

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**EFFECTO DE LOS EFLUENTES DE EXTRACCIÓN DE ACEITE
CRUDO DE PALMA EN LA ACTIVIDAD METANOGENICA
ESPECÍFICA EN LA EMPRESA SERVICIOS AGRARIOS DE
PUCALLPA SAC. - PERÚ, 2023**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

GIRON VELASQUEZ JOSE

Tingo Maria – Perú.

2023



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N°081-2023-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 07 de setiembre del 2023, a horas 08:00 p.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

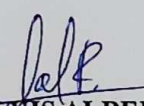
“EFECTO DE LOS EFLUENTES DE EXTRACCIÓN DE ACEITE CRUDO DE PALMA EN LA ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECÍFICA EN LA EMPRESA SERVICIOS AGRARIOS DE PUCALLPA SAC. - PERÚ, 2013”.

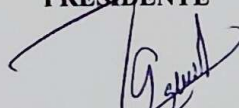
Presentado por el Bachiller: **GIRON VELASQUEZ, Jose**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

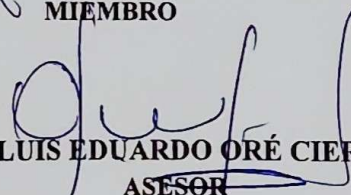
Tingo María, 26 de setiembre de 2023


Dr. CÉSAR SAMUEL LÓPEZ LÓPEZ
PRESIDENTE


Mcbigo. M. Sc. LUIS ALBERTO SANCHEZ ROMERO
MIEMBRO


Blgo. M. Sc. CESAR AUGUSTO GOZME SULCA
MIEMBRO




Dr. LUIS EDUARDO ORÉ CIERTO
ASESOR


Ing. M. Sc. JORGE ALEJANDRO SUÁREZ VÁSQUEZ
ASESOR



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 282 - 2023 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de investigación

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
EFFECTO DE LOS EFLUENTES DE EXTRACCIÓN DE ACEITE CRUDO DE PALMA EN LA ACTIVIDAD METANOGENICA ESPECÍFICA EN LA EMPRESA SERVICIOS AGRARIOS DE PUCALLPA SAC. - PERÚ, 2023	GIRON VELASQUEZ JOSE	18 % Dieciocho

Tingo María, 17 de octubre de 2023


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
Dr. Tomas Menacho Mallqui
DIRECTOR

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



**EFFECTO DE LOS EFLUENTES DE EXTRACCIÓN DE ACEITE CRUDO DE
PALMA EN LA ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECÍFICA EN LA EMPRESA
SERVICIOS AGRARIOS DE PUCALLPA SAC. - PERÚ, 2023**

Autor : Br. Jose Giron Velasquez.

Asesores : Dr. Luis Eduardo Oré Cierito
: Ing. M.Sc. Jorge Suarez Vásquez

Programa de investigación : Bioproducción: aditivos, combustibles, fertilizantes y otros

Línea de investigación : Ciencias y tecnologías ambientales.

Eje de investigación : Desarrollo de tecnologías mixtas.

Lugar de ejecución : Laboratorio de PTARI – SAP SAC. Pucallpa, Ucayali

Duración del trabajo : 6 meses

Financiamiento : S/. 9664.16

Tingo María – Perú. 2023

DEDICATORIA

A Dios, porque siempre me guía y lleva por el buen camino, por darme las fuerzas necesarias para seguir adelante y afrontar los problemas que se presentan día a día, enseñándome a afrontar y a superar las limitaciones sin perder la humildad y los buenos valores inculcados.

A mi padre, que siempre me brinda su apoyo incondicional, a mi madre que me ilumina mi camino desde el cielo, a mis hermanos por su apoyo moral y sus sabios consejos.

El autor

AGRADECIMIENTO

A Dios, por la vida, por gozar de buena salud, por permitirme lograr cada uno de mis metas trazadas, por iluminarme en el camino del saber, por todo lo logrado y por lograr. Gracias a la oportunidad y el consuelo que me brindas para realizar la tesis.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por la formación universitaria de calidad brindada y gracias a los docentes altamente capacitados que participaron en todo este proceso, por sus enseñanzas y aportes en mi formación académica

A la empresa Servicios Agrarios de Pucallpa SAC, al área de investigación y desarrollo por la oportunidad de realizar la investigación en sus instalaciones y por todas las facilidades en el uso de sus equipos y materiales.

Al Dr. Luis Eduardo Oré Cierro y M.Sc. Jorge Suarez Vásquez, por su tiempo, enseñanzas y los consejos brindados y por el asesoramiento brindado en todo momento desde proyecto de tesis, ejecución, redacción y sustentación de la misma.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específico.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Marco teórico	3
2.1.1. Palma aceitera.....	3
2.1.2. Aceite crudo de palma.....	3
2.1.3. POME (Palm Oil Mill Effluent)	4
2.1.4. Digestión anaerobia.....	5
2.1.4.1. Hidrolisis	6
2.1.4.2. Acidogénesis	6
2.1.4.3. Acetogénesis	7
2.1.4.4. Metanogénesis.....	7
2.1.4.5. Sulfurogenesis.....	7
2.1.5. Factores condicionantes en la digestión anaerobia	8
2.1.5.1. pH.....	8
2.1.5.2. Temperatura	8
2.1.5.3. Carga orgánica	9
2.1.5.4. Conductividad eléctrica	9
2.1.5.5. Nutrientes.....	10
2.1.5.6. Sulfatos y sulfuros.....	10
2.1.6. Actividad metanogénica específica (AME).....	11
2.1.7. Ensayo AME por método Volumétrico.....	12
2.2. Estado del arte	12
2.2.1. Digestión anaerobia en lechos bacterianos para remoción de	

	nutrientes y generación gas metano a partir de agua residual de una extractora de aceite crudo de palma.....	12
2.2.2.	Estudio de la generación de gas metano (CH ₄) y remoción de carga orgánica en las lagunas anaerobias de la planta de tratamiento de CC CV aguas residuales de una extractora de aceite crudo de palma	13
2.2.3.	Estudio de la generación de gas metano a partir del agua residual del proceso de extracción de aceite crudo de palma en biodigestores experimentales.	13
2.2.4.	“Efecto de la concentración del biocida Stabrex ST70 en la actividad metanogénica de lodos anaeróbicos de reactor UASB de Cervecería Motupe”.....	13
2.2.5.	Potencial de la pulpa de Coffea arabica L. para la producción de metano, biol y biosol a nivel de laboratorio – UNAS	14
2.2.6.	Actividad metanogénica específica de una solución acuosa de amoxicilina	14
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
3.1.	Lugar de ejecución.....	16
3.1.1.	Ubicación geográfica	16
3.1.2.	Ubicación política	16
3.1.3.	Descripción del lugar	17
	3.1.3.1. Clima	17
	3.1.3.2. Geomorfología.....	17
3.2.	Material y métodos	17
3.2.1.	Materiales y equipos	17
3.2.2.	Metodología.....	17
	3.2.2.1. Evaluación del efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en el pH de la actividad metanogénica especifica	17

3.2.2.2.	Evaluación del efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la temperatura y conductividad eléctrica de la actividad metanogénica específica.....	19
3.2.2.3.	Evaluación del efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la demanda química de oxígeno (DQO) de la actividad metanogénica específica.....	19
3.2.2.4.	Evaluación del efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la composición de biogás de la actividad metanogénica específica.	20
3.2.2.5.	Evaluación del efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la producción de metano (CH ₄) mediante el test de la actividad metanogénica específica (AME).	21
3.2.2.6.	Análisis de estudio	22
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
4.1.	Efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en el pH de la actividad metanogénica específica.	24
4.2.	Efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la temperatura y conductividad eléctrica de la actividad metanogénica específica ..	25
4.3.	Efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la carga contaminante (DQO) de la actividad metanogénica específica.....	28
4.4.	Efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la composición de biogás (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ S) de la actividad metanogénica específica	29
4.5.	Efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la producción de metano (CH ₄) mediante el test de la actividad metanogénica específica.....	32
V.	CONCLUSIÓN	36
VI.	PROPUESTAS A FUTURO	37
VII.	REFERENCIAS	38

ÍNDICE DE TABLA

Tabla	Página
1. Microorganismos intervinientes en las fases de la digestión anaerobia	6
2. Ubicación geográfica del lugar de ejecución de la investigación.....	16
3. Distribución de toma de muestras en las repeticiones de las diluciones.	19
4. Operacionalización de variables.....	23
5. Valores del pH antes y después del test de la AME	24
6. Prueba de t relacionada para el pH	24
7. Prueba t relacionada para la conductividad eléctrica.....	27
8. Valores de conductividad eléctrica inicial y final	28
9. Valores de DQO inicial y final.....	28
10. Prueba t relacionada para la DQO	28
11. Prueba de normalidad	32
12. Análisis estadístico	32
13. Comparaciones de medias.....	33
14. Parámetros del modelo modificado de Gompertz	34
15. Producción de biogás por repetición de cada tratamiento cada 8 horas	41

ÍNDICE DE FIGURA

Figura	Página
1. Esquema del proceso industrial de extracción de aceite crudo de palma	4
2: Esquema representativo de las reacciones llevadas a cabo durante la digestión anaerobia de materiales poliméricos.....	5
3. Balance anaerobio de la DQO.....	9
4. Esquema del test de la actividad metanogénica específica.....	12
5. Ubicación política del lugar de ejecución de la investigación.....	16
6. Esquema de distribución de las repeticiones de las diluciones y testigo para el test de AME	18
7. Esquema de dilución 1 en 5 para determinar la DQO	20
8. Esquema de la prueba de la actividad metanogénica específica	21
9. Porcentaje de mejoras de los valores de pH durante el test de AME	25
10. Volumen de biogás con respecto a la temperatura inicial.....	26
11. Conductividad eléctrica en la actividad metanogénica.....	27
12. Volumen de biogás y Demanda Química de Oxígeno en los tratamientos.....	29
13. Comportamiento del CH ₄ y H ₂ S en el tiempo en cada tratamiento.....	30
14. Variación de composición de biogás en el tiempo	31
15. Producción acumulada de biogás.	33
16. Curvas S del modelo Gompertz modificado aplicado a la AME.	35
17. Producción de biogás por cada 8 horas.....	48
18. Preparación y medición de parámetros físicos químicos de las muestras	51
19. Medición del volumen desplazo en las repeticiones de los tratamientos	51
20. Determinación de la DQO.....	52
21. Medición de composición de biogás en las repeticiones de los tratamientos	52
22. Certificado de calibración para pH y conductividad eléctrica.	53
23. Certificado de calibración de fotómetro y reactivo DQO alto rango.	55

RESUMEN

Para determinar la actividad metanogénica específica de los efluentes producto de la extracción de aceite de palma, se realizó diluciones (“A” 50% V/V, “B” 60% V/V, “C” 70% V/V, “D” 80% V/V y “E” 100% V/V control) con tres repeticiones, entre efluente crudo y tratado de la planta de tratamiento de agua residual industrial. Al inicio y fin del test de la actividad metanogénica se evaluó pH, temperatura, conductividad eléctrica, demanda química de oxígeno. Durante el proceso se cuantificó volumen del líquido desplazado por periodos de 8 horas, también se midió los componentes del biogás (CH_4 , CO_2 y H_2S). Para el mejor análisis del comportamiento de las colonias de bacterias anaerobias, se empleó el modelo Gompertz modificado.

Se logró determinar que a mayor temperatura se produce mayor cantidad de biogás, a menor valor de pH mayor tiempo de degradación y adaptación de los microorganismos, la conductividad eléctrica es inversamente proporcional a la producción de biogás y transcurrido la digestión anaerobia se incrementa significativamente; a mayor DQO, mayor tiempo y cantidad de producción de biogás. Existe competencia por sustrato entre las bacterias metanogénicas y las sulfo-reductoras, lo cual es reflejado en la composición de biogás, cuando hay incremento de H_2S el CH_4 disminuye, este fenómeno ocurre hasta las 150 horas, posterior a ello las sulfo-reductoras se inhiben. Con la ecuación de Gompertz modificado se logró determinar que el tratamiento “D” 70% V/V, presento un menor tiempo de adaptación de microorganismos al medio y una alta actividad microbiana

Palabra clave: Actividad metanogénica específica, biogás, pH, temperatura, DQO, conductividad eléctrica, metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, dilución, cantidad, calidad, Gompertz

ABSTRAC

In order to determine the specific methanogenic activity of the effluents [that were] a product of palm oil extraction, dilutions were made (“A” 50% V/V, “B” 60% V/V, “C” 70% V/V, “D” 80% V/V y “E” 100% V/V control), with three repetitions, between the raw and treated effluents from the industrial waste water treatment plant. At the beginning and end of the methanogenic activity testing, the pH, temperature, electrical conductivity, and chemical oxygen demand were evaluated. During the process the volume of displaced liquid was quantified for eight hour periods; the components of the biogas were also measured (CH_4 , CO_2 , and H_2S). For the best analysis of the behavior of the anaerobic bacterial colonies, the modified Gompertz model was used.

It was determined that the greater the temperature, the greater the quantity of biogas produced; as the pH value was lower, the greater the time of degradation and adaptation of the microorganisms. The electrical conductivity was inversely proportional to the biogas production, and lapse for the anaerobic digestion increased significantly. The greater the COD (DQO in Spanish), the greater the time and quantity of biogas production. There was a competition by substrata between the methanogenic and the sulfur-reducing bacteria, which was reflected in the composition of the biogas: when there was an increase in H_2S , the CH_4 decreased. This phenomenon occurred up to 150 hours, after this, the sulfur-reducing bacteria were inhibited. With the modified Gompertz equation, it was determined that treatment “D” 70% V/V, presented the least time of adaptation to the medium for the microorganisms, and a high microbial activity.

Key words: specific methanogenic activity, biogas, pH, temperature, COD, electrical conductivity, methane, carbon dioxide, sulfuric acid, dilution, quantity, quality, Gompertz

I. INTRODUCCIÓN

Los residuos agroindustriales generados en el proceso de extracción de aceite crudo de palma son inevitables, por cada tonelada de racimo de fruto fresco (RFF) se genera 0.8 a 1.2 toneladas de efluentes industriales, de los cuales, muchas plantas extractoras del mundo vierten en los cuerpos de agua y suelo, no realizan un tratamiento adecuado a sus efluentes, alterando los medios fisicoquímicos y biológicos de los ecosistemas que tienen contacto directo con el efluente crudo; además de eso genera gases contaminantes de invernadero que alteran la calidad del aire y aportan al calentamiento global.

Según Althausen (2016), los efluentes de fabricación de aceite crudo de palma aprovechado correctamente con un tratamiento moderno pueden transformar la elevada carga orgánica (DQO) en biogás, diferentes gases que poseen un alto valor energético de 6 kWh/m^3 lo cual puede ser usado como combustible para generar energía eléctrica, adicionalmente, este tratamiento como subproducto genera lodo estabilizado que se puede usar como abono orgánico y agua con mejor calidad, lo cual puede ser reusada en riego de plantaciones.

El sistema anaeróbico de la planta de tratamiento de agua residual industrial (PTARI) de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma, no cuenta con un sistema de recirculación de lodos, las características del efluente industrial que se alimenta al biodigestor es ácido con un potencial de Hidrogeno de 3.8 a 4.5 y Temperatura superior a los $41 \text{ }^\circ\text{C}$. Mediante el test de la actividad metanogénica específica se busca evaluar los efluentes de la extracción de aceite crudo de palma en diferentes diluciones que van a simular las condiciones de recirculación que van mejorar las condiciones físico químicas del efluente, para obtener un buena calidad y cantidad de biogás, para así proponer mejoras en el sistema de tratamiento actual.

Por ello se plantea la siguiente interrogante ¿Qué efectos produce los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la actividad metanogénica específica en la empresa Servicios Agrarios de Pucallpa SAC- Perú 2023?

Teniendo como hipótesis “los efluentes de extracción de aceite crudo de palma produce efectos significativos en la actividad metanogénica específica en la empresa Servicios Agrarios de Pucallpa SAC- Perú 2023”

Como hipótesis nula alternativa “los efluentes de extracción de aceite crudo de palma no produce ningún efecto en la actividad metanogénica específica en la empresa Servicios Agrarios de Pucallpa SAC- Perú 2023”

1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la actividad metanogénica específica en la empresa Servicios Agrarios de Pucallpa SAC. - Perú, 2023

1.2. Objetivos específico

Evaluar el efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en el pH de la actividad metanogénica específica.

Evaluar el efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la temperatura y conductividad eléctrica de la actividad metanogénica específica.

Evaluar el efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la DQO de la actividad metanogénica específica.

Evaluar el efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la composición de biogás: CH₄, CO₂, y H₂S de la actividad metanogénica específica.

Evaluar el efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la producción de metano (CH₄) mediante el test de la actividad metanogénica específica

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Palma aceitera

El Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú (MINAGRI, 2016); menciona que la palma aceitera es nativa de África occidental para ser más exacto del Golfo de Guinea. Además, es un cultivo que demora entre 2 y 3 años en iniciar a producir sus primeras frutas, entre los cultivos productores de aceite, es el que tiene un alto rendimiento de producción de aceite por unidad de área. Presenta una cantidad aproximadamente del 50% en el fruto, alcanza producir de 3 a 5 ton de aceite oleaginoso por hectárea, además de 0.6 a 1 tonelada de aceite de palmiste (nuez de la fruta). Su ciclo de vida productiva puede prolongarse más de 50 años.

2.1.2. Aceite crudo de palma

Es un producto final de las plantas básicas o primarias que se da mediante el proceso de extracción de aceite crudo, estas plantas de beneficio de aceite generan altos volúmenes (M_3) de aguas residuales, principalmente en el proceso de esterilización de la fruta y en la fase de clarificación del aceite. La ratio de generación de efluentes en una planta extractora común es aproximadamente de 0.8 a 1.2; es decir por extraer aceite de una tonelada de fruta fresca se generan de 0.8 a 1.2 m^3 de efluentes industriales. (Althausen, 2016).

Según el estudio ambiental semi detallado (EIA-Sd, 2022) de la empresa Servicios Agrarios de Pucallpa SAC (SAP SAC), el proceso de separación de aceite crudo de palma empieza por el pesado de vehículos de carga cargados de fruta, posteriormente se liberan los frutos de los vehículos para volverlos pesar y así tener el valor del peso neto de los racimos de palama, se inspecciona la calidad de la materia antes de pasar al siguiente proceso el llenado de tolva; por acción de una de una cadena transportadora se traslada hacia los esterilizadores verticales. La cocción se lleva a cabo doblegando a los racimos de fruta fresca a la acción de vapor de agua en autoclaves cilíndricas. Posteriormente los frutos cocidos son llevados al disfrutador, donde se desintegran los frutos del escobajo, dando por resultado un raquis vacío el cual es un residuo que representa un 23% aproximadamente del racimo fresco. Posteriormente es enviado a los digestores en donde se mezcla y se lleva a altas temperaturas a la fruta dejándolo en condiciones óptimas para procesar a través de la prensa de tipo tornillo. En el prensado a través de los orificios de la canasta emerge un licor de prensa con alta concentración de aceite y por la parte alta de los tornillos emerge una mezcla solida generalmente se conoce como torta producto del prensado; su composición es de fibra, nueces

y efluente líquido; en la clarificación del aceite, se tiene como subproductos al aceite, lodo y efluente. Las aguas lodosas son depositadas en a los tanques florentinos el cual es casi el último proceso donde se separa aceite y efluente, el aceite se regresa a proceso y el efluente al tanque de efluentes el cual se bombea hacia el sistema de tratamiento de agua residual

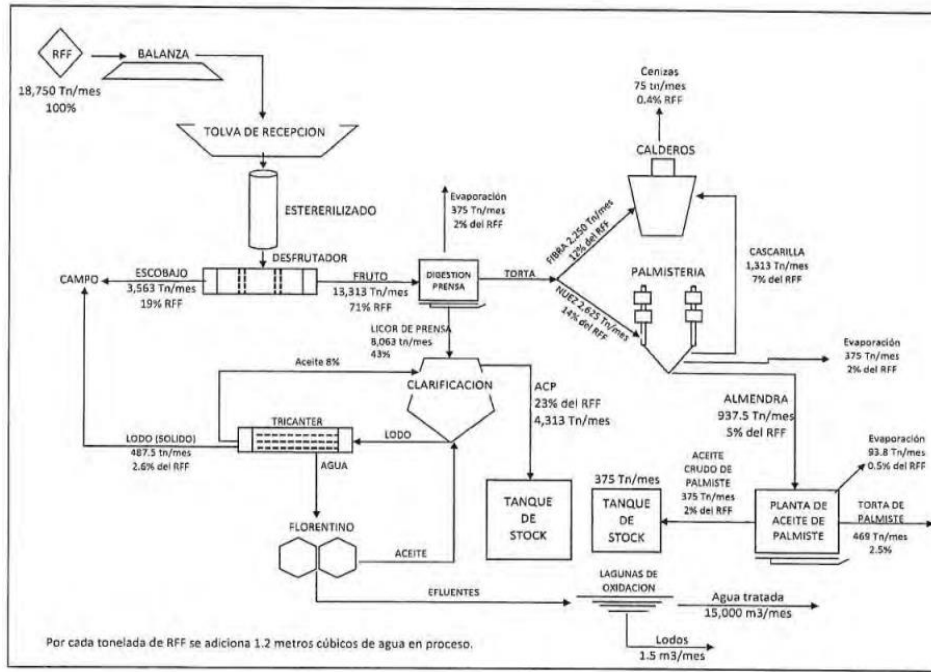


Figura 1. Esquema del proceso industrial de extracción de aceite crudo de palma
Fuente: folio 1323 del registro N00069770, EIA-sd Servicios Agrarios de Pucallpa SAC.

2.1.3. POME (Palm Oil Mill Effluent)

Las plantas de veneficio o extracción de aceite crudo de palma aceitera generan inmensos volúmenes de efluentes con una alta carga contaminante (DQO); tales efluentes por sus siglas en inglés son conocidos como POME (palm oil mill effluents), refiriéndose exactamente a los efluentes de las últimas etapas del proceso de beneficio de aceite de palma en las plantas industriales. Compuesta por líquidos elevados en carga contaminante, aceite residual y sólidos suspendidos por lo que el POME crudo sin tratamiento tiene una capacidad alta de poder alterar los medios acuáticos y terrestres. (Programa 4E de la GIZ, 2013).

Los sistemas de tratamientos modernos de POME puede transformar la elevada carga contaminante en biogás, una mezcla gaseosa con un gran valor energético de 6 kWh/m³. De igual manera, los lodos generados en este tratamiento producen altas cantidades de abono orgánico bien estable mineralizado y agua de mejor calidad, que se puede nuevamente en el proceso industrial, riego de plantaciones de palma (Althausen, 2016)

2.1.4. Digestión anaeróbica

Es un fenómeno que comúnmente se da de manera natural en el ambiente natural, se produce en los pantanos, en zonas anegadas para los cultivos de arroz, en los lodos precipitados de humedales, lagunas y océanos, en las zonas anoxias de los suelos donde se acumula materia orgánica, en vertientes de aguas termales con contenido de azufre y en el tracto digestivo de los animales vacunos, bovinos y otros. (Díaz-Báez, 2002). También es un proceso fermentativo que se da en los biodigestores anaerobios de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Generalmente este proceso se caracteriza por la transformación de la carga contaminante a metano y dióxido de carbono, en condiciones totalmente anóxicas y con la intervención de diversas colonias de microorganismos bacterianos. (Rodríguez, 2004). Así mismo, la deficiencia de la descomposición anaerobia es que muy seguido se percibe fluctuaciones durante los procesos de inicios de arranque del sistema sobre todo por la adaptación microbiana. (López et al., 2017).

Según López et al. (2017), el hábitat anaerobio es el producto de múltiples relaciones entre consorcios de colonias de microorganismos de varias especies. Las principales reacciones llevadas a cabo por las colonias de bacterias más representativas son conforme se muestra en la figura 2: (1) bacterias fermentativas, (2) bacterias acetogénicas generadoras de hidrógeno, (3) bacterias acetogénicas degradadoras de hidrógeno, (4) reductores de dióxido de carbono, y (5) metanógenos acetoclásticos. (Gujer & Zehnder, 1983)

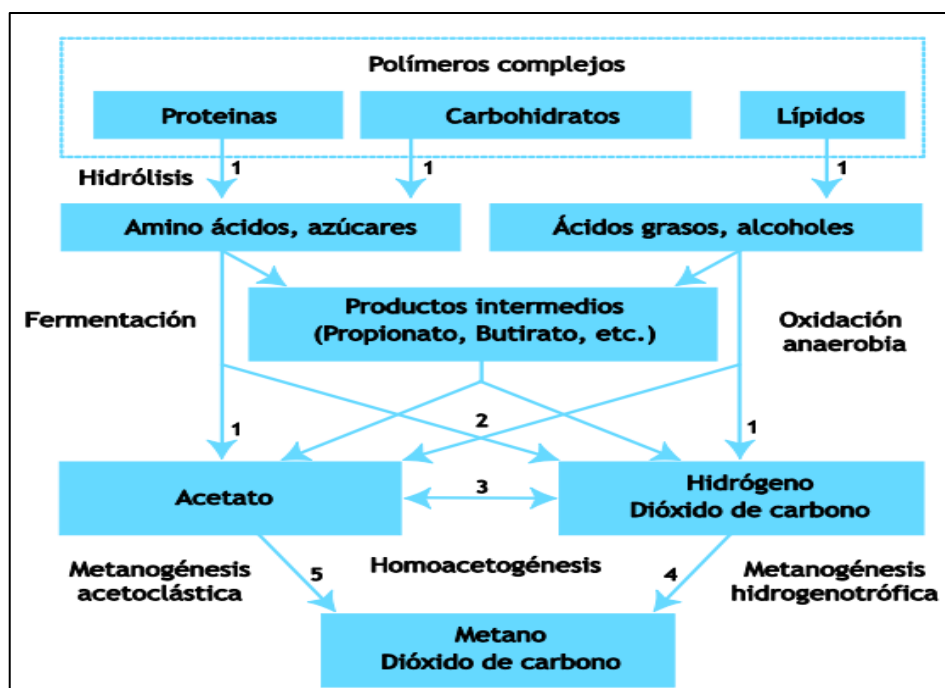


Figura 2: Esquema de las reacciones durante la digestión anaerobia de materiales poliméricos

Según la FAO, (2011). La digestión anaeróbica es un proceso muy complicado, en ella se dan muchas reacciones bioquímicas, los cuales están influenciadas por la cantidad de colonias de microorganismos, muchas de estas reacciones se dan de forma paralela y en secuencia. Los consorcios bacterianos que intervienen en la digestión anaerobia son diversos, cada colonia interviene de acuerdo a las condiciones del medio (Tabla 1).

Tabla 1. Microorganismos intervinientes en las fases de la digestión anaerobia

Hidrolisis	Acidogénesis	Acetogénesis	Metanogénesis	Sulfurogenesis
<i>Bacteroides</i>	<i>Clostridium</i>	<i>Clostridium aceticum</i>	<i>Methanobacterium</i>	<i>Desulfomicrobium</i>
<i>Lactobacillus</i>	<i>Paenibacillus</i>	<i>clostridium formicoaceticum</i>	<i>Methanospirillum hungatii</i>	<i>Thermodesulfobacterium</i>
<i>Propionibacterium</i>	<i>Ruminococcus</i>	<i>Acetobacterium woodii</i>	<i>Methanosarcina</i>	<i>Desulfotomaculum</i>
<i>Sphingomonas</i>		<i>Synglyphobacter woodii</i>	<i>Methanococci</i>	<i>Desulfosporomusa</i>
<i>Sporobacterium</i>		<i>Syntrophomonas wolfei</i>	<i>Methanopyri</i>	<i>Desulfosporosinus</i>
<i>Peptostreptococcus</i>				<i>Desulfovibrio</i>
<i>Micrococcus</i>				<i>Desulfurrella</i> <i>Desulfuromonas</i>

Fuente: FAO (2011) Manual de biogás

2.1.4.1. Hidrolisis

Esta fase es un fenómeno únicamente superficial, a través de la intervención de las exoenzimas se degrada las partículas poliméricas, para generar moléculas y compuestos más pequeños, las cuales pueden traspasar con facilidad la membrana celular. Las proteínas son transformadas a través del proceso de hidrolisis hacia a aminoácidos, los polisacáridos son transformados a azúcares simples y los compuestos grasos a ácidos grasos de cadena larga. En las aguas residuales presentan una relación elevada de sólidos suspendidos (SS)/DQO, en la cual es una etapa condicionante para la rapidez de descomposición total o universal. Es una fase donde los compuestos poliméricos de elementos diversos, disueltos o suspendidos, son convertidos en componentes monoméricos o diméricos que son muy fáciles de ser asimilados rápidamente por los microorganismos acidogénicos. (López et al., 2017).

2.1.4.2. Acidogénesis

También conocida como fermentación, como resultado de esta reacción nos da al ácido acético, también en su fallo nos puede dar otros ácidos grasos volátiles (AGV) como el propiónico, el butírico y el valérico. La concentración de hidrogeno es un factor condicionante; si la cantidad parcial de hidrógeno es menor que 10^{-4} el resultado obtenido será

ácido acético, de otra manera opuesta, se obtienen los otros ácidos grasos. Además de los ácidos, como subproducto de la acidogénesis nos da hidrógeno y su contenido se transforma en un elemento controlador del metabolismo del proceso, debido a que el ácido acético y el hidrógeno establecen las rutas de generación de metano. (Caicedo, 2006)

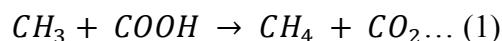
Los resultados finales de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos de cadenas carbonadas cortas, compuestos de mínimo peso molecular como hidrógeno y dióxido de carbono. Estos microorganismos son altamente persistentes a cambios y fluctuaciones a las condiciones del entorno. Por ejemplo, para el pH, mayormente el adecuado para la proliferación de su actividad metabólica esta entre 5 y 6, muchas veces los procesos anaerobios comúnmente son acondicionados a pH 7, y aún en estas nuevas condiciones del medio su actividad metabólica se mantiene. (López et al., 2017).

2.1.4.3. Acetogénesis

Esta fase se da gracias a una colonia de bacterias denominadas como “bacterias acetogénicas generadoras de hidrógeno” (OHPA), las cuales transforman los productos de la fermentación en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. La fuente principal de energía de estas bacterias son los ácidos grasos o alcoholes. (Caicedo, 2006)

2.1.4.4. Metanogénesis.

Esta fase es el último proceso en la digestión anaerobia, el cual se da a través de dos largas trayectos: La primera ruta, es la generación de metano y dióxido de carbono a través del principal proceso de la fermentación del ácido acético. Los microorganismos que degradan el ácido acético se llaman bacterias acetoclastas; según (Fernández, et al 2006), la reacción, planteada de forma general en la Ecuación (1), es la siguiente:



Algunos microorganismos metanogénicos tienen la capacidad de usar las moléculas de hidrógeno para transformar el dióxido de carbono a metano (metanogénicas hidrogenoclastas) según la reacción de la Ecuación (2):



En esta fase, una gran colonia de bacterias anaerobias estrictas, intervienen sobre los productos finales de los procesos anteriores y los convierte en metano CH_4 . aproximadamente del 70% de la cantidad total del metano generado, se origina de la descarboxilación del ácido acético. (Rodríguez et al., 2017).

2.1.4.5. Sulfurogenesis

Los sulfatos presentes en los efluentes son las precursoras para la formación y crecimiento de las bacterias sulfo reductoras, las cuales compiten por el sustrato

con las demás colonias de bacterias. Estas bacterias sulfo reductoras generan sulfuro de hidrogeno y baja producción de metano, causan malos olores en el proceso e inhibición (Betance, 2010).

2.1.5. Factores condicionantes en la digestión anaerobia

2.1.5.1. pH

Los valores bajos de pH disminuyen la actividad de las bacterias metanogénicas, ocasionando el almacenamiento de ácido acético e Hidrógeno. Cuando se da un incremento de la presión parcial de Hidrogeno, habrá inhibición de los microorganismos que degradan el ácido propiónico, ocasionando una elevada aglomeración de ácidos grasos volátiles de elevado peso molecular, exclusivamente ácidos propiónico y butírico, los cuales conllevará a disminuir la generación de ácido acético, ocasionando una disminución del pH. Para que la digestión anaerobia se desarrolle satisfactoriamente, el rango de los valores de pH debe estar entre 6 y 8. Además, el pH de la sustancia va cumplir un factor determinante para la producción de biogás tales como cantidad y calidad en la composición. (FAO, 2011).

Aguinaga y Pérez (2020) el rango de pH óptimo para el buen desarrollo y proliferación de las bacterias metanogénicas debe estar entre 6.5 y 7.5; cuando el potencial de hidrógenos es ácido da condiciones al crecimiento de las bacterias acidificantes los cuales se desarrollan a un pH de 4 y 5. Es de suma importancia que ambas reacciones (acidificación/metanización) sean homogenizadas porque al no efectuarse de esta manera el biodigestor anaerobio se acidificará y la digestión anaerobia será inhibida; puesto que las microorganismos metanogénicas son altamente predecibles a las fluctuaciones de pH.

El pH del medio de la digestión anaerobia determina la cantidad y porcentaje de metano en la composición de biogás, cuando el pH del medio disminuye, las bacterias metanogénicas son destruidas, mientras que a un pH elevado la producción de metano es lenta. Según Duarte (2009), estima que los valores óptimos para una buena calidad y cantidad de metano debe ser entre 6.6 y 7.8.

2.1.5.2. Temperatura

La temperatura va influenciar en el contenido de metano en la composición del biogás, lo óptimo es entre 20 y 45 °C, a bajas temperaturas la concentración de metano se eleva y se reduce la cantidad de biogás (Duarte, 2009).

La metanogénesis es muy indispensable de la temperatura, el punto óptimo es aproximadamente de 37°C; cuando hay un incremento de temperatura y esta sobrepasa los 10 ° C, se duplica la rapidez de reacción, es decir a una temperatura de 25 °C, la

rapidez de reacción es solo la mitad de una a 35°C. Una vez que la temperatura sobrepasa los 40 °C, la actividad metanogénica del medio colapsa inmediatamente. (Aguinaga y Pérez, 2020). Según Daza, et al (2019), una disminución o incremento brusco de la temperatura causa daños severos en las bacterias tales como desnaturalización e inactivación de enzimas esenciales, destrucción de la membrana citoplásmica y en ocasiones lisis térmica de la bacteria. Romero (2002) explica que a mayor temperatura la velocidad de obtención de biogás también aumenta en temperaturas que oscilan entre 25°C a 80°C se necesitan de 10 a 15 días para empezar una fermentación anaeróbica.

2.1.5.3. Carga orgánica

Rodríguez (2004), en el rubro de la depuración de aguas residuales, la carga contaminante es determinada a través de la demanda química de oxígeno (DQO), la cual cuantifica fundamentalmente la cantidad de materia orgánica concentrada; en la figura 3 se muestra que la DQO especulativa del metano equivale a la mayor parte de la DQO de la materia orgánica digerida (90 a 97%), una proporción pequeña de la DQO es transformada en lodo entre 3 y 10%

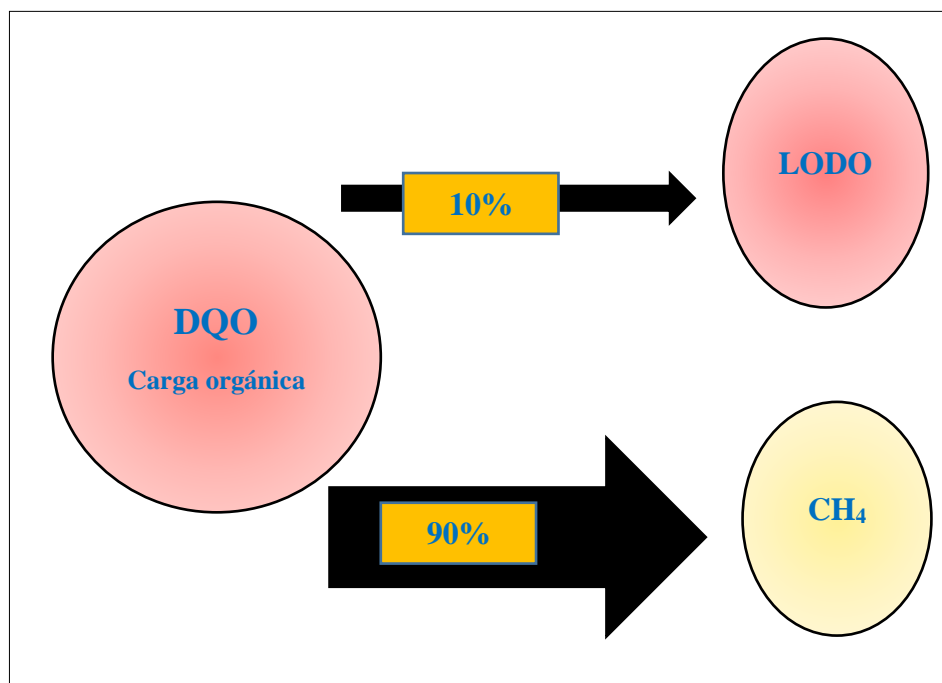


Figura 3. Balance anaerobio de la DQO

2.1.5.4. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica en una solución líquida es la capacidad del fluido para dirigir la corriente eléctrica, indirectamente mide la cantidad de iones

en solución (cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio). Según Ortiz (2011) las concentraciones de salinidad va influir en la conductividad eléctrica debido a que son directamente proporcionales. Así mismo, el incremento de iones K^+ y Na^+ del sustrato hacen que incremente la salinidad en la solución y decaiga la actividad metanogénica de los microorganismos ya que la elevada conductividad eléctrica causa inhibición.

La conductividad eléctrica está relacionada directamente por la temperatura, según Ramon (2015), cuando hay incremento de la temperatura hay baja viscosidad y a elevada viscosidad mayor libertad de movimiento, si bien el alza de la conductividad eléctrica con la temperatura puede variar los iones, por lo general, se acepta que es proporcional al incremento de temperatura en una relación de 3% por cada grado centígrado

2.1.5.5. Nutrientes

Según la FAO (2011), toda sustancia con contenidos de materia orgánica puede producir biogás al ser llevado a condiciones de fermentación anaeróbica, la cantidad y composición del biogás producido dependerán de los componentes y la naturaleza del medio. La cantidad de nutrientes debe ser mayor que a la concentración óptima para las bacterias metanogénicas, porque por falta de sustrato o nutrientes dejan rompen su ciclo de desarrollo.

Durante el test de la actividad metanogénica específica (AME) de los efluentes de extracción de palma se presume que la proporción de sustrato y nutrientes van estar sumamente en exceso, dado que la cantidad inicial de lodo con inóculos, determinará la prolongación del experimento (Chernicharo, 2007).

Para una buena adaptación y crecimiento de los microorganismos productores de biogás, es indispensable la presencia de ciertas cantidades de elementos traza y la existencia de nutrientes como carbono, nitrógeno y azufre. La proporción carbono-nitrógeno deben guardar una relación entre 20 y 30 partes con respecto al primer elemento. Si el nitrógeno aumenta proporcionalmente, va ocurrir la formación de amonio el cual va reducir la producción de biogás significativamente, tal fenómeno ocurre muy seguido durante la descomposición anaeróbica de la urea a nitrógeno y proteínas (Rivas, 2009)

2.1.5.6. Sulfatos y sulfuros

Las elevadas concentraciones de sulfatos en el medio pueden generar problemas en el ciclo de la degradación anaeróbica, específicamente de las bacterias metanogénesis. Cuando los efluentes tienen contenidos de sulfatos, va haber una disputa entre las bacterias metanogénicas y sulfo-reductoras, sobre todo por la disposición de nutrientes

comúnmente por el acetato y el Hidrógeno, tendiendo a ganar las bacterias sulfato reductoras por sus condiciones de termodinámicas y cinéticas sobre las metanogénicas. Como resultado de esta disputa se obtiene la determinación de la concentración de gases del biogás sobre todo la concentración de ácido sulfhídrico y porcentaje de metano. (Betance, 2010).

Según Caicedo (2006) en los reactores anaerobios, específicamente cuando hay existencia de sulfatos, se pueden generar colonias de bacterias con habilidades de transformar los sulfatos a sulfuros. Estos microorganismos son identificadas como “sulfato – reductoras” (BSR), las cuales emplean el sulfato como receptor final de electrones.

Los sulfuros al igual que los sulfatos también son un factor que pueden ser un impedimento para muchos consorcios bacterianos, pueden generarse mediante la descomposición de la carga contaminante con contenidos de azufre (proteínas), comúnmente, las bacterias generadoras de metano son más sensibles que las bacterias acidogénicas y acetogénicas sobre todo si las bacterias metanogénicas no están adaptados a los sulfuros. Lo que ocasiona daños severos a las bacterias metanogénicas, favorecen en gran medida a las sulfo reductoras formadoras de H_2S no ionizada, un factor para la inhibición son las condiciones de pH y temperaturas bajas; el compuesto ionizado de HS^- genera un mínimo daño a las bacterias metanogénicas. (FAO 2011)

2.1.6. Actividad metanogénica específica (AME)

El test de la actividad metanogénica específica (AME) ayuda evaluar la capacidad máxima de generación de metano por los consorcios bacterianos presente en los lodos anaeróbicos. Por tal motivo es comúnmente usada para la evaluación de lodos de biodigestores anaerobios, es una técnica de estudio que ayuda estimar el origen de la biomasa contaminada y establece la cantidad máxima de carga contaminante que puede adicionarse a un sistema, con la finalidad de estudiar la descomposición de la materia orgánica y la factibilidad de selección de bacterias. (Torres et al., 2010)

El test de la AME se puede definir como la óptima capacidad de producción de metano por colonias de bacterias anaeróbicas, ejecutadas en condiciones controladas, permite conocer y calcular la tasa máxima de la actividad bioquímica de los microorganismos del proceso de transformación de sustratos orgánicos a biogás. (Aquino et al., 2007)

2.1.7. Ensayo AME por método Volumétrico.

Este método nos permite cuantificar la cantidad de gases producidos en los reactores experimentales mediante el volumen del líquido desplazado del segundo reactor. Muchos experimentos en el reactor dos usan soluciones químicas para poder cuantificar solamente el metano, ya que los demás gases como el dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico reaccionarán químicamente como por ejemplo usan hidróxido de sodio o hidróxido de potasio, en un rango de 15 -20 g/L (Field, 1987). Según Chernicharo, (2007) es recomendable realizar mediciones de pH a la solución para corroborar y que no debe ser superior a 12 unidades para cerciorarse que la solución pueda reaccionar con el CO₂ producido (figura 4). (

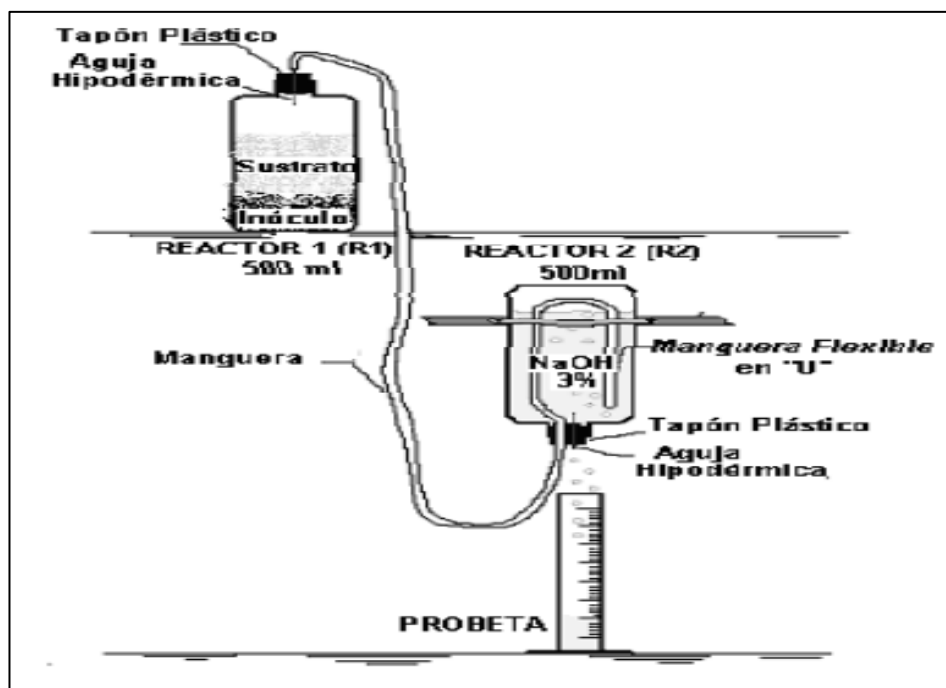


Figura 4. Esquema del test de la actividad metanogénica específica.

2.2. Estado del arte

2.2.1. Digestión anaerobia para remoción de nutrientes y generación gas metano a partir de agua residual de una extractora de aceite crudo de palma

El trabajo de investigación fue realizado en una planta de beneficio de aceite crudo de palma situada en Esmeraldas, Ecuador; donde se estudiaron la operación de sus biodigestores anaeróbicos a escalas controladas de laboratorio, en diversas etapas evaluaron la producción de biogás, la eficiencia de sus procesos y la cantidad removida de carga contaminante y amonio. Como inóculo bacteriano usaron agua del biodigestor anaeróbica de la planta de tratamiento. Llegando a concluir que la actividad metanogénica inicial de los inoculos

son bajos y posteriormente se incrementó muy significativamente. La tasa de remoción de carga contaminante (DQO) fue de un promedio de un 86%. Obteniendo una máxima de producción de metano de 81.85 ml. Para el amonio obtuvieron una tasa remoción de 85% (Dillon, 2016).

2.2.2. Evaluación de la generación de gas metano (CH₄) y remoción de carga orgánica en las lagunas anaerobias de la planta de tratamiento de aguas residuales de una extractora de aceite crudo de palma

La presente investigación fue realizada en Quito, Ecuador, donde el investigador se planteó los siguientes objetivos: determinaron la producción de metano y la remoción de la carga contaminante del agua residual de sus biodigestores anaerobios parte de su sistema de tratamiento de efluentes que se genera de su planta extractora de aceite, el cual se sitúa en Quinindé, Esmeraldas. Al principio realizaron la caracterización del efluente residual industrial del sistema de tratamiento, a través del test de la actividad metanogénica específica determinaron la producción de gas metano a escala laboratorio y cuantificaron in situ la cantidad de CH₄ con el equipo West Systems Portable Flux Manager. Para los test de la actividad metanogénica (AME) usaron microorganismos adaptados de los lodos sólidos y líquidos de las lagunas de tratamiento 3, 4 y 5. Como resultado determinaron que el mayor valor de la AME fue para los lodos líquidos del biodigestor anaerobio 4 con una remoción de 2.23 g DQO-CH₄/g SSV. (Pazmiño, 2015).

2.2.3. Estudio de la generación de gas metano a partir del agua residual del proceso de extracción de aceite crudo de palma en biodigestores experimentales.

Esta investigación logró determinar la tasa de producción de metano en reactores experimentales a escalas controladas dándole condiciones necesarias, como sustrato utilizaron acetato, el efluente recolectaron de la planta de tratamiento de agua residual industrial que conforma el sistema de tratamiento de su planta extractora situada en la provincia de Esmeraldas, Ecuador. Como resultado determinaron que los efluentes industriales de su planta extractora de aceite de palma, presenta concentraciones elevadas de DQO total y soluble, alto contenido de sólidos totales y volátiles; además los valores de pH son ácidos. Así mismo determinaron que la actividad metanogénica específica (AME) del inóculo (agua y lodos) es mínima, transcurrido el proceso de operación se incrementa la cantidad de producción de gases a 83.14 mL. Logrando remover un 89.2% de DQO. (Garzón et al., 2015).

2.2.4. “Efecto de la concentración del biocida Stabrex ST70 en la actividad metanogénica de lodos anaeróbicos de reactor UASB de Cervecería Motupe”

Esta investigación se plasmó en tratar de determinar los efectos de una solución biocida Stabrex ST70 que puede influenciar en el proceso de la actividad microbiana

de lodos anaeróbicos de un reactor UASB sobre los efluentes de una cervecería ubicada Motupe. Para determinar la actividad metanogénica específica de los microorganismos anaerobios usaron lodo proveniente que se genera en los reactores anaeróbicos. La caracterización de sus efluentes fue de 124 000 mg/l de sólidos totales y 104 000 mg/l de sólidos volátiles; como medio de sustrato usaron azúcar, bicarbonato de sodio, fosfato monoácido de potasio, fosfato diácido de potasio y cloruro de amonio sin biocida, como muestra en blanco. Posteriormente realizaron una preparación de solución patrón de 6700 ppm Stabrex ST70; de la cual, tomaron una muestra de 0.27, 2.69, 5.10 ml de solución patrón a la botella que funciona como fermentador para obtener una concentración de 1, 10 y 19 ppm. Realizaron mediciones durante 60 horas manteniendo una agitación en secuencia de 300 rpm llevando a una temperatura de 40°C, evaluando y tomando datos cada hora de volumen desplazado por la acción de los gases. Concluyeron biocida Stabrex ST70 es un inhibidor para la actividad metanogénica, a mayor biocida menor producción de metano. (Aguinaga y Pérez, 2020)

2.2.5. Potencial de la pulpa de *Coffea arabica* L. para la producción de metano, biol y biosol a nivel de laboratorio – UNAS

En esta investigación el investigador construyó un sistema de depuración anaerobia, para calcular la producción de metano a diferentes dosis de pulpa de café. De la misma manera, evaluó el tiempo que necesitan las bacterias para degradar la materia orgánica, la cantidad de biogás y biometano producido, para luego calcular la eficiencia de descomposición de la materia orgánica por acción de los microorganismos anaerobios en función al peso en fresco y seco, llegando obtener de esta manera biol y biosol, producto de la digestión, posteriormente realizaron un test toxicológico para la germinación de semillas en placas para poder determinar si se puede reutilizar como enmienda agrícola. Donde llegó a concluir que los desechos de extracción de café (pulpa) en una concentración inferior al 30% puede descomponer el 63% de la torta seca de la pulpa de café y de esta llegar a generar metano de buena calidad con un 90%. (Cáceres, 2019)

2.2.6. Actividad metanogénica específica de una solución líquida de amoxicilina

En este trabajo de investigación determinaron la actividad metanogénica específica (AME) de los inóculos procedentes de la planta de tratamiento de agua residual industrial situada en el Salitre – Colombia, como sustrato usaron amoxicilina en 3 diferentes concentraciones de 5 mg/l, 60 mg/l y 120 mg/l. la evaluación duró un tiempo de 480 horas, las cuales estaban bajo agitación discontinuo. En sus resultados lograron determinar que los valores de la AME para 5 mg/l, 60 mg/l y 120 mg/L de amoxicilina fueron de 0.163 gDQO/gSTV.d, 0.218 gDQO/gSTV.d y 0.485 gDQO/gSTV.d correspondientemente. Para analizar e interpretar

de la mejor manera los resultados experimentales utilizaron el modelo matemático de Gompertz modificado en las condiciones estudiadas, las cuales presenta un buen ajuste de las curvas “S”. (Torres et al., 2015)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación geográfica

Esta investigación se realizó en la empresa Servicios Agrarios de Pucallpa S.A.C, en el laboratorio de investigación y desarrollo de la planta de tratamiento de agua residual industrial, geográficamente se encuentra ubicada en las coordenadas UTM 507 816 E, 9 095 977 N.

Tabla 2. Ubicación geográfica del lugar de ejecución de la investigación

Coordenada	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)
UTM	507 816	9 095 977	181

3.1.2. Ubicación política

Políticamente la investigación realizada se encuentra ubicada en el distrito Nueva Requena, provincia Coronel Portillo, región Ucayali (Figura 5)

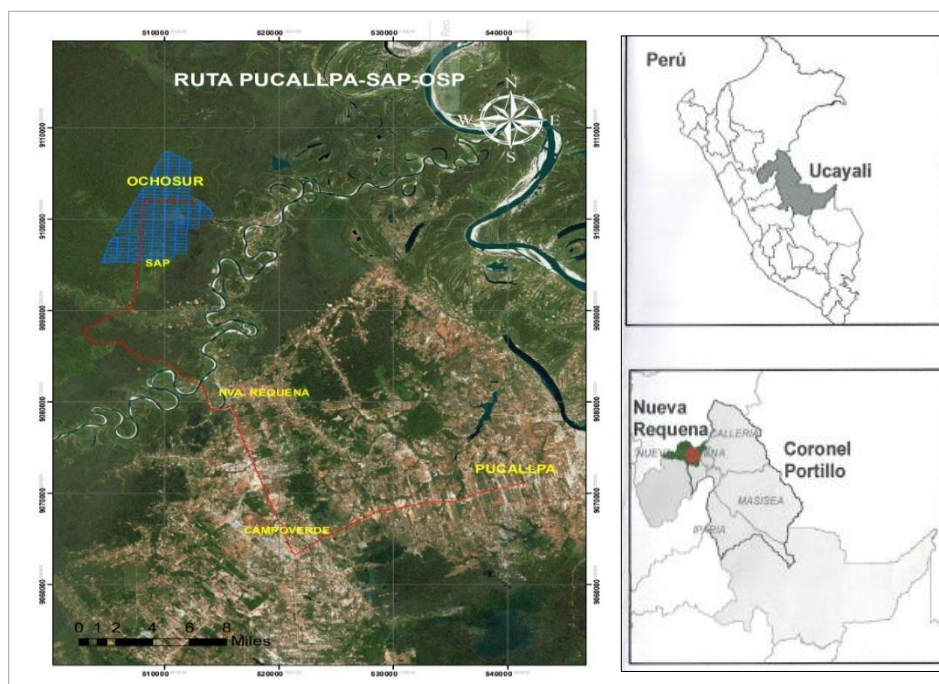


Figura 5. Ubicación política del lugar de ejecución de la investigación.

3.1.3. Descripción del lugar

3.1.3.1. Clima

El lugar de ejecución presenta un clima tropical de selva baja, que se muestra casi estable a largo de todo el año, con pequeñas variaciones entre el día el día y la noche, la temperatura media anual es superior a los 26°C y la precipitación anual supera siempre los 1000 mm, sin sobrepasar los 5000mm

3.1.3.2. Geomorfología

El lugar donde se ha realizado la investigación se localiza en la subcuenca del río Ucayali, según INERCO, (2020) está configurado en relieves fisiográficos cuya evolución está conformada por los macizos rocosos y rasgos estructurales, por los movimientos epirogénicos se ha remplazado la cordillera sub andina y la cordillera del divisor, los cuales son reconocidas en el territorio peruano como unidades geo morfoestructurales INERCO CONSULTORIA PERU S.A.C. 2020

3.2. Material y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

Se extrajo material biológico de la laguna anaerobia de la PTARI con apoyo de un brazo extensor, así mismo, el efluente se recolectó de la planta extractora. También se usó botellas de 500 ml y 1000 ml que funcionaron como reactores, vaso de precipitado de 250 ml para recolectar y cuantificar el volumen desplazado, probetas de 100ml, 500 ml y 1000 ml para cuantificar con exactitud el volumen del líquido desplazado, caja de madera de 30x50 cm para contener a las botellas de un litro, focos de calor para controlar la temperatura, soportes de fierro para montar y dar soporte los ensayos, mangueras transparentes para interconectar los reactores, multiparámetro Hanna HI9829 para medir los parámetros físicos químicos de control, pirómetro para medir el control de temperatura del sistema, analizador de composición de biogás (portable biogás analyser MS400); digester HI 839800 de tubos para DQO, fotómetro para DQO HI 83314 y su correspondiente reactivo para DQO de alto rango HI 93754C. Así mismo se usarán los EPPs adecuados (guantes, mascarillas y lentes de seguridad).

3.2.2. Metodología

3.2.2.1. Evaluación del efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en el pH de la actividad metanogénica específica

La investigación consta en la evaluación de la actividad metanogénica específica en diversas diluciones de efluente crudo con efluente tratado y un

testigo sin dilución. Cada dilución se colocó en tres frascos de vidrio de 1000 ml. (Figura 6). Se evaluó el pH en todas las diluciones y testigo antes de someter a las pruebas de la actividad metanogénica específica (AME). Al finalizar la prueba también se volvió tomar los valores de pH en todas repeticiones de cada dilución y testigo. Se utilizó el equipo multiparámetro HANNA HI9829. Donde se identificó el pH del mejor tratamiento que produzca mayor volumen de biogás mediante el método del desplazamiento de la probeta.

Se realizó 3 repeticiones en tres tipos de tratamiento con un testigo, (A50% v/v, B60% v/v, C70% v/v, D80% v/v y un testigo E100% v/v), estas diluciones fueron añadidas a 200 ml de inoculo en cada reactor para dar inicio al test de la AME.

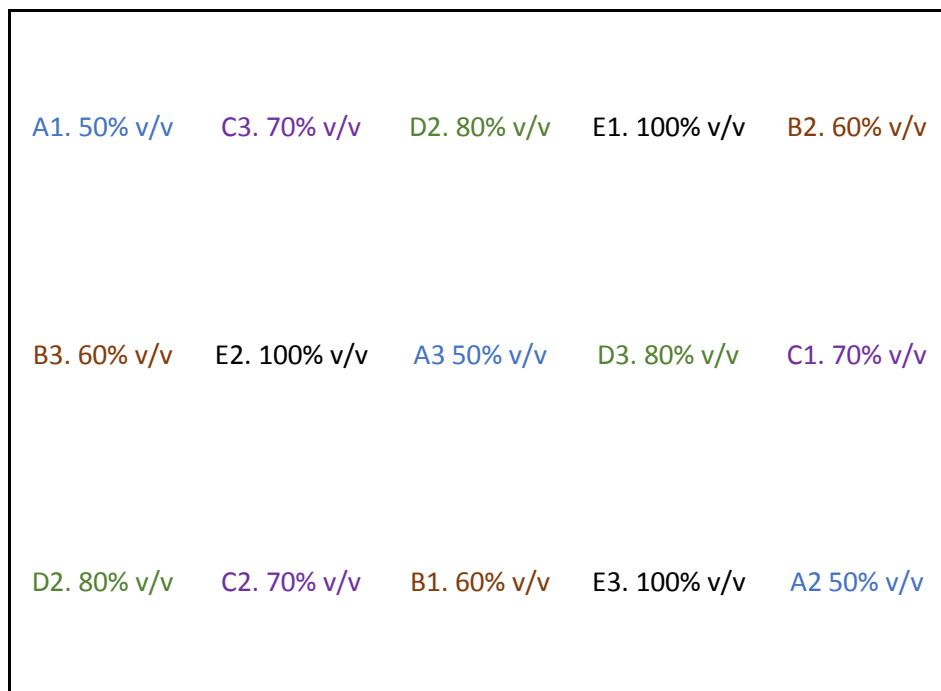


Figura 6. Esquema de distribución de las repeticiones de las diluciones y testigo para el test de AME

Se simuló el mismo principio que ocurre en la alimentación al biodigestor de la PTARI, para el primer tratamiento “A” se utilizó una dilución 400 ml de efluente crudo con 400 ml de efluente de la laguna facultativa. Para “B”, 500 ml de efluente crudo y 300 ml de efluente de la laguna facultativa. En la dilución “C”, 600 ml de efluente crudo y 200 ml de efluente de laguna facultativa. De la misma manera para “D”, 700 ml de efluente crudo y 100 ml de efluente de laguna facultativa. Para el testigo “E” 800 ml de efluente crudo sin dilución. Estos reactores para mantener una temperatura óptima se colocaron en una cámara térmica con focos de calor para mantener una temperatura constante.

3.2.2.2. Evaluación del efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la temperatura y conductividad eléctrica de la actividad metanogénica específica

Al inicio se evaluaron las 4 diluciones y el testigo, de las cuales se repartieron para tres repeticiones de cada tratamiento. Se registró la temperatura y la conductividad eléctrica en las 5 muestras iniciales antes de mezclarlos con los microorganismos, posteriormente después de la prueba de la AME se evaluó 15 muestras (Tabla 3). Las mediciones de estos parámetros se llevaron a cabo con el equipo multiparámetros Hanna HI 9829.

Tabla 3. Distribución de toma de muestras en las repeticiones de las diluciones.

Diluciones – evaluación inicial	Repeticiones- evaluación final
A 50%	A1. 50%
	A2. 50%
	A3. 50%
B 60 %	B1. 60%
	B2. 60%
	B3. 60%
C 70%	C1. 70%
	C2. 70%
	C3. 70%
D 80%	D1. 80%
	D2. 80%
	D3. 80%
E 100% Testigo	E1. 100%
	E2. 100%
	E3. 100%

3.2.2.3. Evaluación del efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la demanda química de oxígeno (DQO) de la actividad metanogénica específica.

Para determinar la demanda química de oxígeno (DQO), se utilizó el digestor de tubos para DQO Hanna HI 839800, los reactivos para DQO de alto rango Hanna HI 93754C y el fotómetro para DQO HI 83314. La DQO de los efluentes crudos son elevados, el reactivo de alto rango solo puede medir hasta 1500 mg/l, para ello se realizó una dilución de 1 en 5 (1/5) con agua destilada, el cual a la vez sirve como blanco para determinar la DQO (figura 5). Se enciende el digestor a 150 °C, después de diluir las muestras se toman 0.2 ml de muestra, los cuales cuidadosamente con los EPP indicados se colocan en los tubos de reactivos HI 93754C, se tapa cuidadosamente y se agita. Posteriormente se coloca en el digestor

a 150°C por un tiempo de dos horas, se deja enfriar a 25°C y se coloca primero el blanco en el fotómetro y se configura modo cero, para luego tomar mediciones de las demás muestras. El resultado de las lecturas se multiplicó por 5 para obtener un valor real de la DQO.

Este proceso se realizó para las 5 muestras iniciales y un blanco, terminada la evaluación del test de la actividad metanogénica se evaluaron a las 15 repeticiones de las diluciones y testigo.

Para determinar el porcentaje de remoción de la carga contaminante o DQO, se usará la siguiente Ecuación (3):

$$\% \text{ Remocion de DQO} = \frac{DQO \text{ inicial} - DQO \text{ final}}{DQO \text{ inicial}} \times 100 \dots (3)$$

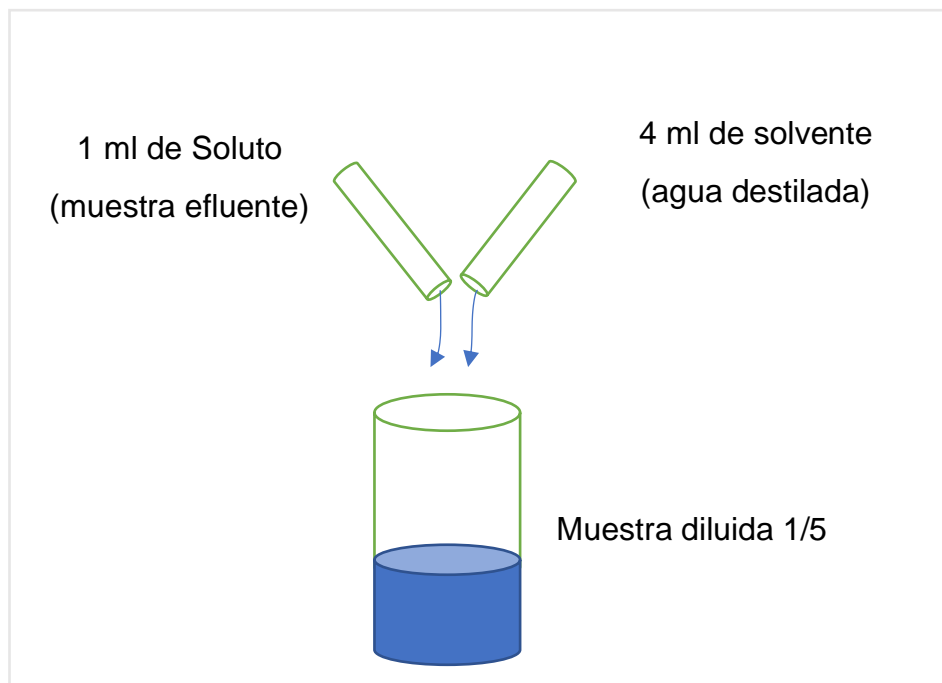


Figura 7. Esquema de dilución 1 en 5 para determinar la DQO

3.2.2.4. Evaluación del efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la composición de biogás de la actividad metanogénica específica.

Para poder evaluar la composición del biogás generado en cada reactor, el gas no se hizo burbujear en solución de hidróxido de sodio, ya que el CO₂ y H₂S reacciona con esta solución y se pierde tales valores. La composición de biogás se determinó con el equipo gas data portable biogás analyser MS400 cada vez que el biogás desplazaba por completo el líquido del reactor 2. Se evaluaron los siguientes componentes presentes en el biogás (%CH₄, %CO₂, ppm H₂S).

3.2.2.5. Evaluación del efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la producción de metano (CH₄) mediante el test de la actividad metanogénica específica (AME).

El biogás generado en los reactores (1) desplaza el líquido del reactor 2, el líquido desplazado se mide en la probeta (3) el cual equivale a la producción de biogás en un tiempo determinado producido. Como se muestra en la Figura 8: “1” reactor, donde se tiene las diferentes repeticiones de las diluciones de efluentes más los inóculos o microorganismos, “2” reactor donde está lleno de agua, el cual se desplazará por la llega del biogás producido o generado en el reactor 1; “3” recipiente donde se recepción líquido desplazado el cual se cuantifica con una probeta.

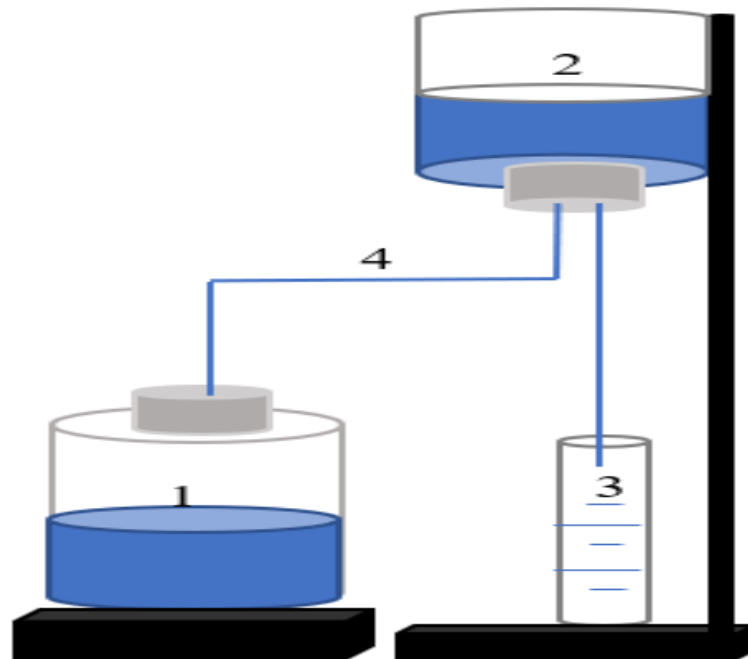


Figura 8. Esquema de la prueba de la actividad metanogénica específica

La actividad metanogénica específica (AME) se realizó a partir del cálculo de la pendiente de la curva de producción acumulada de metano y tiempo de operación de los reactores del sistema, mediante la siguiente Ecuación (4).

$$AME, \left(\frac{g^{DQO}}{g^{SV}} \right) d = \frac{dV_{CH_4}}{STV} d \dots (4) \parallel$$

$$AME \left(\frac{g^{DQO}}{g^{SV}} \right) = \text{Pendiente de la curva de producción de metano, en ml CH}_4/\text{mL.}$$

STV = Masa del lodo inicial en cada uno de los reactores en gramos.

Se uso la Ecuación (5) de Gompertz modificada para determinar las fases de adaptación, crecimiento y deceso los microorganismos intervinientes en la actividad metanogénica.

$$P_{CH_4(t)} = P_{max} * \exp[-\exp(\frac{R_{MAX} * e}{P_{MAX}} * (\lambda - t) + 1)] \dots (5)$$

$P_{CH_4(t)}$ es la producción acumulada de metano (mL CH_4) en el tiempo “t”, P_{max} es el potencial de generación de metano (mL CH_4), R_{max} es la tasa máxima tasa de generación de metano (mL $CH_4 \cdot h^{-1}$), y λ es el tiempo en la fase de adaptación (h-1) y e, es la constante de Euler.

3.2.2.6. Análisis de estudio

1. Nivel de investigación

La investigación es explicativa y/o experimental, ya que se calculó la producción de metano mediante el test de AME a través de tres repeticiones en 4 tipos de diluciones diferentes y un control. Para poder proponer mejoras en el sistema de recirculación de la PTARI-SAP SAC.

2. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicativo, contiene tres repeticiones por cada tratamiento con diferentes diluciones de efluentes de extracción de aceite crudo de palma con efluente final del sistema de tratamiento.

3. Variables de investigación

Variables independientes: Efluentes de la extracción de aceite crudo de palma.

Variables dependientes: Actividad metanogénica específica.

Variables intervinientes: Las variables intervinientes son: pH, conductividad eléctrica, temperatura, DQO, composición de biogás (% CH_4 , % CO_2 , %, ppm H_2S).

4. Operacionalización de variables

La operacionalización de las variables x e y son (Tabla 4):

Tabla 4. Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	FUENTE
Variable independiente. Efluentes de extracción de aceite crudo de palma	Para el efluente de extracción de aceite crudo de palma se realizó diferentes diluciones y un testigo	Dilución de POME (50%,60%, 70%, 80% y 100% o testigo)	pH, T, CE, DQO, composición de biogás	Fuente de estudio
Variable dependiente Actividad metanogénica específica	Experimentalmente, mediante el test de AME se cuantificó la cantidad de biogás (CH₄)	Volumen de metano (CH ₄)	Aumenta, disminuye	Fuente de estudio

5. Diseño de investigación

El diseño es experimental con manipulación de variables.

6. Población y muestra

Población: se tiene un caudal de efluentes de extracción de aceite crudo de palma de 45 m³/h con una ratio de 0.8 a 1.2 por cada tonelada de racimo de fruta fresca (RFF). Como muestra se recolectó 3 litros de inóculos o microorganismos del sistema anaerobio, 9 litros de efluentes de extracción de aceite crudo de palma y 3 litros de efluente final para las diluciones.

7. Análisis estadístico

Se utilizó el modelo estadístico ANOVA unifactorial:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \dots (7)$$

Donde:

Y_{ij}: Actividad metanogénica específica

μ: Media total de producción de metano

α_i: Diluciones de efluentes de extracción de aceite crudo de palma.

ε_{ij}: Error

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en el pH de la actividad metanogénica específica.

En el análisis del pH en la actividad metanogénica se observa que los valores iniciales son ácidos conforme avanza la dilución desde el testigo hacia la dilución 50% v/v, ya que son líquidos de efluentes de extracción de aceite crudo de palma que están fermentados con elevada acidez y carga orgánica contaminante. Culminado el periodo del test de la actividad metanogénica específica, se logra un incremento significativo de los valores de pH en los tratamientos y testigo (Tabla 5). Según Parra *et al.* (2014), cuando los valores de pH se encuentran bajos o ácidos, incrementa la producción de los ácidos grasos volátiles, lo que puede alargar los procesos de hidrólisis, el tiempo de adaptación microbiana y se genera bajas concentraciones de metano, menos calidad energética, de igual manera para el tratamiento testigo “E” el cual tubo un valor menor de pH en relación de los demás tratamientos y también presentó mayor tiempo de actividad metanogénica con mejoras significativas de pH de un 9.8% (figura 9)

Tabla 5. Valores del pH antes y después del test de la AME

Tratamiento	A (50% V/V)	B (60% V/V)	C (70% V/V)	D (80% V/V)	E (100% V/V)
pH inicial	5.44	4.94	4.63	4.45	4.29
pH final	5.58	5.24	5.01	4.89	4.76

Estadísticamente mediante la prueba de t relacionada para los valores de pH antes y después de realizar el test de la AME es significativo, con un p valor 0,004, lo cual nos indica que durante el proceso hubo cambios en los tratamientos relacionados al pH (Tabla 6).

Tabla 6. Prueba de t relacionada para el pH

	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	t	gl	Sig. (bilateral)
Par 1 pH inicial – pH final	-,34600	,13221	,05913	-5,852	4	0,004

Según Aguinaga y Pérez (2020), el pH óptimo para las bacterias metanogénicas tiene que estar entre 6.5 y 7.5. Los valores de pH de los reactores experimentales para el test de la AME no estuvieron entre los rangos que especifican estos autores, sin embargo, terminado el ensayo se observó que hubo mejoras sucesivamente inversamente a las diluciones (Figura 9)

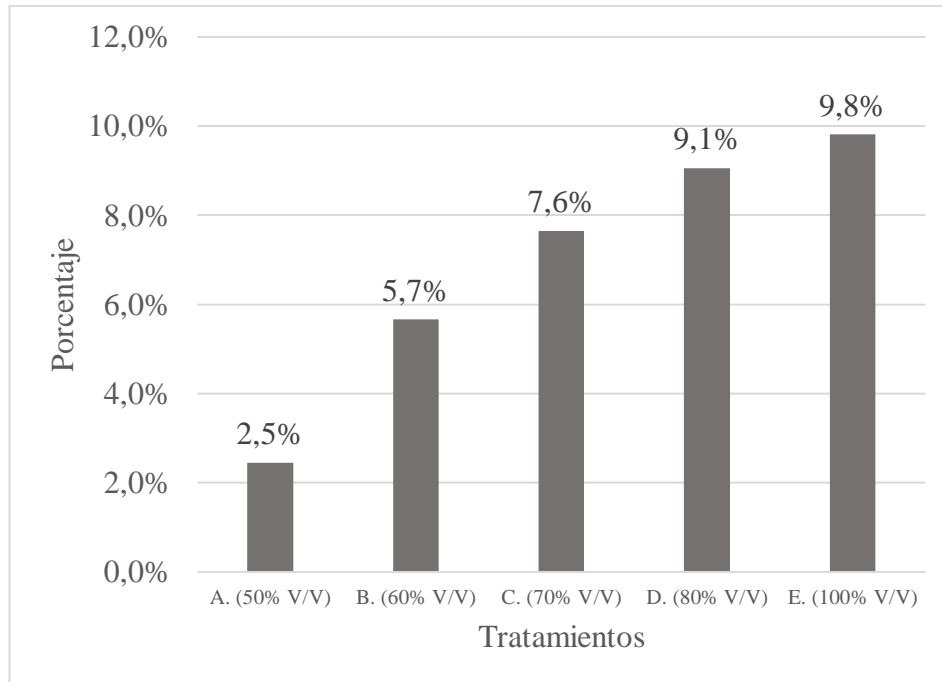


Figura 9. Porcentaje de mejoras de los valores de pH durante el test de AME

4.2. Efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la temperatura y conductividad eléctrica de la actividad metanogénica específica

Según Aguinaga y Pérez (2020), la temperatura es un factor condicionante para la metanogénesis, el punto óptimo es alrededor de 37°C; cuando la temperatura sobrepasa los 10 °C, la velocidad de reacción microbiana aumenta al doble, de cierta manera a una temperatura de 25 °C, la actividad microbiana es solo la mitad de una a 35°C. cuando la temperatura supera los 40 °C, la actividad metanogénica y capacidad de degradación del del medio cae muy rápidamente. En esta investigación se tuvieron valores iniciales menores a 35 °C, entre 27°C y 31°C conforme a las diluciones desde “A” hasta el testigo “E”, en la figura 10 se muestra que medida que la temperatura de inicio incrementa, la cantidad de biogás también presenta un incremento significativo. Según Duarte, (2009). la temperatura va influenciar en el contenido de metano en la composición del biogás, lo óptimo es entre 20 y 45 °C, a bajas temperaturas la concentración de metano se eleva y se reduce la cantidad de biogás

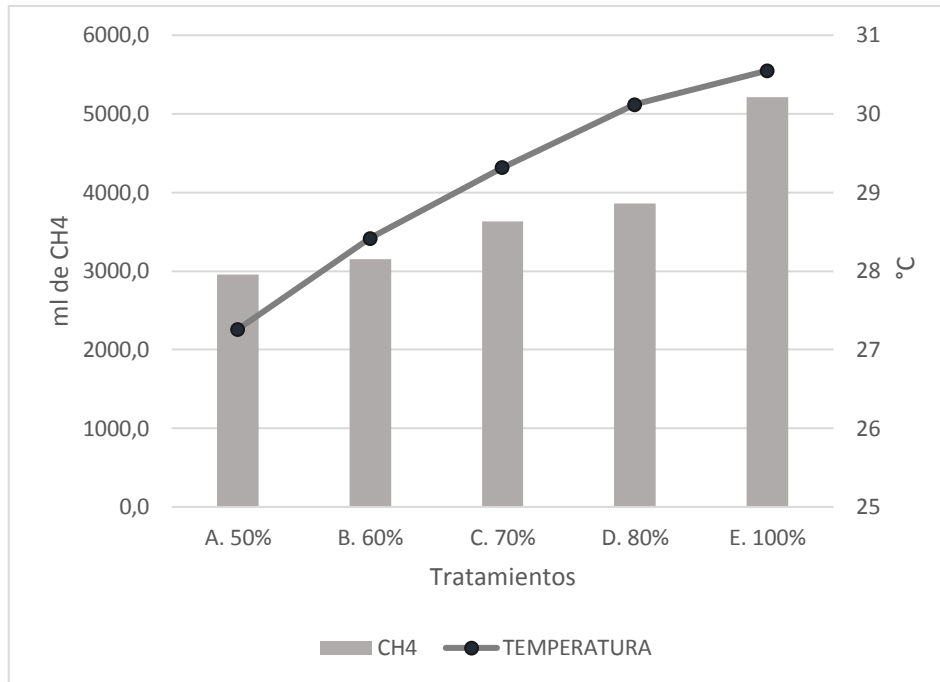


Figura 10. Volumen de biogás con respecto a la temperatura inicial

Estadísticamente mediante la prueba de t relacionada para los valores de temperatura antes y después de realizar el test de la AME es altamente significativo, con un p valor 0.001429, lo cual nos indica que durante el proceso hubo cambios en los tratamientos relacionados a la temperatura (Tabla 7).

Tabla 7. Prueba de t relacionada para la temperatura

		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	t	gl	Sig. (bilateral)
Par 2	T° Inicial-T° final	5.0373	1.43646	160,664	7.841	4	0.001429

La conductividad eléctrica es un factor condicionante para los microorganismos metanogénicos. Según Ortiz (2011) las concentraciones de salinidad va influir en la conductividad eléctrica debido a que son equitativamente proporcionales. Así mismo el incremento de iones K^+ y Na^+ del medio hacen que incremente la salinidad en la mezcla y se reduzca la actividad metanogénica de las bacterias anaerobias ya que la elevada conductividad eléctrica causa inhibición. De la misma manera en la Figura 11, el volumen de metano es inversamente proporcional a los valores de la conductividad eléctrica inicial, en el tratamiento A 50% v/v con 8 669 $\mu S/cm$ de conductividad eléctrica, se obtuvo 2 953 ml de biogás y en el testigo sin dilución "E" 100% V/V con conductividad inicial de 8 244 $\mu S/cm$ nos dio un volumen total de biogás de 5 213 mL.

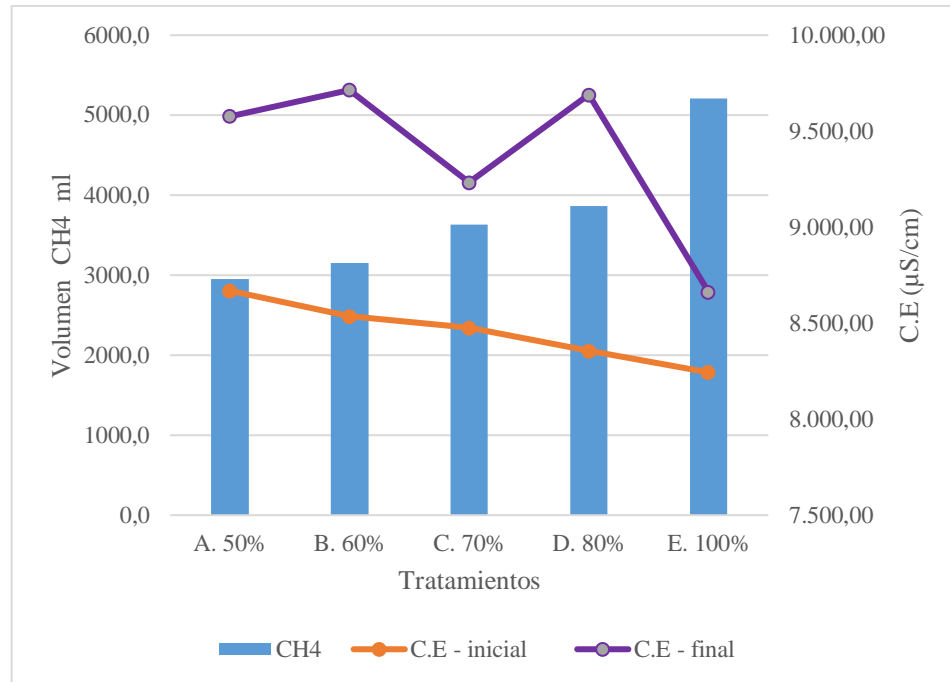


Figura 11. Conductividad eléctrica en la actividad metanogénica

Durante el test de la actividad metanogénica se realizaron mediciones de conductividad eléctrica al inicio y fin, obteniendo un significativo incremento en cada repetición de los tratamientos. Estadísticamente con la prueba t relacionada a la conductividad eléctrica de los tratamientos hubo variación significativa con un p de 0.005, lo cual podemos afirmar que hubo variación entre tratamientos y que hubo cambios significativos durante el test de la actividad metanogénica. Los compuestos de las grandes se van mineralizando en el proceso de la digestión lográndose incrementar los iones calcio y magnesio. (Tabla 8)

Tabla 8. Prueba t relacionada para la conductividad eléctrica

		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	t	gl	Sig. (bilateral)
Par 1	C.E. inicial – C.E. final	-919,598	359,255	160,664	-5,724	4	0,005

En la tabla 9, se muestra los valores de conductividad eléctrica medidos antes y después de la tes de AME, con el porcentaje de incremento, siendo el del tratamiento “D” 80% v/v con mayor incremento de conductividad del 13.8% y el con menor incremento de conductividad el tratamiento control “E” 100% v/v con 4.8% de incremento.

Tabla 9. Valores de conductividad eléctrica inicial y final

Tratamiento	A (50% V/V)	B (60% V/V)	C (70% V/V)	D (80% V/V)	E (100% V/V)
Conductividad eléctrica – inicial ($\mu\text{S/cm}$)	8 669,00	8 536,00	8 476,00	8 355,00	8 244,00
Conductividad eléctrica – final ($\mu\text{S/cm}$)	9 578,33	9 714,33	9 232,33	9 689,67	8 663,33
% incremento	9,5%	12,1%	8,2%	13,8%	4,8%

4.3. Efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la carga contaminante (DQO) de la actividad metanogénica específica

Rodríguez (2004), en el rubro de la depuración de aguas residuales, la carga contaminante es determinada a través de la DQO (demanda química de oxígeno), la cual fundamentalmente mide la concentración de materia orgánica. En la investigación se determinó la DQO al inicio y fin de los test de la AME en los diferentes tratamientos, logrando obtener para el tratamiento “A” 50% V/V una reducción de la carga contaminante (DQO) de 52.7%, directamente proporcional a las diluciones de los tratamientos hasta “E” 100% V/V con una reducción mínima del 35.7 % de la DQO. (Tabla 10). Según Joubert y Britz, (1986), la reducción de la DQO depende generalmente del pH, TRH y temperatura. En los resultados los tratamientos de menor dilución presentaron altos valores de pH y removieron mayor DQO

Tabla 10. Valores de DQO inicial y final

Tratamiento	A (50% V/V)	B (60% V/V)	C (70% V/V)	D (80% V/V)	E (100% V/V)
DQO inicial (mg/l)	33 540,0	41 200,0	41 580,0	41 675,0	42 555,0
DQO final (mg/l)	15 870,0	19 931,7	22 350,0	24 810,0	27 361,7
% Reducción	52.7%	51.6%	46.2%	40.5%	35.7%

Estadísticamente según la prueba t nos corrobora que hubo diferencias significativas en los test, es decir hubo reducción de la DQO en los tratamientos cada uno independiente del otro (Tabla 11)

Tabla 11. Prueba t relacionada para la DQO

	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	t	gl	Sig. (bilateral)
Par 1 DQO_inicial - DQO_final	18 045,32	2 316,2	1 035,84	17,42	4	0,000

En la figura 12, muestra a la demanda química de oxígeno inicial como un factor condicionante para la producción de biogás, ya que es directamente proporcional, a mayor carga orgánica, mayor producción o generación. Siendo el tratamiento “A” 50% V/V con menor carga orgánica inicial (DQO) de 33 540 mg/l y una producción de biogás de 2 953 ml; así mismo el testigo “E” 100% V/V, con una DQO inicial de 42 555 mg/l generó 5 213 ml de biogás. Según Yu y Fang, (2001), para remover la DQO del sistema, se requieren condiciones estrictas, sin la intervención externa de aceptor de electrones; y así la DQO se puede transformar a AGVs, alcoholes, hidrógeno, metano y lodos

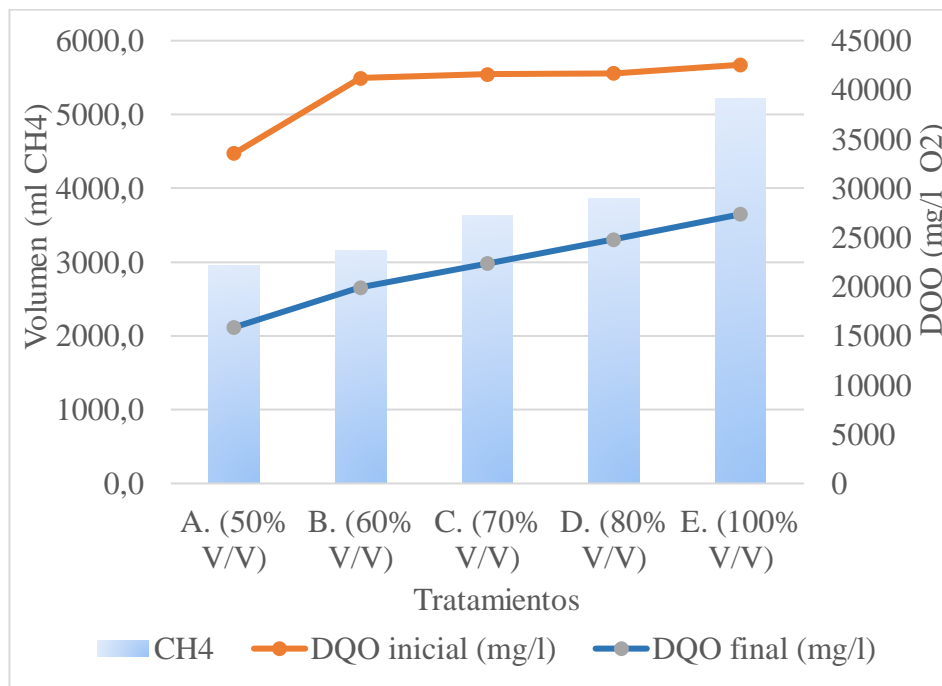


Figura 12. Volumen de biogás y Demanda Química de Oxígeno en los tratamientos

4.4. Efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la composición de biogás (CH₄, CO₂, H₂S) de la actividad metanogénica específica.

Durante el proceso de la digestión anaerobia intervienen varios consorcios de colonias bacterianas, entre ellas las más comunes las bacterias metanogénicas y las sulfuro-reductoras, las cuales generan metano y sulfuro de hidrógeno. En la figura 13, se hace una comparación entre el metano y el ácido sulfhídrico presentes en el biogás de cada tratamiento, logrando observar que a medida que pasa el tiempo el porcentaje de CH₄ y la concentración de H₂S son inversamente proporcionales debido a que hay una disputa por sustrato entre las metanogénicas y sulfuro-reductoras. Según los estudios realizados por Betance, (2010) las bacterias sulfuro-reductoras compiten por el sustrato con las demás colonias de bacterias, generan H₂S y baja producción de CH₄, ocasionando problemas de olores a huevo podrido e inhibición.

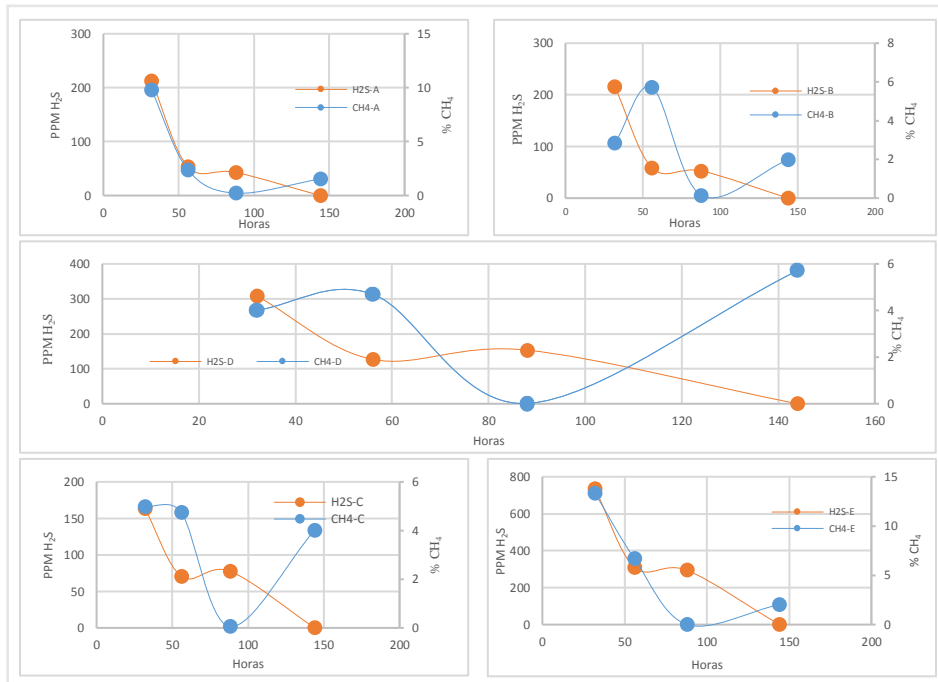


Figura 13. Comportamiento del CH₄ y H₂S en el tiempo en cada tratamiento.

Según Fernández et al. (2006), la metanogénesis es la última fase de la digestión anaerobia, las cuales se dan a través de dos rutas: La primera de ellas, es la formación de metano y dióxido de carbono a partir del principal resultado de la fermentación, el ácido acético. Las bacterias que consumen el ácido acético se denominan bacterias acetoclastas. En los resultados de la investigación se realizó medición de la composición de biogás en diferentes tiempos desde el inicio del test de la AME, a 32H, 56H, 88H y 144H (Figura 14), logrando cuantificar variaciones de porcentaje CH₄, CO₂ y concentración de ppm de H₂S, lo cual corrobora se relaciona a su teoría de Fernández et al. (2006). Además de metano y dióxido de carbono, se encontró concentraciones elevadas de ácido sulfhídrico, lo cual nos indica que el efluente de extracción de aceite crudo de palma brinda los recursos necesarios para la activación y la proliferación de las bacterias sulfo-reductoras, las cuales compiten con las metanogénicas (Betance, 2010).

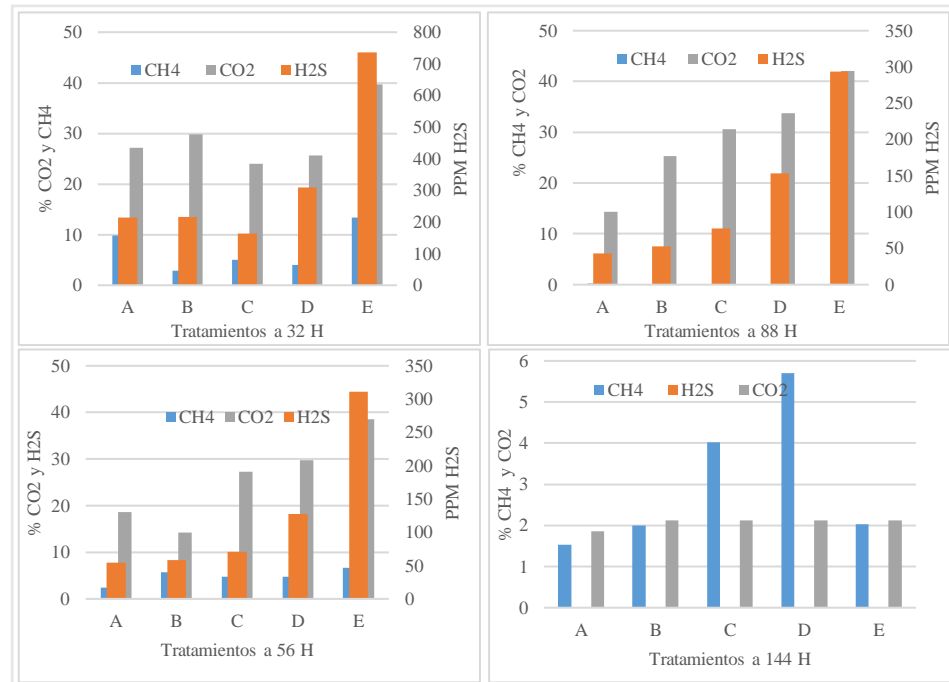


Figura 14. Variación de composición de biogás en el tiempo

En la figura 14 muestra que en las primeras 32 horas de AME, la concentración de H₂S es elevada, sobrepasando los 700 ppm sobre todo en tratamiento testigo 100% V/V sin dilución, seguido por el porcentaje de CO₂ y CH₄. Pasado las 56 horas de AME, las concentraciones de H₂S van disminuyendo, pero manteniéndose elevados sobre todo en el tratamiento testigo “E”, en el tratamiento “B” hay un aumento de porcentaje de CH₄. transcurrido las 88 horas, los porcentajes de CH₄ disminuyen drásticamente en todos los tratamientos, mientras que el CO₂ y H₂S se mantienen elevados. A las 144 horas la concentración de H₂S se pierde, obteniéndose valores de 0 ppm, mientras que el metano sube sus niveles, siendo más representativos en el tratamiento “D” y “C”.

4.5. Efluentes de extracción de aceite crudo de palma en la producción de metano (CH₄) mediante el test de la actividad metanogénica específica.

Mediante los datos obtenidos de la investigación se realizó la prueba de distribución normal, en donde se evidencio que los valores de “p valor” para los diferentes tratamientos son mayor a 0,05; esto quiere decir que los datos presentan una distribución normal (Tabla 12).

Tabla 12. Prueba de normalidad

Tratamiento	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
A	0,862	3	0,274
B	0,997	3	0,898
C	0,832	3	0,194
D	0,891	3	0,358
E	0,893	3	0,363

En la Tabla 13 se muestra el análisis estadístico realizado en con los datos de producción de metano. Por lo cual, se presenta un p-valor de 0.000; esto quiere decir que los 5 tratamientos realizados a diferentes concentraciones presentan diferencias significativas, en tal sentido los volúmenes producidos por metano fueron menores a menor concentración de dilución de los tratamientos.

Tabla 13. Análisis estadístico

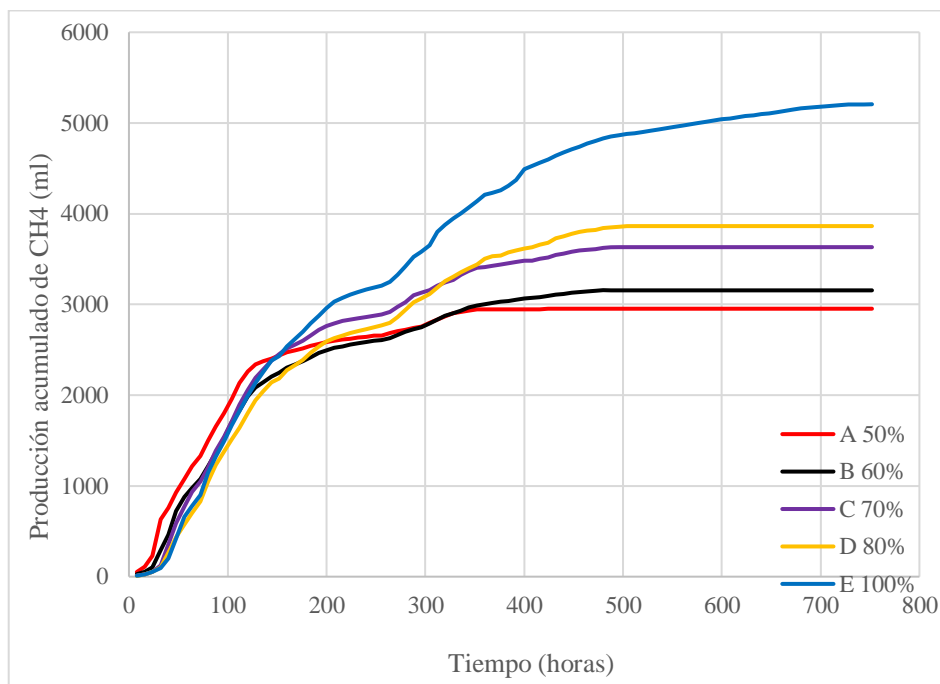
Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	9 466 329,400	4	2 366 582,350	3 074,482	0,000
Error	7 697,500	10	769,750		
Total corregido	9 474 026,900	14			

En la Tabla 14, se realizó las comparaciones múltiples de las medias para identificar la diferencia marcada que existe entre tratamiento y producción de metano, donde ningún tratamiento tuvo relación o parecido con su mediana.

Tabla 14. Comparaciones de medias

TRATAMIENTO	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	5
A	3	2953,000				
B	3		3155,167			
C	3			3631,667		
D	3				3863,667	
E	3					5213,000
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Mediante el test de la actividad metanogénica específica se puede cuantificar la producción de biogás durante un tiempo determinado, con manipulación de factores físico químicos, lo cual va a influir en la producción acumulada de volumen desplazado. En la figura 15 muestra la producción acumulada de biogás para los tratamientos A, B, C, D y E, durante el tiempo de operación (horas). Como se observa la producción de biogás fue directamente proporcional a las diluciones de los tratamientos, siendo el mínimo valor en el tratamiento “A” 50% V/V con 2 953 mL y un tiempo máximo de digestión anaerobia de 368 horas; seguido por “B” 60% V/V un volumen de 3155.2 mL en un tiempo de 480 horas, “C” 70% V/V un volumen de biogás de 3631.7 ml en un tiempo de 496 horas, “D” 80% V/V un volumen acumulado de 3863.7 mL en un tiempo de 504 horas y para el tratamiento control “E” 100% V/V se obtuvo un volumen de 5 213 mL en 756 horas.

**Figura 15.** Producción acumulada de biogás.

Según Zhang et al. (2014), los modelos predictivos son una herramienta muy útil que permite describir y comprender el comportamiento de los microorganismos bajo desiguales condiciones; en peculiar el modelo de Gompertz modificado explica la hidrólisis de la materia orgánica particulada. En base de la producción de metano acumulado se ha calculado el modelo de Gompertz el cual se observan en la Figura 15. Los valores de la Tabla 15 indican que el modelo de Gompertz modificado tal como indica Zwietering et al. (1990) se ajusta adecuadamente en las curvas “s” de crecimiento, en los cuales se puede percibir el tiempo de adaptación, crecimiento y muerte de los microorganismos. Los elevados valores de Rmax se debe a la alta actividad microbiana, sobre todo para el tratamiento “A” con 19,45 mL CH₄*h⁻¹ seguido del tratamiento “C” con 16,1 mL CH₄*h⁻¹. El tiempo de la fase de letargo o adaptación de los microorganismos fue variado, el tratamiento testigo presento un mayor tiempo de adaptación de 21.4 h, seguido por el tratamiento “B” con 17,5 h, luego “A” con 5,42 h; siendo el tratamiento con menor tiempo de adaptación “C” con 2,1 h, seguido por “D” con 2,2 horas.

Tabla 15. Parámetros del modelo modificado de Gompertz

Tratamientos	P Max (mL/CH ₄)	λ(h)	Rmax (mL CH ₄ *H-1)	R
A	2 919.,033	5,422481595	19,48210	0,99292996
B	3 113.443	17,51414557	14,94187	0,99103639
C	3 588,843	2,126276467	16,10019	0,99168999
D	3 875,075	2,281772721	13,52387	0,99267586
E	5 198,855	21,43325606	14,05434	0,99328667

Las curvas “S” del modelo matemático Gompertz modificado, nos dan una mejor explicación sobre el comportamiento de una población de microorganismos, sobre todo las fases de crecimiento (tiempo de latencia u adaptación, crecimiento, fase estacionaria y muerte). En la Figura 16, las bacterias que agotaron rápido el sustrato y que llegaron a la fase estacionaria según la cantidad de volumen de biogás producido fueron: los del tratamiento “A” 50% V/V, con una cantidad máxima de producción de biogás de 2 919,033 mL, seguido muy cercano del tratamiento “B” 60% V/V con 3 113.,44 mL; mientras tanto los tratamientos “C” 70%V/V y “D” 80% V/V obtuvieron valores muy cercanos de 3 588,84 ml y 3 875,07ml; para el tratamiento testigo “E” 100% V/V se obtuvo 5 198,85 mL.

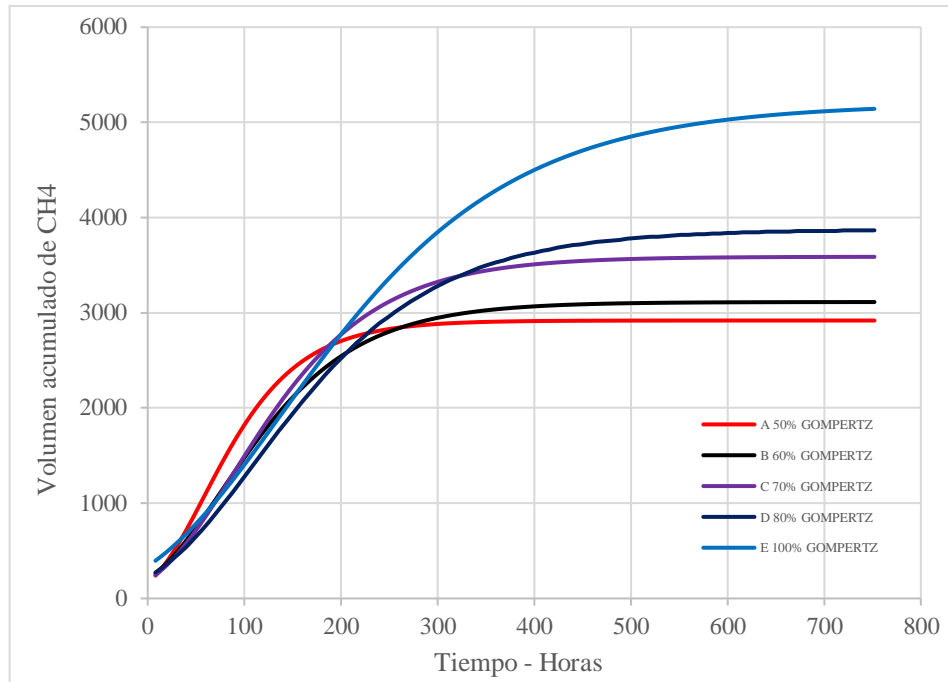


Figura 16. Curvas S del modelo Gompertz modificado aplicado a la AME.

V. CONCLUSIÓN

1. El efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma sobre el pH de la actividad metanogénica es altamente significativo, además es inversamente proporcional al volumen de generación de biogás
2. El efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma sobre la temperatura de la actividad metanogénica es altamente significativo, además es directamente proporcional a las diluciones. Y el efecto de los efluentes sobre la conductividad eléctrica de la AME, es altamente significativo he inversamente proporcional a las diluciones y a la producción de biogás.
3. El efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma sobre la DQO de la actividad metanogénica es altamente significativo, además es directamente proporcional a las diluciones y al volumen de generación de biogás.
4. El efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma sobre la composición de biogás: CH₄, CO₂, H₂S de la actividad metanogénica es significativo, además, para el metano es directamente proporcional al tiempo de evaluación del test, para el CO₂ y H₂S es inversamente proporcional al tiempo de evaluación del test de la AME
5. El efecto de los efluentes de extracción de aceite crudo de palma sobre la producción de metano en la actividad metanogénica es significativo, además, es directamente proporcional a las diluciones.; a menor dilución, menor cantidad de generación de gases metano

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Según el experimento realizado se recomienda realizar una recirculación del sistema de tratamiento en la PTARI SAP SAC que cumpla una dilución del 70% V/V, es decir de un 100% de alimentación al sistema, un 70% de efluente crudo y un 30% de efluente estabilizado.
2. Implementar más procesos en secuencia de la digestión anaerobia. como lagunas facultativas, sistema aeróbico o un decanter para separación solido- liquido.
3. Para obtener mayor actividad metanogénica es necesario incrementar el volumen de inóculos en el reactor
4. Para un futuro test de la AME, evaluar la concentración de aceites y grasas, nitratos, amonio y sulfatos

VII. REFERENCIAS

- Aguinaga. S y Pérez S. (2020). Efecto de la concentración del biocida Stabrex ST70 en la actividad metanogénica de lodos anaeróbicos de reactor UASB de Cervecería Motupe. [Tesis de grado no publicada, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo].
- Althausen, M. (2016). *Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio-Convertir un residuo en un recurso. Palmas*, 37(Especial Tomo II), pp. 31-37.
- Aquino. F, Chernicharo. A, Foresti. E, Florêncio. M, Monteggia. L. 2006. *Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios*.
- Betance. V. (2010). *Sistema mixto de tanques anaerobios y fitoremediación como una alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales en centros recreativos*. [Tesis de posgrado no publicada, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. Departamento de Posgrado].
- Cáceres. O, (2019). *Potencial de la pulpa de Coffea arabica L. para la producción de metano, biol y biosol a nivel de laboratorio – UNAS*. [Tesis de maestría no publicada, Universidad Nacional Agraria de la Selva].
- Caicedo. F. 2006. Diseño, construcción y arranque de un reactor U.A.S.B. piloto para el tratamiento de lixiviados.
- Chernicharo, C. (2007). Principios do tratamento biológico de águas residuárias. Universidad Federal de Minas Gerais. Vol V. Brasil.
- Díaz-Báez, M.; Espitia, S. y Molina, F. (2002) *Digestión Anaerobia una Aproximación a la Tecnología*. UNIBIBLIOS.
- Dillon, A. (2016). *Digestión anaerobia en lechos bacterianos para remoción de nutrientes y generación gas metano a partir de agua residual de una extractora de aceite crudo de palma*. [Tesis de grado no publicada, Universidad San Francisco de Quito].
- Fernández. A, García. P, Rosal. R, Dorado. M, Villar.S, Sanz. J. 2006. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*
- Garzón. P, Peñafiel. R, Ochoa-Herrera. V. (2015). *Estudio de la generación de gas metano a partir del agua residual del proceso de extracción de aceite crudo de palma en biodigestores experimentales*.

- Joubert. A y Britz. J. (1986). The effect of Ph and temperture mnipulation on metabolite composition during acidogénesis in a hybrid anaerobic digester. *Appllied microbiology and biotecnology* 24:253-258
- Ortiz. V. (2011). Puesta a punto de una metodología para la determinación de la actividad metanogénica específica (AME) de un fango anaerobio mediante el sistema oxitop® . influencia de las principales variables experimentales. [Trabajo fin de master no publicada, Universidad Politécnica de Valencia].
- Parra. B, Torres. P, Marmolejo. L, Cárdenas. L, Vásquez. C, Torres. W, Ordóñez. J (2014). Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. *Rev.udcaactual.divulg.cient.vol.17 no.2 Bogotá julio/dic.2014*
- Pazmiño. A. (2015). *Estudio de la generación de gas metano (CH₄) y remoción de carga orgánica en las lagunas anaerobias de la planta de tratamiento de aguas residuales de una extractora de aceite crudo de palma*. [Tesis de grado no publicada, Universidad San Francisco de Quito].
- Programa 4E de la GIZ, (2013). *Análisis de Factibilidad de la producción de biogás con aguas residuales de la producción de aceite de palma (POME) en el plantel de COAPALMA ECARA, Tocoa*
- Ramon. J, Derley. J, Rozo. D. (2014). Sistema de monitoreo y control basado en el software RTMC aplicado al proceso de biodigestión anaeróbica. *Revista colombiana de tecnologías avanzadas*.
https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIIG/home_40/recursos/05_v25_30/revista_26/25042016/01.pdf
- Rivas. O, Faith. M; Guillén. R. (2009). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad *Tecnología en Marcha*, Vol. 23, N.º 1, Enero-Marzo 2010, P. 39-46
- Rodríguez. J, Ventura. E, Lopez. M, Moreno. V, (2017). *Obtención de biogás a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante la digestión anaerobia mesofílica*. *Revista de Energía Química y Física*. Vol.4 No.12, 34-43
- Romero, J. A. (2002). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Bogotá, Colombia: Escuela de Ingeniería. 2ª edición.

- Torres Lozada, Patricia; Pérez, Andrea. (2010). Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*. Pp 5-14.
- Torres. Y, Chaparro. T. (2015). Actividad metanogénica específica de una solución acuosa de amoxicilina. Universidad Militar Nueva Granada 130 134
- Yu. H y Fang. H. (2001). Acidification of mid-and high-strength dairy wastewaters. *Water Research* 35:3697-3705

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de obtención de datos.

Tabla 7. Producción de biogás por repetición de cada tratamiento cada 8 horas

Tiempo	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3
8	53	50	52	27	20	35	11	10	1.5	8	11	5	10	8	13
16	57	51	60	21	28	27	18	13	12	13	16	15	15	13	10
24	120	115	123	48	48.5	56	27	28	32	30	37	27	33	26	36
32	325	440	445	195	190	187	80	50	65	50	40	45	40	30	43
40	170	90	120	155	195	152	210	260	230	180	150	163	104	118	110
48	170	155	180	260	265	250	240	245	220	165	173	182	225	228	200
56	150	132	171	168	135	166	184	183	180	128	150	140	205	259	250
64	125	145	161	96	81	125	187	143	158	137	110	131	132	93	128
72	115	125	100	105	91	94	125	100	115	113	140	135	120	133	110
80	135	180	182	125	140	157	175	145	150	230	210	215	245	257	240
88	189	150	125	160	143	158	183	189	176	180	178	177	185	175	180
96	173	132	134	144	188	155	145	160	158	130	166	155	165	172	158
104	170	173	140	166	166	183	171	178	163	136	143	134	170	184	180
112	165	175	178	140	130	120	190	170	185	120	130	127	166	156	140
120	137	135	120	179	150	139	170	160	158	176	160	153	172	153	190
128	73	79	75	102	97	91	122	134	145	143	131	136	145	148	135
136	27	35	36	65	61	51	90	103	94	106	98	95	115	111	120
144	26	30	35	60	59	55	88	100	105	93	105	103	125	131	128
152	28	34	45	49	38	58	64	66	75	44	48	42	51	55	53
160	31	38	36	54	55	57	65	63	58	86	89	84	113	105	101
168	20	26	12	29	34	30	43	36	48	55	59	58	78	76	86
176	24	17	25	48	30	36	42	58	45	58	60	55	86	85	77
184	16	34	27	43	47	42	47	55	52	79	84	73	90	86	100
192	18	26	23	48	55	50	65	58	64	70	75	72	87	86	82
200	24	18	18	24	25	26	42	44	41	53	55	57	80	83	75
208	17	24	10	28	23	25	32	35	35	42	30	39	78	67	75
216	9	13	15	21	19	21	23	27	25	25	29	30	38	43	45
224	10	12	13	13	18	15	15	12	8	22	32	26	35	37	36
232	14	10	12	13	17	14	11	18	12	22	21	19	26	28	26
240	10	8	11	14	13	15	15	17	15	18	20	25	30	24	25
248	10	8	11	14	13	15	15	17	15	18	20	25	30	24	25
256	3	5	5	10	12	10	15	11	16	20	23	18	20	18	23

568	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	15	16
576	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	13	14
584	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	15	13
592	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	13	14
600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	12	13
608	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	12	11
616	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	14
624	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	13	13
632	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	10	10
640	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	12	9
648	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	14	11
656	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	11	13
664	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	11	11
672	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	14	14
680	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	10	12
688	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	9
696	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	9	10
704	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	6	6
712	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	7	8
720	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	6
728	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	5	5
736	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	2
744	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
752	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Tabla 8. Volumen acumulado del promedio de las repeticiones

Tiempo	A 50%	B 60%	C 70%	D 80%	E 100%
8	51.7	27.3	12.0	9.7	6.7
16	107.7	52.7	26.3	20.0	15.7
24	227.0	103.5	55.3	54.0	54.7
32	630.3	294.2	120.3	99.0	92.3
40	757.0	461.5	353.7	263.3	203.0
48	925.3	719.8	588.7	436.7	420.7
56	1076.3	876.2	771.0	576.0	658.7
64	1220.0	976.8	933.7	702.0	776.3
72	1333.3	1073.5	1047.0	831.3	897.3
80	1499.0	1214.2	1203.7	1049.7	1144.7
88	1653.7	1367.8	1386.3	1228.0	1324.7
96	1800.0	1530.2	1540.7	1378.3	1489.7

104	1961.0	1701.8	1711.3	1516.0	1667.7
112	2133.7	1831.8	1893.0	1641.7	1821.7
120	2264.3	1987.8	2055.7	1804.7	1993.3
128	2340.0	2084.5	2189.3	1941.3	2136.0
136	2372.7	2143.5	2285.0	2041.0	2251.3
144	2403.0	2201.5	2382.7	2141.3	2379.3
152	2438.7	2249.8	2451.0	2186.0	2432.3
160	2473.7	2305.2	2513.0	2272.3	2538.7
168	2493.0	2336.2	2555.3	2329.7	2618.7
176	2515.0	2374.2	2603.7	2387.3	2701.3
184	2540.7	2418.2	2655.0	2466.0	2793.3
192	2563.0	2469.2	2717.3	2538.3	2878.3
200	2583.0	2494.2	2759.7	2593.3	2957.7
208	2600.0	2519.5	2793.7	2630.3	3031.0
216	2612.3	2539.8	2818.7	2658.3	3073.0
224	2624.0	2555.2	2830.3	2685.0	3109.0
232	2636.0	2569.8	2844.0	2705.7	3135.7
240	2645.7	2583.8	2859.7	2726.7	3162.0
248	2655.3	2597.8	2875.3	2747.7	3188.3
256	2659.7	2608.5	2889.3	2768.0	3208.7
264	2685.7	2631.8	2916.7	2798.7	3252.0
272	2708.0	2663.2	2973.7	2862.3	3325.7
280	2723.0	2698.2	3027.0	2936.3	3421.0
288	2740.7	2724.2	3103.0	3021.0	3522.0
296	2754.7	2750.5	3129.0	3063.3	3584.0
304	2797.3	2792.2	3154.3	3116.3	3648.7
312	2831.7	2836.5	3209.7	3189.3	3800.0
320	2866.3	2877.5	3242.7	3255.7	3874.7
328	2902.7	2906.2	3272.7	3307.7	3950.0
336	2920.0	2930.8	3330.0	3354.0	4005.3
344	2934.7	2965.5	3370.0	3398.3	4069.7
352	2944.0	2987.2	3402.0	3440.7	4136.0
360	2946.3	3003.5	3412.3	3501.7	4207.3
368	2947.0	3017.5	3424.0	3528.7	4232.3
376	2947.7	3027.5	3438.0	3541.0	4258.3
384	2948.3	3037.5	3451.7	3571.7	4311.0
392	2948.3	3050.2	3465.7	3593.0	4374.7
400	2949.3	3067.2	3480.0	3619.3	4493.0
408	2949.3	3072.8	3485.0	3632.7	4529.0
416	2949.3	3078.2	3501.0	3661.7	4563.0
424	2951.0	3094.5	3514.7	3683.3	4598.0
432	2951.7	3109.8	3543.3	3728.0	4639.7
440	2951.7	3113.8	3559.3	3752.7	4675.7
448	2952.0	3127.8	3584.3	3781.0	4710.7
456	2952.0	3136.5	3597.3	3800.0	4740.3
464	2952.7	3142.5	3603.0	3816.3	4775.0
472	2953.0	3149.2	3610.7	3823.3	4800.0
480	2953.0	3154.8	3623.7	3840.0	4827.3
488	2953.0	3155.2	3629.0	3850.7	4849.3
496	2953.0	3155.2	3631.7	3859.3	4865.0

504	2953.0	3155.2	3631.7	3863.0	4879.0
512	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	4889.7
520	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	4901.0
528	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	4914.0
536	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	4928.0
544	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	4941.7
552	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	4956.3
560	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	4969.0
568	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	4985.0
576	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	4998.3
584	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5012.3
592	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5026.3
600	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5038.7
608	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5050.0
616	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5062.0
624	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5074.7
632	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5085.3
640	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5096.7
648	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5108.7
656	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5121.0
664	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5133.3
672	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5147.0
680	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5158.3
688	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5168.0
696	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5178.0
704	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5185.0
712	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5192.3
720	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5197.7
728	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5203.0
736	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5205.3
744	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5206.0
752	2953.0	3155.2	3631.7	3863.7	5206.3

Tabla 9. Valores obtenidos con la ecuación de Gompertz modificado

Tiempo (horas)	A-Gompertz	B- Gompertz	C- Gompertz	D- Gompertz	E- Gompertz
8	239.365	262.179	243.939	272.608	396.077
16	335.583	335.040	313.196	330.969	458.794
24	449.485	417.871	392.883	396.167	527.000
32	578.742	509.893	482.569	468.017	600.574
40	720.153	610.028	581.508	546.204	679.332
48	870.039	716.974	688.689	630.297	763.032
56	1024.612	829.287	802.900	719.764	851.377
64	1180.281	945.459	922.797	813.995	944.028
72	1333.868	1063.990	1046.966	912.323	1040.607
80	1482.733	1183.448	1173.986	1014.041	1140.704
88	1624.820	1302.511	1302.479	1118.427	1243.891
96	1758.646	1419.997	1431.152	1224.756	1349.722

104	1883.250	1534.888	1558.826	1332.322	1457.746
112	1998.118	1646.332	1684.458	1440.445	1567.509
120	2103.103	1753.643	1807.148	1548.487	1678.566
128	2198.343	1856.297	1926.146	1655.856	1790.479
136	2284.188	1953.913	2040.846	1762.016	1902.830
144	2361.134	2046.242	2150.782	1866.486	2015.216
152	2429.772	2133.152	2255.613	1968.844	2127.259
160	2490.745	2214.605	2355.112	2068.728	2238.605
168	2544.712	2290.646	2449.154	2165.832	2348.927
176	2592.331	2361.384	2537.699	2259.905	2457.926
184	2634.235	2426.980	2620.779	2350.747	2565.331
192	2671.024	2487.634	2698.487	2438.209	2670.900
200	2703.257	2543.574	2770.963	2522.181	2774.417
208	2731.448	2595.047	2838.384	2602.597	2875.697
216	2756.069	2642.310	2900.956	2679.424	2974.579
224	2777.541	2685.626	2958.905	2752.659	3070.928
232	2796.248	2725.257	3012.468	2822.329	3164.632
240	2812.529	2761.461	3061.890	2888.481	3255.604
248	2826.687	2794.488	3107.419	2951.181	3343.777
256	2838.990	2824.581	3149.302	3010.515	3429.102
264	2849.674	2851.969	3187.780	3066.576	3511.549
272	2858.947	2876.869	3223.087	3119.472	3591.103
280	2866.992	2899.489	3255.451	3169.317	3667.766
288	2873.968	2920.018	3285.088	3216.230	3741.550
296	2880.015	2938.638	3312.203	3260.334	3812.481
304	2885.255	2955.514	3336.992	3301.755	3880.593
312	2889.796	2970.801	3359.637	3340.618	3945.931
320	2893.728	2984.640	3380.309	3377.049	4008.546
328	2897.134	2997.163	3399.171	3411.173	4068.496
336	2900.083	3008.490	3416.370	3443.110	4125.844
344	2902.636	3018.731	3432.045	3472.980	4180.658
352	2904.845	3027.987	3446.326	3500.899	4233.010
360	2906.758	3036.350	3459.331	3526.977	4282.973
368	2908.413	3043.904	3471.170	3551.323	4330.623
376	2909.846	3050.726	3481.943	3574.040	4376.039
384	2911.085	3056.884	3491.744	3595.226	4419.298
392	2912.158	3062.443	3500.657	3614.976	4460.478
400	2913.085	3067.460	3508.762	3633.379	4499.659
408	2913.888	3071.986	3516.129	3650.521	4536.919
416	2914.583	3076.070	3522.826	3666.483	4572.333
424	2915.183	3079.754	3528.910	3681.340	4605.979
432	2915.703	3083.076	3534.439	3695.165	4637.930
440	2916.153	3086.072	3539.461	3708.026	4668.261
448	2916.542	3088.774	3544.022	3719.987	4697.041
456	2916.878	3091.210	3548.164	3731.108	4724.341
464	2917.169	3093.406	3551.926	3741.446	4750.227
472	2917.421	3095.386	3555.341	3751.055	4774.766
480	2917.638	3097.171	3558.442	3759.983	4798.019
488	2917.827	3098.779	3561.257	3768.277	4820.049

496	2917.990	3100.229	3563.812	3775.982	4840.913
504	2918.130	3101.536	3566.132	3783.138	4860.669
512	2918.252	3102.714	3568.237	3789.782	4879.371
520	2918.358	3103.776	3570.147	3795.952	4897.071
528	2918.449	3104.732	3571.881	3801.680	4913.820
536	2918.528	3105.595	3573.454	3806.996	4929.664
544	2918.596	3106.371	3574.882	3811.931	4944.651
552	2918.655	3107.072	3576.177	3816.511	4958.824
560	2918.706	3107.702	3577.353	3820.761	4972.225
568	2918.750	3108.271	3578.419	3824.705	4984.894
576	2918.788	3108.783	3579.387	3828.364	4996.869
584	2918.821	3109.244	3580.265	3831.758	5008.187
592	2918.850	3109.660	3581.061	3834.908	5018.882
600	2918.875	3110.035	3581.784	3837.829	5028.987
608	2918.896	3110.372	3582.439	3840.539	5038.535
616	2918.914	3110.676	3583.034	3843.053	5047.553
624	2918.930	3110.950	3583.574	3845.384	5056.072
632	2918.944	3111.197	3584.063	3847.546	5064.117
640	2918.956	3111.420	3584.507	3849.552	5071.715
648	2918.966	3111.620	3584.910	3851.411	5078.889
656	2918.975	3111.801	3585.276	3853.136	5085.663
664	2918.983	3111.963	3585.607	3854.735	5092.059
672	2918.990	3112.110	3585.908	3856.218	5098.097
680	2918.996	3112.242	3586.181	3857.593	5103.797
688	2919.001	3112.361	3586.428	3858.868	5109.177
696	2919.005	3112.468	3586.652	3860.050	5114.255
704	2919.009	3112.565	3586.856	3861.147	5119.048
712	2919.012	3112.652	3587.041	3862.163	5123.571
720	2919.015	3112.730	3587.208	3863.105	5127.840
728	2919.017	3112.801	3587.360	3863.979	5131.868
736	2919.019	3112.864	3587.498	3864.789	5135.669
744	2919.021	3112.922	3587.623	3865.539	5139.256
752	2919.023	3112.973	3587.736	3866.236	5142.640

Anexo 2. Gráficos obtenidos

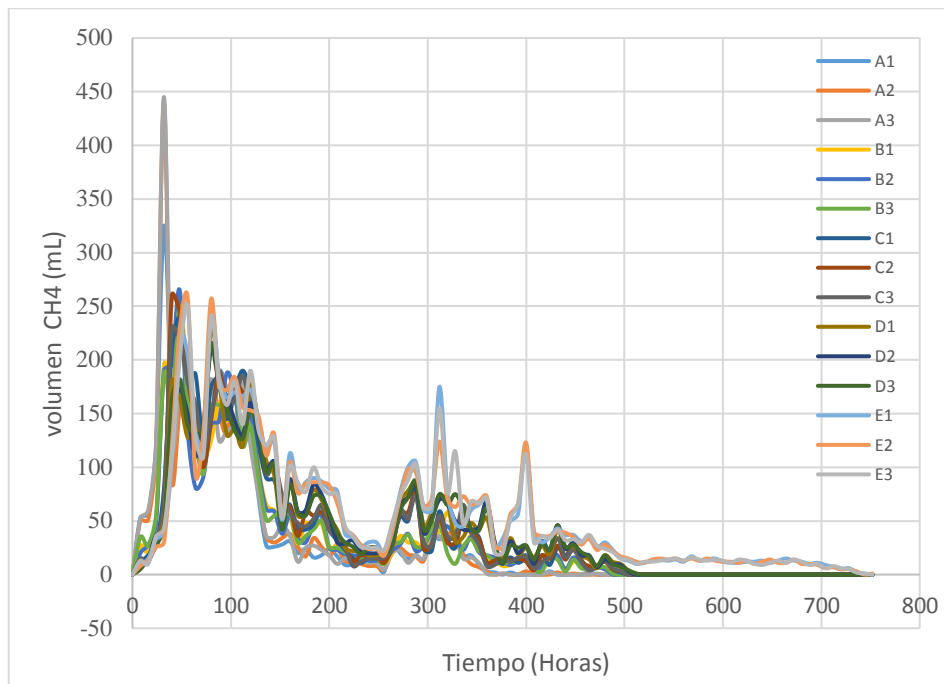


Figura 17. Producción de biogás por cada 8 horas

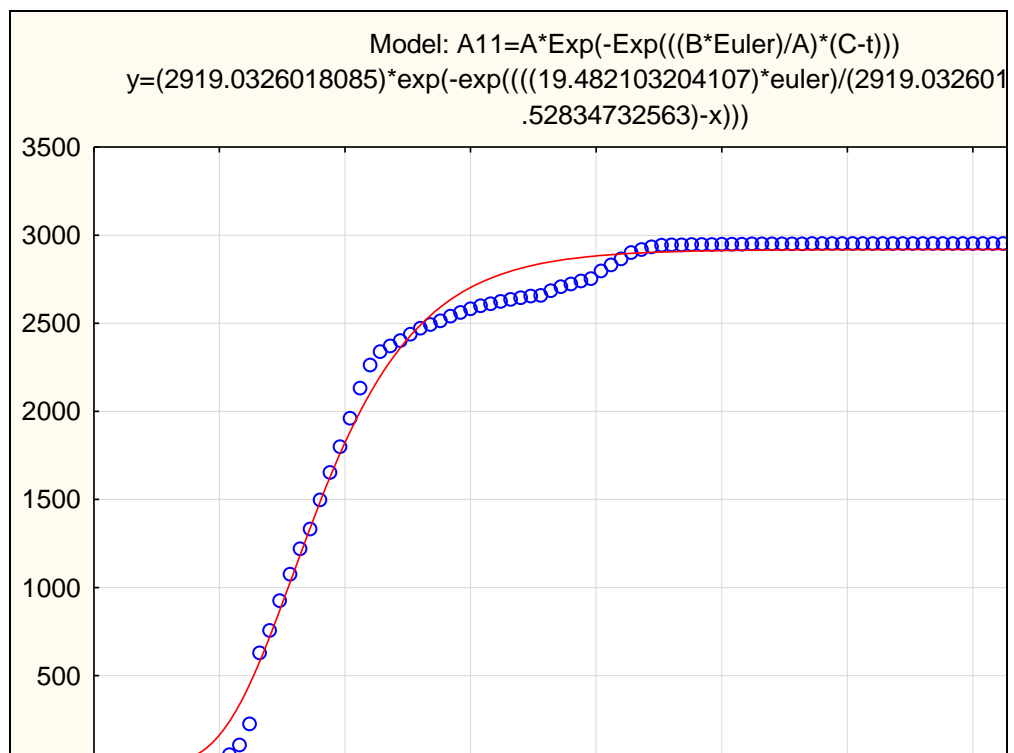


Figura 18. Curva de Gompertz modificado y volumen acumulado para tratamiento A

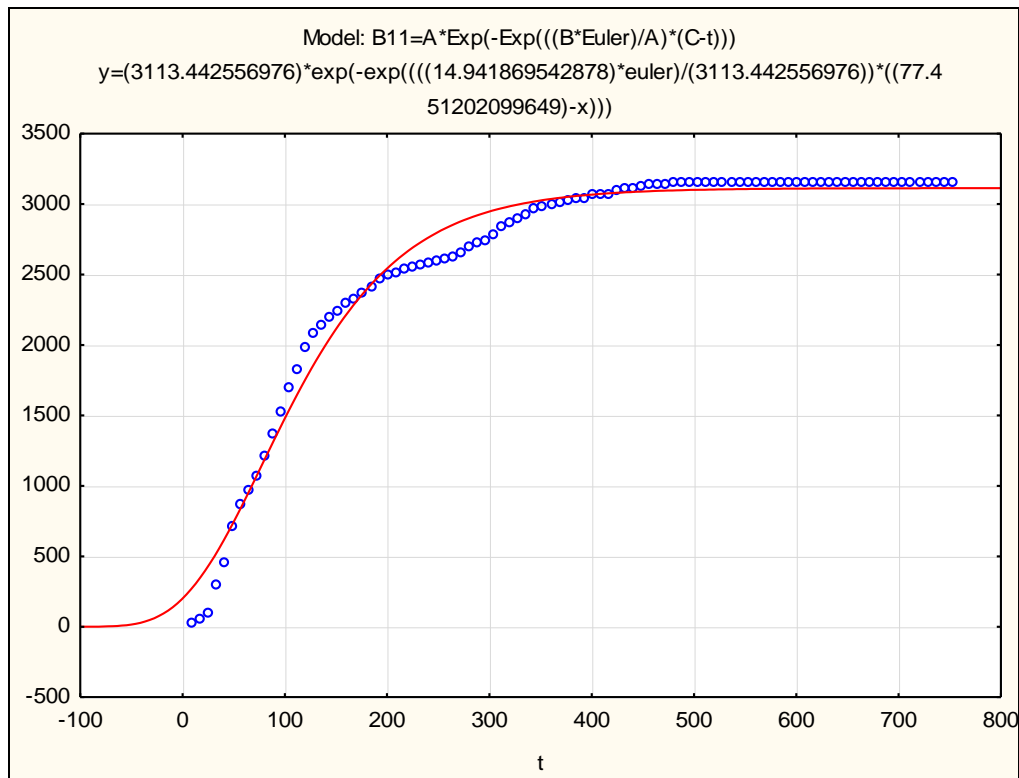


Figura 18. Curva de Gompertz modificado y volumen acumulado para tratamiento “B”

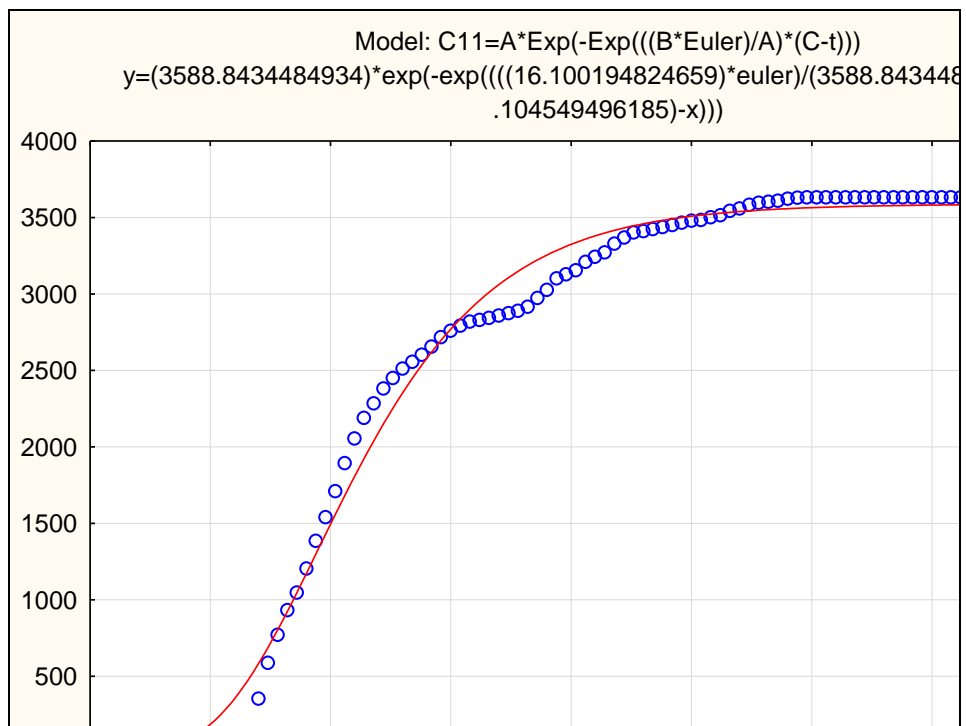


Figura 20. Curva de Gompertz modificado y volumen acumulado para tratamiento “C”

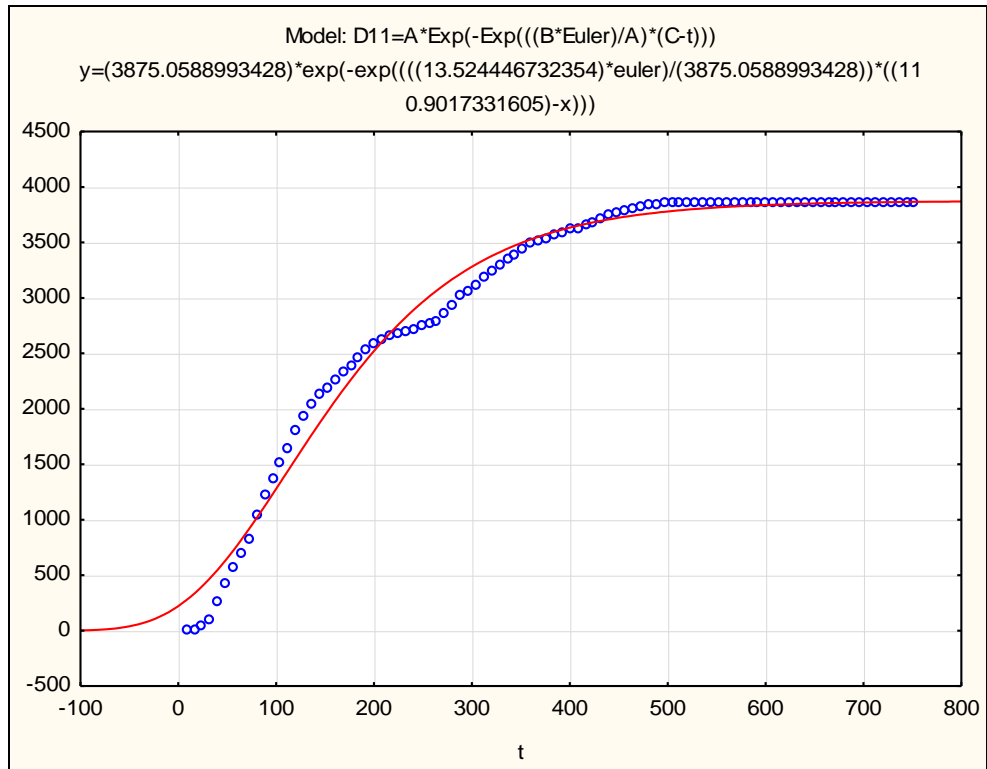


Figura 21. Curva de Gompertz modificado y volumen acumulado para tratamiento “D”

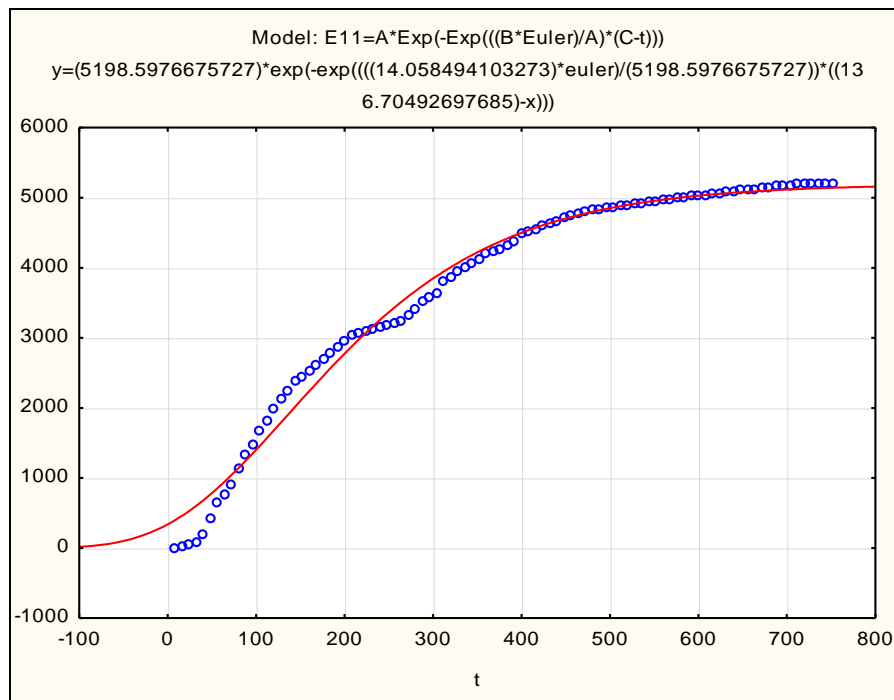


Figura 21. Curva de Gompertz modificado y volumen acumulado para tratamiento “D”

Anexo 3. Panel fotográfico**Figura 18.** Preparación y medición de parámetros físicos químicos de las muestras**Figura 19.** Medición del volumen desplazo en las repeticiones de los tratamientos



Figura 20. Determinación de la DQO



Figura 215. Medición de composición de biogás en las repeticiones de los tratamientos

Anexo 4. Certificado de calibración de los equipos.

HANNA instruments			
Electrode Quality Certificate			
Electrode: HI7609829-1	Parameter: pH/ORP	SN: L58267	Recommended for: HI9829
Description: pH/ORP sensor with screw type connector			
<p>Hanna Instruments certifies that this electrode has been produced, calibrated and tested to meet all applicable Hanna Instruments procedures, using standards and reference instruments, the accuracy of which is traceable to the National Institute of Standards (NIST) in the USA or to internationally acceptable national physical standards. The standards and reference instruments used in calibration and testing are supported by a calibration system which meets requirements of ISO 9001.</p>			
Standard Reference Materials:	pH:	185i, 186g, 191d [NIST]	
	ORP:	Certified ORP Standard Solution	
External/Internal reference devices*:	KΩ/MΩ:	SN#148047ADH [Megohmmeter]	
Tests performed using reference devices:			
mV pH (@ 25 °C):	Offset (7.01 pH) [mV]:	0.0	
	Tolerance [mV]:	± 10	
	Reading [mV]:	4.3	Passed
	Slope (4.01 pH) [mV]:	177.5	
	Tolerance [mV]:	170.4 - 177.5	
ORP (@ 25 °C):	Reading [mV]**:	176.5	Passed
	Standard value [mV]***:	234	
mV pH response time (4.01 pH → 7.01 pH)****:	Tolerance [mV]:	± 10	
	Reading [mV]:	235	Passed
	Standard time [s]:	< 1	Passed
Glass impedance (@ 25 °C):	Tolerance [s]:	+ 1	
Reference impedance (@ 25 °C):	Tolerance [MΩ]:	50 - 150	Passed
	Maximum value [KΩ]:	10	Passed
<p>* All references are periodically checked and are used only if are inside certification interval; NP = not performed. ** Offset compensated. *** Value taken from certificate. **** Evaluated for 90% of step.</p>			
Quality control and testing criteria have been met.			
Date: 2022.02.09	QC Inspector: Coman Andrei / Engineer <small>(Name / Title of Signatory)</small>		
	Signature: 		
EQC_HI7609829-1_rev.01_April 2019			
Hanna Instruments Inc. 5B4 Park East Drive Woonsocket, RI 02895 www.hannainst.com			

Figura 22. Certificado de calibración para pH.

HANNA instruments			
Electrode Quality Certificate			
Electrode:	Parameter:	SN:	Recommended for:
HI7609829-1	pH/ORP	L58267	HI9829
Description: pH/ORP sensor with screw type connector			
<p>Hanna Instruments certifies that this electrode has been produced, calibrated and tested to meet all applicable Hanna Instruments procedures, using standards and reference instruments, the accuracy of which is traceable to the National Institute of Standards (NIST) in the USA or to internationally acceptable national physical standards. The standards and reference instruments used in calibration and testing are supported by a calibration system which meets requirements of ISO 9001.</p>			
Standard Reference Materials:	pH:	185i, 186g, 191d [NIST]	
	ORP:	Certified ORP Standard Solution	
External/Internal reference devices*:	KΩ/MΩ:	SN#148047ADH [Megohmmeter]	
Tests performed using reference devices:			
mV pH (@ 25 °C):	Offset (7.01 pH) [mV]:	0.0	
	Tolerance [mV]:	± 10	
	Reading [mV]:	4.3	Passed
	Slope (4.01 pH) [mV]:	177.5	
	Tolerance [mV]:	170.4 - 177.5	
ORP (@ 25 °C):	Reading [mV]**:	176.5	Passed
	Standard value [mV]***:	234	
mV pH response time (4.01 pH → 7.01 pH)****:	Tolerance [mV]:	± 10	
	Reading [mV]:	235	Passed
Glass impedance (@ 25 °C):	Standard time [s]:	< 1	Passed
	Tolerance [s]:	+ 1	
Reference impedance (@ 25 °C):	Glass impedance [MΩ]:	50 - 150	Passed
	Maximum value [KΩ]:	10	Passed
<p>*) All references are periodically checked and are used only if are inside certification interval; NP = not performed. **) Offset compensated. ***) Value taken from certificate. ****) Evaluated for 90% of step.</p>			
Quality control and testing criteria have been met.			
Date:	2022.02.09	QC Inspector:	Coman Andrei / Engineer
			(Name / Title of Signatory)
		Signature:	
EQC_HI7609829-1_rev03_April 2019			
Hanna Instruments Inc. 584 Park East Drive Woonsocket, RI 02895 www.hannainst.com			

Figura 23. Certificado de calibración para conductividad eléctrica.

Hanna Instruments

Instrument Quality Certificate

Instrument: HI83314 SN: ACD0730070 Software version: 1.18

Description: Wastewater Treatment Photometer

Hanna Instruments certifies that this instrument has been produced, calibrated and tested to meet all applicable Hanna procedures, using standards and reference instruments, the accuracy of which is traceable to the National Institute of Standards (NIST) in the USA or to internationally acceptable national physical standards. The standards and reference instruments used in calibration and testing are supported by a calibration system which meets requirements of ISO9001. The following tests have been performed according with the reference from the QC Procedure of the meter.

The results are listed below.

A. Functionality tests	Reference	Result
A.1. Switch ON/OFF test	8.3.1	PASSED
A.2. Battery charging test	8.3.1	PASSED
A.3. Sound test	8.3.2	PASSED
A.4. Real time clock test	8.3.2	PASSED
A.5. USB port test	8.3.3	PASSED
A.6. Keyboard test	8.3.2	PASSED
A.7. Optical System test	8.4	PASSED
A.8. Connectivity to digital probe	8.3.4	PASSED
A.9. pH/T measurement test	8.3.4	PASSED

B. Factory Calibration Test	Reference	Result
B.1. 610 nm	8.5	PASSED
B.2. 575 nm	8.5	PASSED
B.3. 525 nm	8.5	PASSED
B.4. 466 nm	8.5	PASSED
B.5. 420 nm	8.5	PASSED

C. Aesthetic Control	Reference	Result
C.1. Instrument Aesthetic check	8.1	PASSED
C.2. Packing, Certificates, Labeling and Marking	8.2	PASSED

Date: 2022-09-17 Inspector: Cseke Ervin /Engineer
(Name / Title of Signatory)

Signature: 

QC_HI83314_rev.0.1. page 1 of 1

Hanna Instruments Inc. 584 Park East Drive Woonsocket, RI 02895
www.hannainst.com

Figura 24. Certificado de calibración de fotómetro y reactivo DQO alto rango.

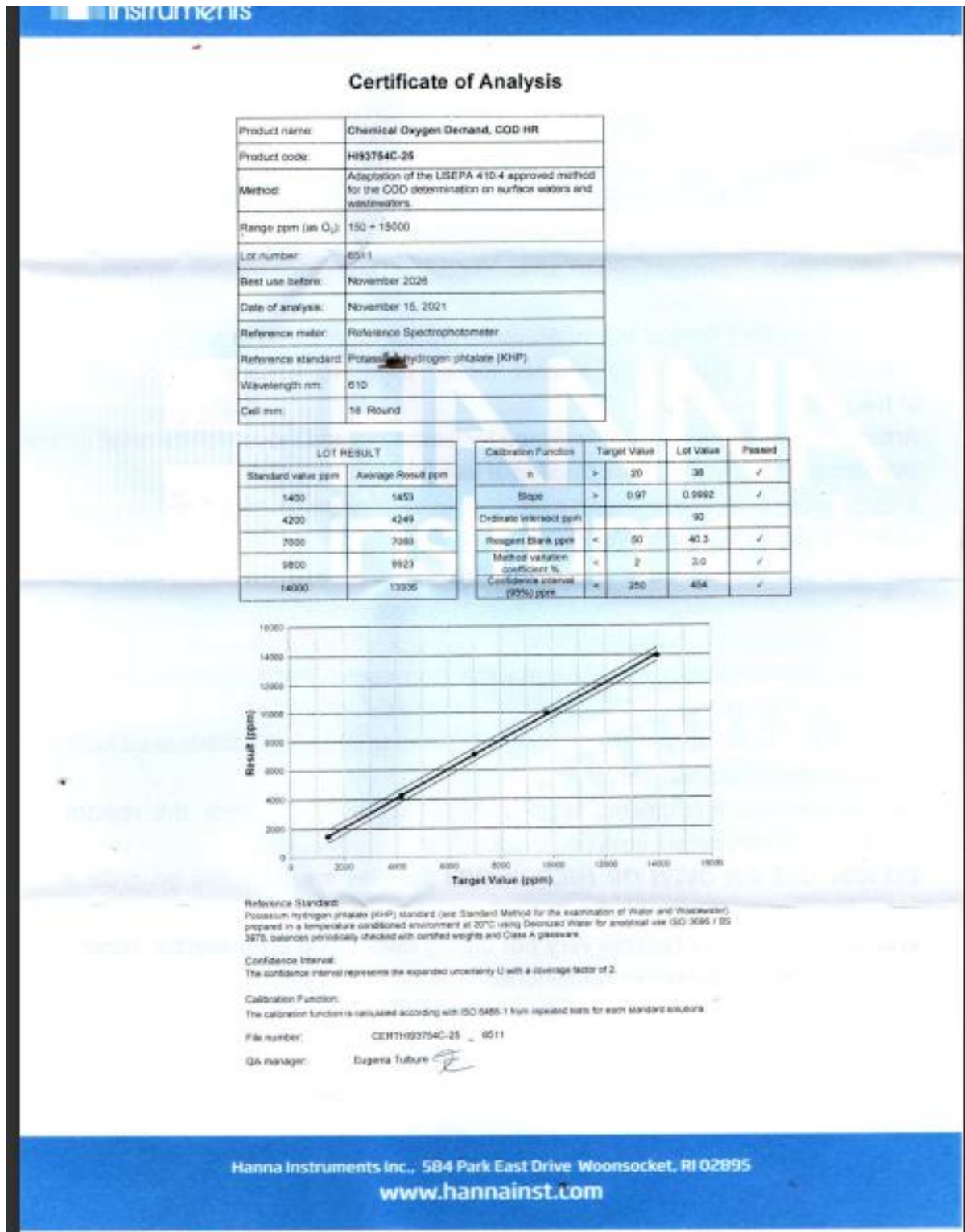


Figura 25. Certificado de calibración de reactivo DQO alto rango.

Anexo 5. Certificado de calibración de multiparámetro HANNA HI9829

	FO-TM-12 Página 1 de 3 LABORATORIO DE CALIBRACIÓN NTP ISO/IEC 17025:2017
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN	
Laboratorio de química	Q22-409-1
Fecha de Emisión: 2022-10-13	Orden de Servicio: 0409-00 Expediente: 0196/1813
1. INFORMACIÓN DEL CLIENTE	
Solicitante :	SERVICIOS AGRARIOS DE PUCALLPA S.A.C.
Dirección:	Jr. San Martín Nro. 200 Int. 501 A.H. Las Palmeras, Calleria, Coronel Portillo, Ucayali
2. INSTRUMENTO : MULTIPARÁMETRO	
Marca :	HANNA
Modelo :	HI9829
Serie :	07060021101
Identificación :	SIM2022706
Intervalo de Indicación :	0 pH a 14 pH; 0 mS/cm a 200 mS/cm; 0 %OD a 500 %OD
Resolución :	0,01 pH; 1 µS/cm a 1 mS/cm ; 0,1 %OD
Elemento sensor :	ELECTRODO
Tipo :	Digital
Procedencia :	ROMANIA
3. LUGAR DE Y FECHA DE CALIBRACIÓN	
Fecha de Calibración :	2022-10-12
Ubicación :	Laboratorio de Química de SIMSAC.
Dirección :	Jr. Santa María N° 339; Urb. Palao, San Martín de Porres, Lima
	<p>Los resultados presentados en este certificado de calibración son válidos solamente para este instrumento en las condiciones que es realizada la calibración, Servicios Industriales y Metrológicos S.A.C. (SIMSAC) no se responsabiliza del uso inadecuado del instrumento.</p> <p>SIMSAC no es responsable de la inadecuada interpretación de los resultados presentados en este certificado de calibración.</p> <p>El presente certificado de calibración carece de validez sin las firmas y sellos de SIMSAC.</p> <p>Los resultados presentados en este certificado de calibración son trazables a patrones nacionales o internacionales de acuerdo al sistema internacional de medida (SI).</p>
	 <hr/> Alan Araujo Campos Responsable de Laboratorio SIMSAC




Versión 01
 Enero -2020

Dirección: Jr. Santa María N° 339; Urb. Palao, San Martín de Porres, Lima
 ☎ 969 154 345 991 367 244 / 953 529 845 / 991 172 177
 ✉ ventas@simsacperu.com / www.simsacperu.com

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Laboratorio de química

Q22-409-1

4. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

Calibrado por el método de comparación según el PC-020 Procedimiento de Calibración Medidores de pH, primera edición 2010; PC-022 Procedimiento de Calibración de conductímetros y por el método de comparación directa con soluciones de referencia para el parámetro de oxígeno disuelto.

5. TRAZABILIDAD

INSTRUMENTO	CERTIFICADO	IDENTIFICACIÓN
Solución estándar de 4,01 pH	3156	HI 7004
Solución estándar de 7,01 pH	3812	HI 7007
Solución estándar de 10,01 pH	4581	HI 7010
Termómetro Digital	1AT-2758-2022	EC-06
Solución estándar de 84 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$	4621	HI 7033
Solución estándar de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$	5288	HI 7031
Solución estándar de 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$	3254	HI 7030

6. OBSERVACIONES

Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación CALIBRADO.
 Se le asignó un código de identificación al equipo.

7. INCERTIDUMBRE

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre de medición", Segunda edición, Julio 2001.

SIMSAC



Versión 01
 Enero -2020

Dirección: Jr. Santa María N° 339; Urb. Palao, San Martín de Porres, Lima
 ☎ 969 154 345 991 367 244 / 953 529 845 / 991 172 177
 ✉ ventas@simsacperu.com / www.simsacperu.com

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Laboratorio de química

Q22-409-1

8. RESULTADOS

	Inicial	Final
Temperatura (°C)	19,4	19,5
Humedad Relativa (%H.R.)	69,5	69,5

SOLUCIÓN PATRÓN: 4,01 pH

Valor de referencia (pH)	Lectura del Equipo (pH)	Error (pH)	Incertidumbre (pH)
4,01	3,99	-0,02	0,01

SOLUCIÓN PATRÓN: 7,01 pH

Valor de referencia (pH)	Lectura del Equipo (pH)	Error (pH)	Incertidumbre (pH)
7,01	6,99	-0,02	0,01

SOLUCIÓN PATRÓN: 10,01 pH

Valor de referencia (pH)	Lectura del Equipo (pH)	Error (pH)	Incertidumbre (pH)
10,02	9,99	-0,03	0,01

SOLUCIÓN PATRÓN: 84 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$

Valor de referencia $\mu\text{S}/\text{cm}^2$	Lectura del Equipo $\mu\text{S}/\text{cm}^2$	Error $\mu\text{S}/\text{cm}^2$	Incertidumbre $\mu\text{S}/\text{cm}^2$
84,0	83,0	-1,0	0,1

SOLUCIÓN PATRÓN: 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$

Valor de referencia $\mu\text{S}/\text{cm}^2$	Lectura del Equipo $\mu\text{S}/\text{cm}^2$	Error $\mu\text{S}/\text{cm}^2$	Incertidumbre $\mu\text{S}/\text{cm}^2$
1411,3	1 412,0	0,7	0,1

SOLUCIÓN PATRÓN: 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$

Valor de referencia mS/cm^2	Lectura del Equipo mS/cm^2	Error mS/cm^2	Incertidumbre mS/cm^2
12,87	12,87	0,00	0,01

SOLUCIÓN PATRÓN 0 % OD

Indicación del equipo	Indicación del patrón	Error	Incertidumbre
% OD	% OD	% OD	% OD
0,0	0,0	0,0	0,08
100,0	100,0	0,0	0,08

Fin del Documento

Dirección: Jr. Santa María N° 339; Urb. Palao, San Martín de Porres, Lima
 ☎ 969 154 345 991 367 244 / 953 529 845 / 991 172 177
 ✉ ventas@simsacperu.com / www.simsacperu.com

SIMSAC



Versión 01
 Enero -2020