620.82			
Total	13945614.51	47				

PRUEBA DE DUNNETT (comparación con un tratamiento control):

Estadístico de prueba:

$$D_{\alpha} = d_{\alpha}(a-1, f) \sqrt{\frac{2MS_E}{n}}$$

Tamaño de la muestras:

$$n = 16$$

Tratamientos:

$$a = 3$$

$$N = 48$$

Grados de libertad del error:

$$f = N - a = 45$$

Cuadrado Medio de Error:

$$MS_E = 270620.82$$

Constante para la prueba de Dunnett:

(de las tablas de valores críticos para a prueba de Dunnett)

$$d_{\alpha}(\alpha - 1, f) = 2$$

Valor teórico del estadístico de prueba:

$$D_{\alpha} = 260.11$$

Criterio de rechazo:

Estructura de la prueba de hipótesis:

$$|\bar{Y}_{i\cdot} - \bar{Y}_{control(B)}| > D_{\alpha} \qquad \bar{Y}_{control(B)} = 642.71$$

Comparación de los tratamientos contra el control:

Comparación del tratamiento A contra el control:

$$|\bar{Y}_{A\cdot} - \bar{Y}_{control(B)}| > D_{\alpha}$$

$$\bar{Y}_{A\cdot} = 665.94$$

Diferencia:

$$|\bar{Y}_{A\cdot} - \bar{Y}_{control(B)}| = 23.23$$

Conclusión:

No existe diferencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula.

Comparación del tratamiento C contra el control:

$$|\bar{Y}_{C\cdot} - \bar{Y}_{control(B)}| > D_{\alpha}$$

$$\bar{Y}_{C\cdot} = 1060.91$$

Diferencia:

$$|\bar{Y}_{C\cdot} - \bar{Y}_{control(B)}| = 418.20$$

Conclusión:

Se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alterna, con un nivel de confianza del 95%.

Nota: La Prueba de Dunnett indica que el mejor tratamiento es C, seguido de A.