



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A BASE DE EFLUENTE DEL

PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA AFRICANA

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO

INGENIERO EN ENERGÍA

PRESENTADO POR:

21841099 GABRIEL FERNANDO MONCADA CARACCIOLI

ASESOR METODOLÓGICO: ING. ALICIA REYES DUKE

CAMPUS SAN PEDRO SULA; OCTUBRE, 2022

Dedicatoria

Primeramente, a Dios que es mi apoyo y mi guía en la vida, gracias a él todo ha sido posible y toda oportunidad que ha llegado a mi vida se la debo a él.

A mis padres Deyanira Caraccioli Cáceres y Fernando Moncada Mejía, que fueron mis pilares en la vida y en mi carrera universitaria. Gracias por su apoyo y amor incondicional, el cual fue el combustible para lograr cada meta y sueño que he cumplido hasta hoy en día. Por sus esfuerzos y trasnoches para darme siempre lo mejor de ellos y enseñarme a dar lo mejor de mí para los demás.

A mi hermana que me ha cuidado y apoyado desde el primer día y a mi hermano que me ha enseñado y alentado en mi carrera universitaria.

A mis tíos, tías, primos y primas por siempre apoyarme en cada acción que realizaba en la vida, por siempre dar lo mejor de ellos para crear un vínculo familiar que me impulsó a dar todo por cada uno de ellos.

A mis compañeros y amigos, por cada recuerdo y momento, por el apoyo y las enseñanzas que me proporcionaron que me han mejorado como persona y profesional.

A Max, mi perro, por acompañarme, apoyarme, animarme y por seguirme cuidando ahora desde el cielo.

A mis hermanos que no son de sangre, pero la vida me los regaló: Rodrigo, Christopher, William, Iván, Luis Carlos, Ricardo, Daniel y José Arturo por cada memoria vivida, por el apoyo incondicional, por guiarme en cada momento de mi vida y siempre darme una mano cuando más lo necesitaba.

Dedicado a cada uno de ustedes que me han hecho lo que soy y regalado una parte de ustedes en valores y enseñanzas que atesoro de por vida.

Gabriel F. Moncada Caraccioli

Agradecimiento

Primeramente, a Dios que me iluminó y me guio en cada momento de la presente investigación. Gracias por darme sabiduría, perseverancia y fuerzas para terminar esta etapa educativa de mi vida.

A mi asesora metodológica, Ing. Alicia María Reyes Duke, quien me guio desde el primer día para siempre mejorar como profesional y superarme a mí mismo en cada momento de esta investigación.

A mi asesor temático, Ing. Allan Adrián Maradiaga, quien me apoyó desde el primer día y me guio con sus conocimientos y dedicación en cada etapa que se llevó a cabo en esta investigación. Sin él este proyecto de graduación no hubiera sido posible.

A los docentes de UNITEC de la carrera de ingeniería en energía, quienes me regalaron sus conocimientos y virtudes en las clases que impartían, creando un mejor profesional de mí persona.

A mis compañeros, William, Zahir y Christopher que me acompañaron durante todo este periodo de investigación, en el cual me apoyaron e impulsaron a dar todo de mí en esta investigación.

Epígrafe

*"El que no vive para servir,
no sirve para vivir"*

-Madre Teresa de Calcuta

RESUMEN EJECUTIVO

La agroindustria del aceite de palma africana es una de las mayores productoras de aceite y grasas vegetales a nivel mundial y al ser una industria desarrollada y grande, también las escalas de los procesos de producción aumentan. Los procesos de extracción de palma africana se centran en la limpieza del fruto de palma, su esterilización, digestión y prensado, clarificación y palmisteria. Ciertas etapas del proceso de extracción usan agua y vapor para realizar estos procesos, la cual es catalogado como un efluente del proceso. El efluente del proceso de aceite de palma se genera principalmente de 95% de aguas y lodos del proceso de extracción, pero también contienen sólidos suspendidos, aceite de palma, lípidos, ácidos grasos, grasas y residuos sólidos del fruto de palma. El efluente o POME del proceso de extracción de aceite de palma obtienen carga orgánica al ser parte del proceso de extracción, por lo que sus propiedades físicas y fisicoquímicas también son alteradas por la obtención de esta carga orgánica. La agroindustrial de palma debe tratar estos efluentes líquidos para poder reinyectarlos en los desagües, por lo que hoy en día utilizan lagunas de oxidación al aire libre para reducir la carga orgánica del POME. La carga orgánica del efluente hace posible teóricamente la implementación de un biodigestor, por lo que se implementó un biodigestor tipo batch para hacer prueba del sustrato. La finalidad de implementar un biodigestor es hacer el tratamiento de los efluentes y a la vez crear un producto de valor agregado el cual es, el biogás. El biogás es un combustible alternativo con la posibilidad de ser utilizado para generación de energía o autoconsumo en la planta extractora. Para realizar la implementación del biodigestor se dividió el proyecto en dos etapas, las etapas de parámetros fisicoquímicos y la etapa práctica del biodigestor. Para la etapa de parámetros fisicoquímicos se realizaron mediciones propias y mediciones en un laboratorio industrial sobre el efluente a utilizar en el biodigestor a implementar. Se realizaron mediciones de pH, demanda química y bioquímica de oxígeno y sólidos en el efluente. Se obtuvieron rangos de pH, entre 4.60 – 4.90, resultados de DQO y DBO de 102,000 [mg/L] y 35,000 [mg/L] respectivamente. Las mediciones de parámetros fisicoquímicos demuestran que el efluente contiene una alta carga orgánica que se puede aprovechar en un biodigestor. Para tratar el efluente y producir biogás se utilizó un proceso bioquímico llamado, digestión anaeróbica, en el que se centra en la digestión y descomposición de la materia orgánica al utilizar un ambiente sin oxígeno para obligar a las bacterias a

descomponer compuestos para la finalidad de producir metano y dióxido de carbono, también conocido como biogás.

La implementación del biodigestor dio como resultado biogás, se produjo biogás por 4 semanas y luego se realizaron pruebas de combustión del biogás producido. Al combustionar se concluyó que el sustrato es apto para la producción de biogás y puede ser útil para la agroindustria de palma implementar biodigestores para tratar sus efluentes y generar un combustible alternativo para el autoconsumo de la planta. La implementación del sistema del biodigestor genera una economía circular en la planta extractora, debido a que se reutilizan los efluentes del proceso de extracción de aceite, se reduce la carga orgánica de este POME y se cumple con la responsabilidad ambiental de la agroindustria, se produce un combustible alternativo para autoconsumo de la planta y el subproducto de la digestión anaeróbica son lodos digeridos y abono orgánico que pueden ser utilizados para la cosecha de las palmas africanas.

Palabras clave: Efluente, biodigestor, POME, digestión anaeróbica, DQO, DBO, biogás, combustión, economía circular

ABSTRACT

The African palm oil agro-industry is one of the largest producers of vegetable oils and fats in the world and being a large and developed industry, the scales of the production processes are also increasing. The African palm extraction processes focus on cleaning the palm fruit, sterilization, digestion and pressing, clarification and palmistering. Certain stages of the extraction process use water and steam to carry out these processes, which is categorized as a process effluent. The effluent from the palm oil process is mainly generated from 95% of the water and sludge from the extraction process, but it also contains suspended solids, palm oil, lipids, fatty acids, fats, and solid residues from the palm fruit. The effluent or POME from the palm oil extraction process obtains organic load as part of the extraction process, so its physical and physicochemical properties are also altered by this organic load. The palm agroindustry must treat these liquid effluents to be able to reinject them into the drains, so nowadays they use open-air oxidation lagoons to reduce the organic load of the POME. The organic load of the effluent makes it theoretically possible to implement a biodigester, so a batch type biodigester was implemented to test the substrate. The purpose of implementing a biodigester is to treat effluents and at the same time create a value-added product, which is biogas. Biogas is an alternative fuel with the possibility of being used for energy generation or self-consumption in the extraction plant. To implement the biodigester, the project was divided into two stages, the physicochemical parameters stage and the practical stage of the biodigester. For the physicochemical parameters stage, the effluent to be used in the biodigester to be implemented was self-measured and measured in an industrial laboratory. Measurements were made of pH, chemical and biochemical oxygen demand, and solids in the effluent. pH ranges between 4.60 - 4.90, COD and BOD results of 102,000 [mg/L] and 35,000 [mg/L], respectively, were obtained. The physicochemical parameter measurements show that the effluent contains a high organic load that can be used in a biodigester. A biochemical process called anaerobic digestion was used to treat the effluent and produce biogas, this process focuses on the digestion and decomposition of organic matter by using an oxygen-free environment to force bacteria to break down compounds to produce methane and carbon dioxide, also known as biogas.

The implementation of the biodigester resulted in biogas, biogas was produced for 4 weeks and then combustion tests of the biogas produced were carried out. Upon combustion, it was concluded that the substrate is suitable for biogas production and that it could be useful for the palm agroindustry to implement biodigesters to treat its effluents and generate an alternative fuel for the plant's own consumption. The implementation of the biodigester system generates a circular economy in the extraction plant because the effluents from the oil extraction process are reused, the organic load of this POME is reduced and the environmental responsibility of the agroindustry is fulfilled, an alternative fuel is produced for the plant's own consumption and the byproduct of the anaerobic digestion is digested sludge and organic fertilizer that can be used for the growing of African palms.

Key words: Effluent, biodigester, POME, anaerobic digestion, DQO, DBO, biogas, combustion

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	20
II.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
2.1	PRECEDENTES DEL PROBLEMA	22
2.2	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	25
2.3	JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	27
2.4	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	29
2.5	OBJETIVOS	29
2.5.1	Objetivo general	29
2.5.2	Objetivos específicos	29
III.	MARCO TEÓRICO	30
3.1	ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL	30
3.1.1	ANÁLISIS DEL MACRO-ENTORNO	30
3.1.1.1	ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE ACEITE DE PALMA A NIVEL MUNDIAL	30
3.1.1.2	ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN ACEITE DE PALMA EN ASIA	31
3.1.1.2.1	INDONESIA	31
3.1.1.2.2	MALASIA	32
3.1.2	ANÁLISIS DEL MICRO ENTORNO	32
3.1.2.1	ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN DE ACEITE DE PALMA EN LATINOAMÉRICA	32
3.1.2.2	COLOMBIA	33
3.1.2.3	GUATEMALA	34
3.1.2.4	HONDURAS	34
3.2	DESCRIPCIÓN DEL ACEITE DE PALMA AFRICANA	36
3.3	PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA AFRICANA	36
3.2.1	RECEPCIÓN DE FRUTOS DE LA PALMA AFRICANA	36
3.2.2	ESTERILIZACIÓN	36
3.2.3	DESFRUTADO	37
3.1	DIGESTIÓN	37
3.2.5	PRENSADO	37
3.2.6	CLARIFICACIÓN	37

3.3	EFLUENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA	38
3.4	BIODIGESTORES	39
3.4.1	TIPOS DE BIODIGESTORES	39
a.	Biodigestor Tipo Batch	39
b.	Biodigestores tipo globo	40
c.	Biodigestores de domo fijo	41
d.	Biodigestor de tambor flotante	41
3.5	DIGESTIÓN ANAERÓBICA	42
3.5.1	HIDRÓLISIS	42
3.5.2	ACIDOGENESIS	43
3.5.3	ACETOGENESIS	43
3.5.4	METANOGÉNESIS	43
3.6	BIOGÁS	44
3.6.2	PARÁMETROS AMBIENTALES Y DE CONTROL DEL BIOGÁS	45
3.6.2.1	TEMPERATURA	45
3.6.2.2	pH y alcalinidad	45
3.6.3	APLICACIONES DEL BIOGÁS	46
3.6.4	COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS	46
IV.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	47
4.1	ENFOQUE	47
4.2	VARIABLES DE INVESTIGACIÓN	47
4.2.1	VARIABLE DEPENDIENTE	47
4.2.2	VARIABLE INDEPENDIENTE	47
4.2.2.1	TEMPERATURA AMBIENTE	48
4.2.2.2	AGITACIÓN DE LA MEZCLA	48
4.1	HIPÓTESIS	49
4.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS	49
4.4.1	TÉCNICAS	49
4.4.1.1	OBSERVACIÓN	50
4.4.1.2	RECOLECCIÓN DE DATOS	50
4.4.1.3	REVISIÓN DE LITERATURA	50

4.4.2	INSTRUMENTOS	50
4.4.2.1	<i>Microsoft Excel</i>	50
4.4.2.2	<i>Biodigestor Pro</i>	50
4.4.2.3	<i>Microsoft Visio</i>	50
4.5	Metodología de validación	51
4.5.1	ETAPA 1: RECOLECCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS	52
4.5.2	ETAPA 2: OBTENCIÓN DE POME.....	53
4.5.3	ETAPA 3: OBTENCIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL POME	54
4.5.3.1	DETERMINACIÓN DE VALOR DE PH	54
4.5.3.2	DETERMINACIÓN DE DQO Y DBO	54
4.5.3.3	DETERMINACIÓN DE LA MASA ORGÁNICA SECA	54
4.5.4	ETAPA 4: ELABORACIÓN DE BIODIGESTOR A ESCALA	54
4.5.4.1	RECIPIENTE DEL BIODIGESTOR	55
4.5.4.2	ELABORACIÓN DE SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE BIOGÁS	55
4.5.4.3	SELLAMIENTO DEL BIODIGESTOR	56
4.5.5	ETAPA 5: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A BASE DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA	57
4.5.6	ETAPA 6: ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA.....	57
4.6	Cronograma de actividades	58
V.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	59
5.1	RECOLECCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS.....	59
5.2	OBTENCIÓN DE POME	60
5.2.1	VISITAS TÉCNICAS	60
5.2.2	Recolección de POME	64
5.3	OBTENCIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL POME.....	67
5.3.1	MEDICIÓN DE PH	67
5.3.2	MEDICIÓN DE DQO Y DBO	68
5.3.3	MEDICIÓN DE MASA SECA	69
5.3.3	MEDICIONES DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN LABORATORIO AGROINDUSTRIAL	70
5.4	ELABORACIÓN DE BIODIGESTOR A ESCALA.....	70
5.5	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	72
5.5.1	PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	73

5.5.2	MEDICIÓN DE BIOGÁS	74
5.5.3	Método de desplazamiento de agua.....	74
5.5.4	RESULTADOS DE MEDICIONES DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	75
5.6	ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA	81
VI.	CONCLUSIONES	84
VII.	RECOMENDACIONES	85
VIII.	APLICABILIDAD	86
IX.	BIBLIOGRAFÍA	87
X.	Anexos	94

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Gráfico comparativo Promedio mundial VS datos en Honduras.....	24
Ilustración 2 Diagrama de economía circular en planta extractora de ACP.....	26
Ilustración 3 Potencial teórico energético del biogás por m3 de efluente.....	26
Ilustración 4 Porcentajes de aprovechamiento del proceso de extracción de aceite.....	27
Ilustración 5 Subproductos de la palma africana.....	28
Ilustración 6 Países productores de aceite de palma.....	30
Ilustración 7 Principales productores de ACP y su aportación a la producción mundial.....	31
Ilustración 8 Estadísticas de aceite de palma en Colombia.....	33
Ilustración 9 Datos de producción de ACP en Honduras.....	35
Ilustración 10 Zonas productoras de Aceite de palma en Honduras.....	35
Ilustración 11 Proceso de extracción de aceite de palma.....	38
Ilustración 12 Biodigestores tipo batch.....	40
Ilustración 13 Biodigestor tipo globo.....	40
Ilustración 14 Esquema de biodigestor de domo fijo.....	41
Ilustración 15 Biodigestor de tambor flotante.....	42
Ilustración 16 Proceso de la digestión anaeróbica.....	44
Ilustración 17 Temperatura como variable independiente.....	48
Ilustración 18 Agitación como variable independiente.....	49
Ilustración 19 Metodología de validación.....	51
Ilustración 20 Temperatura máxima y mínima en San Pedro Sula.....	52
Ilustración 21 Precipitación en 2021 en San Pedro Sula.....	53
Ilustración 22 Mapa de humedad en San Pedro Sula.....	53
Ilustración 23 Garrafón de agua de 18 litros.....	55
Ilustración 24 Válvula de bola con accesorios de conducción de aire.....	55
Ilustración 25 Sistema de conducción de biogás.....	56
Ilustración 26 Sellamiento de biodigestor.....	57
Ilustración 27 Medición de temperatura ambiente durante el experimento.....	59
Ilustración 28 Visita Técnica en planta Extractora de ACP en Honduras.....	60

Ilustración 29 Banda transportadora a etapa de digestión.....	61
Ilustración 30 Etapa de digestión y Clarificación en planta ACP en Honduras	62
Ilustración 31 Sistema de conducción de efluente en planta de ACP en Honduras	63
Ilustración 32 Obtención de POME sin digerir en planta de ACP en Honduras	64
Ilustración 33 Vertimiento de POME sin digerir en compartimiento para biodigestor.....	65
Ilustración 34 Obtención de POME previamente digerido	66
Ilustración 35 Vertimiento de POME digerido en compartimiento para biodigestor.....	66
Ilustración 36 Medición de pH de POME.....	67
Ilustración 37 Mediciones de DQO Y DBO en 100:1, 150:1 y 200:1	68
Ilustración 38 Medición de masa seca	69
Ilustración 39 Vertimiento en segundo garrafón.....	71
Ilustración 40 Elaboración de biodigestor.....	72
Ilustración 41 Evidencia de etapa de hidrólisis en biodigestor	73
Ilustración 42 Método de desplazamiento de agua.....	74
Ilustración 43 Medición de producción de biogás.....	75
Ilustración 44 Resultados de producción de biogás.....	76
Ilustración 45 Resultados de agitación en producción de biogás.....	77
Ilustración 46 Datos de volumen para el biodigestor en software Biodigestor Pro.....	77
Ilustración 47 Dimensionamiento de biodigestor en software Biodigestor Pro	78
Ilustración 48 Datos geométricos y de implantación en software Biodigestor Pro.....	78
Ilustración 49 Diseño de planta de biogás en software Biodigestor Pro.....	79
Ilustración 50 Corte lateral de diseño en software Biodigestor Pro	79
Ilustración 51 Sistema de captación de biogás en software Biodigestor Pro.....	80
Figure 52 Datos de producción de biogás en software Biodigestor Pro.....	80
Ilustración 53 Sistema de almacenamiento de biogás en semana 3 del proyecto.....	81
Ilustración 54 Sistema de almacenamiento de biogás en semana 6 del proyecto.....	82
Ilustración 55 Prueba de combustión de biogás	83
Ilustración 56 Potencial energético de biogás producido en biodigestor prototipo.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros fisicoquímicos del POME.....	23
Tabla 2 Valores permisibles en aguas residuales en Honduras.....	24
Tabla 3 Concentración máxima en aguas residuales en Honduras	25
Tabla 4 Rangos óptimos de pH para la digestión anaeróbica.....	45
Tabla 5 Composición del biogás.....	46
Tabla 6 Resultado de medición de pH.....	67
Tabla 7 Resultados de medición de DQO.....	68
Tabla 8 Resultados de medición de DBO.....	69
Tabla 9 Resultado de medición de masa seca	69
Tabla 10 Resultado de mediciones de parámetros fisicoquímicos en laboratorio agroindustrial	70
Tabla 11 Mezcla de biodigestor	71

LISTA DE SIGLAS

ACP Aceite crudo de palma

DBO Demanda bioquímica de oxígeno

DQO Demanda química de oxígeno

GLP Gas licuado del petróleo

pH *Potencial of Hydrogen*; Medida del grado de acidez

PIBA Producto interno bruto agrícola

POME *Palm Oil Mill Effluent*; Agua residual del proceso de extracción del aceite de palma

RSPO *Roundtable on Sustainable Palm Oil*; Principios de la Mesa Redonda de ACP

I. INTRODUCCIÓN

La extracción de palma africana es un proceso de la agroindustria para generar productos de valor agregado. La extracción conlleva etapas de pesado, ablandamiento de la fruta, desfrutamiento, prensado para la extracción y un proceso de limpieza del aceite para cumplir con normas de calidad a la hora de su venta.

El proceso de extracción abarca varias etapas en las cuales son necesarias el uso de agua, vapor y etapas en las cuales hay como resultantes lodos, grasas y aceite. Estos productos del proceso son conocidos por tres nombres: efluente, agua residual y con sus siglas en inglés, POME. El efluente o aguas residuales del proceso de extracción de aceite de palma africana obtienen carga orgánica por consecuencia de formar parte del proceso de extracción del aceite de palma.

Los efluentes al tener carga orgánica proveniente del proceso de extracción, son necesarios de tratarlos con métodos químicos o de oxidación. Estos tratamientos tienen el fin de reducir la carga orgánica que contienen estos efluentes y así poder ser inyectados al desagüe.

En la presente investigación experimental se dará la importancia de buscar alternativas de tratamiento a los desechos que se producen día a día en la empresa de producción de aceite de palma africana. El efluente del proceso de extracción de aceite de palma africana representa un desecho de agua para la agroindustria, el cual solo es tratado y reinyectado al desagüe sin darle un nuevo uso. El efluente del proceso de extracción de aceite de palma puede ser utilizado como sustrato para un proceso de descomposición, mediante un proceso de digestión anaeróbica para la producción de biogás.

El biogás es creado por un proceso de biodegradación de estas aguas residuales, al crear un biodigestor e ingresar el efluente en un ambiente anaeróbico para la creación del gas. Este gas es principalmente metano, por lo que si está bien elaborado puede ser utilizado para uso doméstico bajo una combustión o puede ser turbinado en una planta de vapor y con esto generar energía eléctrica para autoconsumo o inyección a la red eléctrica.

En el capítulo dos se encontrará el planteamiento del problema, donde se definirá la problemática de la investigación y la justificación del porque esta investigación es necesaria. En

el capítulo tres se encontrará el marco teórico, en el cual se analizará la situación actual de la agroindustria de palma africana desde un punto de vista general del macro entorno hasta llegar al micro entorno y un análisis de la agroindustria de palma africana en Honduras. Se hará mención a bases teóricas necesarias para comprender el proceso de extracción de aceite de palma, el proceso de digestión anaeróbica, los tipos de biodigestores y generalidades del biogás y como es formado.

En el capítulo cuatro se hará mención a la metodología de la investigación a realizar, los materiales, instrumentos y metodología de validación que se utilizará para llevar a cabo la investigación. En el capítulo cinco se analizará los procesos de construcción del biodigestor y los resultados a presentar por el análisis de las mediciones y observaciones realizadas a lo largo del proceso de producción de biogás. En el capítulo seis se presentarán las conclusiones propuestas por el investigador y sus recomendaciones sobre la investigación. En el capítulo siete se presentarán las recomendaciones dadas para llevar a cabo el experimento y para mejoras del mismo. En el capítulo ocho se presentará la aplicabilidad del proyecto, en la cual hará mención a la utilidad que tendrá el experimento a la hora de implementarse en una escala mayor.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente capítulo nos presenta el planteamiento del problema, etapa crucial para la investigación para el hallazgo de los precedentes del problema, una detallada definición del problema para un entendimiento de lo que se aspirará a solucionar y la justificación del problema para entender completamente por qué es importante resolver el problema planteado en la investigación.

2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA

El negocio de agroindustria de la palma africana ha crecido altamente entre los últimos años en Latinoamérica, en el cual se ha ido evidenciando por el alto crecimiento del área cultivada de palma africana en los territorios. Se evidencia que el área de cultivo ha pasado de 443,000 hectáreas en 2001 a 1, 111, 000 hectáreas sembradas en el año de 2014, las cuales representaban aproximadamente el 9% de la producción de palma mundial. (González-Cardenas, 2016)

La generación de efluentes es proporcional a la producción de aceite de palma que se extrae en el mundo, es por esto que, la agroindustria al tener un crecimiento en su producción de aceite de palma, también tiene un crecimiento en la generación de efluentes que necesitan ser tratados para no presentar un riesgo para la agroindustria y las personas aledañas a las plantas extractoras.

La agroindustria ha ido evolucionando con los tratamientos de efluentes producidos por la palma africana, debido a que es necesario el tratamiento de los mismos y el cumplimiento ambiental que estos conllevan. Se han implementado varios tratamientos de efluentes, así como: lagunas de oxidación, micro algas para descomposición, levadura alterada químicamente para la degradación del POME y procedimientos químicos. (Mohammad et al., 2021)

El proceso más común en el tratamiento de POME es el método de lagunas de oxidación, siendo el método utilizado para aproximadamente el 83% de los efluentes totales de la agroindustria mundial de palma africana. Esto debido a su diseño simple y su costo-eficiencia del proceso de tratamiento de efluentes. El proceso de lagunas de oxidación se basa en la retención del POME en un estanque para un proceso biológico y termodinámico al utilizar el POME a alta

temperatura y mezclarlo con POME que ya ha sido enfriado en una laguna de enfriamiento, esto para que con el cambio de temperaturas se realicen proceso acidogénicos y de hidrólisis.

El proceso de la extracción del aceite de palma africana conlleva la utilización de altas cantidades de agua para las diferentes etapas del proceso de extracción, que ha representado un reto para la agroindustria del aceite de palma africana por su tratamiento para ser reutilizado y su nivel de materia orgánica que contiene por su aportación al proceso de extracción. El efluente del proceso de extracción puede presentar un riesgo para la salud de las comunidades aledañas a la planta extractora de aceite de palma, ya que, estos efluentes líquidos por más que atraviesen un proceso de tratamiento de aguas, no se pueden eliminar en su totalidad su alta carga orgánica, sus niveles de pH, DBO, DQO y diferentes alteraciones en los rangos fisicoquímicos. A continuación, se presentan datos promedios de los niveles fisicoquímicos del efluente de una planta extractora de aceite de palma en Honduras.

Tabla 1 Parámetros fisicoquímicos del POME

Parámetros	Unidad	Promedio mundial	Datos Honduras
pH	-	4.2	4.7
DBO	mg/L	23,000	25,000
DQO	mg/L	51,000	50,000
Solidos totales	mg/L	40,000	48,000
Solidos suspendido	mg/L	18,000	18,700
Aceite y grasas	mg/L	-	3,800
Nitrógeno amoniacal	mg/L	35	39
Nitrógeno total	Mg/L	750	710

Fuente: Elaboración propia recuperada de (Iskandar et al., 2018) y empresa de ACP en Honduras

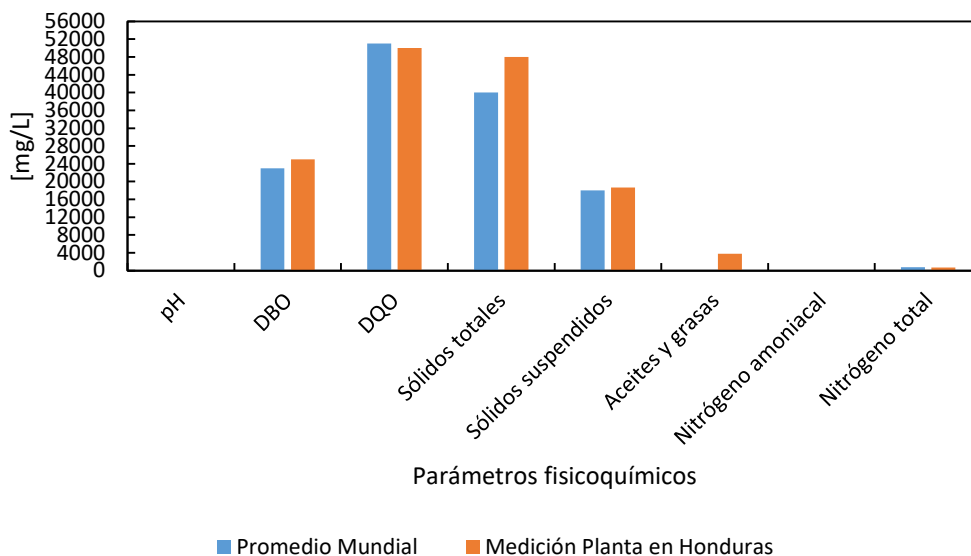


Ilustración 1 Gráfico comparativo Promedio mundial VS datos en Honduras

Fuente: Elaboración propia recuperada de (Iskandar et al., 2018) y empresa de ACP en Honduras

En Honduras existen leyes de control de aguas residuales para llevar un control del impacto ambiental realizado por estos efluentes. La norma técnica de las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores y alcantarillado sanitario hace énfasis en la concentración y valores permisibles permitidos en los parámetros químicos y propiedades físicas. A continuación, se presentan los parámetros permitidos y la concentración máxima permisible para las aguas residuales, tal norma es utilizada para regular la concentración de los efluentes de la extracción de aceite de palma africana.

Tabla 2 Valores permisibles en aguas residuales en Honduras

Parámetro	Valor permisible
Temperatura	<25.00 Grados Centígrados
Color	<200.00 uc
pH	6.00 – 9.000
Volumen descargado	<10% del caudal o volumen promedio del cuerpo receptor
Sólidos sedimentales	1.00 ml/L/h

Fuente: (Secretaría de Salud, 1997)

Tabla 3 Concentración máxima en aguas residuales en Honduras

Parámetro	Concentración máxima permisible
Sólidos suspendidos	100.00 mg/L
DBO	50 mg/L
DQO	200.00 mg/L
Grasas y aceites	10.00 mg/L
Nitrógeno total	30.00 mg/L
Nitrógeno Amoniacal	20.00 mg/L
Fósforo total	5.00 mg/L
Sulfatos	400.00 mg/L

Fuente: (Secretaría de Salud, 1997)

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La investigación se centrará en la evaluación de la factibilidad técnica de la creación de biogás a base del agua residual del proceso de extracción de palma africana. Esta agua residual se analizará para ser utilizada como el recurso energético primario para el proyecto de generación de biogás para así, encontrar un distinto uso para este efluente y a la vez crear una solución para las empresas agroindustriales de palma africana en el tema del tratamiento de estas aguas residuales. Estas aguas residuales conforman un reto para las empresas agroindustriales ya que su alto nivel de materia orgánica proveniente del proceso de extracción, genera que el tratamiento de estas aguas sea de varios procesos necesarios para que sea apta a la reinyección y si no son tratadas correctamente pueden atentar a la salud de las personas aledañas a la planta extractora si se llegan a reinyectar.

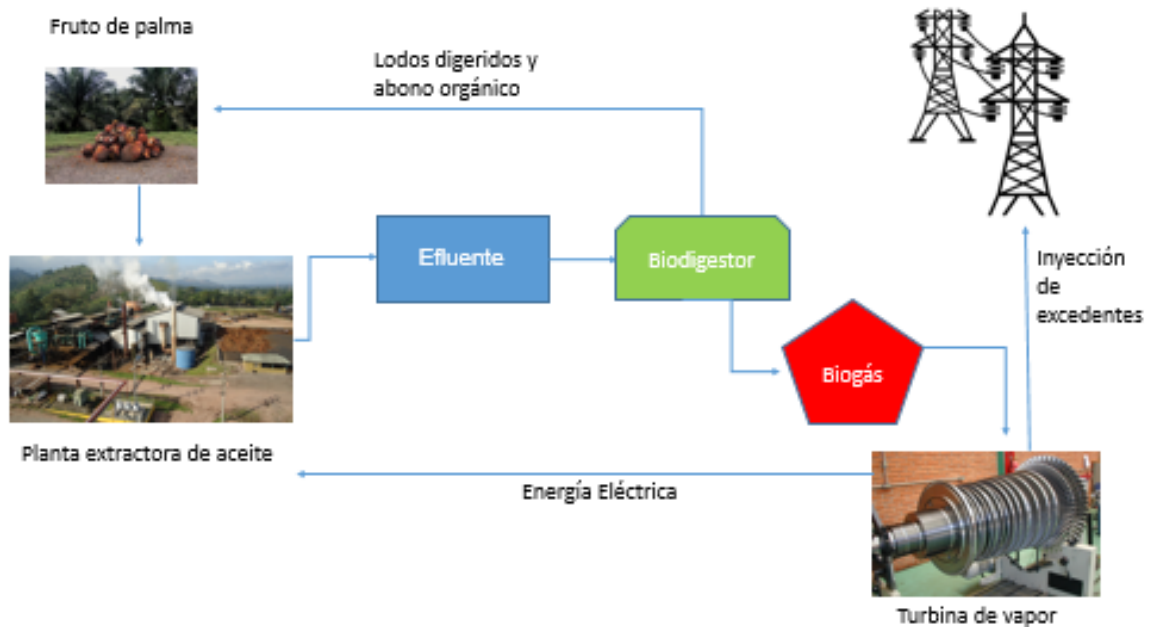


Ilustración 2 Diagrama de economía circular en planta extractora de ACP

Fuente: Elaboración propia recuperada de (Briceño et al., 2015)



Ilustración 3 Potencial teórico energético del biogás por m3 de efluente

Fuente: Elaboración propia recuperado de (Briceño et al., 2015)

2.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El efluente del proceso de extracción de aceite de palma africana presenta un problema ambiental y de espacio por el gran terreno que abarcan las lagunas de oxidación, para las empresas de agroindustria del sector de palma africana. También se crea un riesgo a la salud de las personas aledañas, esto porque si esta agua residual no es tratada puede contaminar las demás aguas por su alta concentración de material orgánico al ser inyectada al desagüe y convertirse en aguas no aptas para él ser humano.

Se estima que una planta extractora en un buen rendimiento produce 2,5 toneladas de efluente por tonelada de aceite de palma crudo, por lo que se puede observar que es más el residuo generado que el producto deseado, lo que conlleva a una gran carga para las empresas. (Ngan, 2002)

Se estima que una hectárea de plantación de palma africana que produce 20.1 toneladas de racimos de fruto de palma por año, generan en residuos las siguientes cantidades: 4.42 toneladas de racimo de frutos vacíos, 2.71 toneladas de fibra, 1.11 toneladas de cáscara de almendra y 13.75 toneladas de efluente líquidos. (Yusoff, 2006)

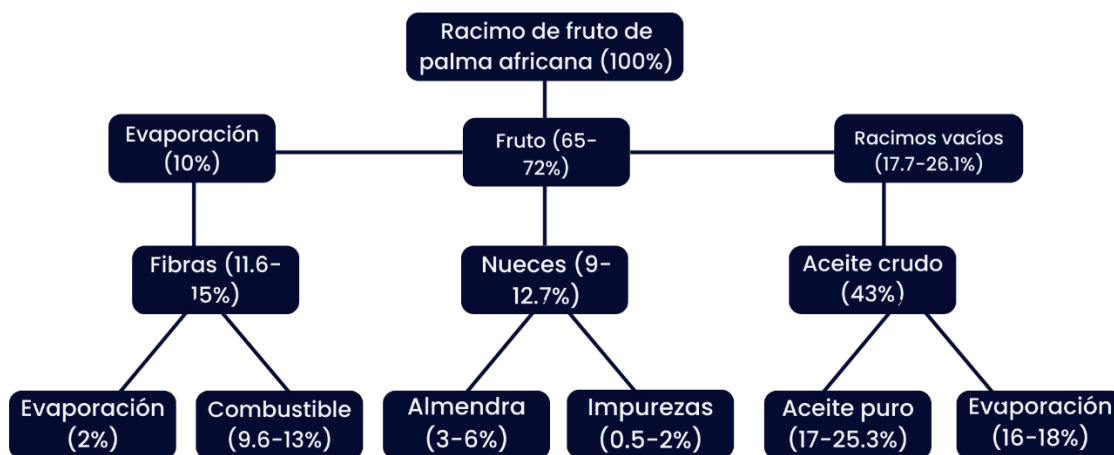


Ilustración 4 Porcentajes de aprovechamiento del proceso de extracción de aceite

Fuente: Elaboración propia recuperada de (Tan, 2006)

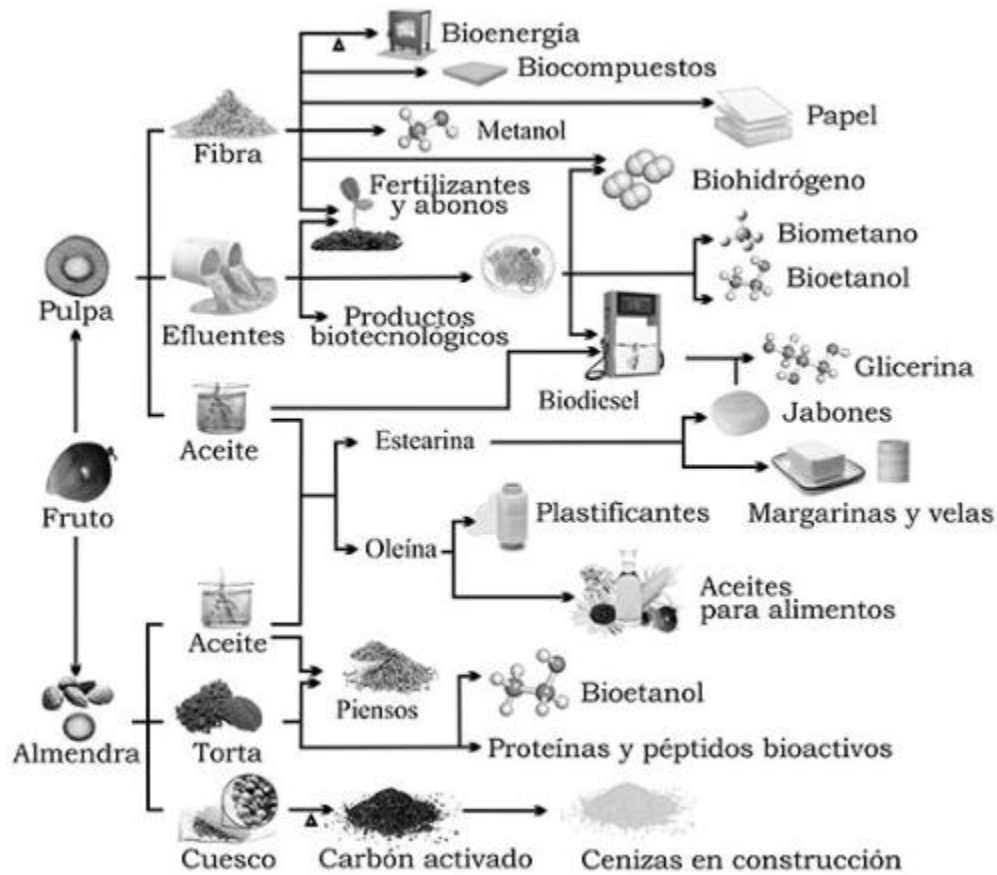


Ilustración 5 Subproductos de la palma africana

Fuente: (Sierra et al., 2017)

Se proyecta que esta investigación proponga una solución al problema de los efluentes en una planta extractora de aceite de palma, al crear biogás y así crear una opción de generación de energía para autoconsumo de las agroindustrias o comercialización del biogás para uso doméstico. Al producir biogás las empresas sus problemas con efluentes y tendrán un ahorro monetario al producir su propio biocombustible. Se estima que el efluente restante al pasar por un proceso de producción de biogás se podrá utilizar para abonos y fertilizantes y así crear un ambiente circular para las empresas productoras de aceite de palma africana.

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cuál es el tamaño de biodigestor óptimo para este proyecto?
2. ¿Cuál es el tiempo de producción del biogás a base de aguas residuales del proceso de extracción de aceite de palma?
3. ¿Cuál es el rango de pH de las aguas residuales necesario para generar biogás?
4. ¿Cuál será el porcentaje de energía generada por el biogás posible de cubrir del consumo energético total de la planta?

2.5 OBJETIVOS

En el actual apartado se presentarán los objetivos de la investigación a realizar. Se utilizará un objetivo general del cual se desglosarán los objetivos específicos.

2.5.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad Técnica de producir Biogás con el método de digestión anaeróbica a base de aguas residuales del proceso de extracción de aceite de palma.

2.5.2 Objetivos específicos

1. Identificar los rangos de los componentes fisicoquímicos del agua residual del proceso de aceite de palma que son aptos para la generación de biogás.
2. Analizar la viabilidad de la creación de biogás proveniente del proceso de extracción de aceite de palma.
3. Detallar el proceso de la creación de biogás con pruebas de laboratorio.
4. Determinar si el biogás creado puede ser utilizado para uso doméstico o generación de energía.

III. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presentará la base teórica para la presente investigación, es importante para la comprensión y un mejor manejo del tema a investigar al tener un respaldo de base teórica de estudios científicos y libros publicados relacionados al tema a investigar. También es crucial tener un enfoque de la problemática actual desde un punto de vista mundial y en ubicaciones específicas.

3.1 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

En este apartado del marco teórico se hace mención a la situación actual en el mundo sobre la materia prima del proyecto a utilizarse y las tendencias que tiene el mismo.

3.1.1 ANÁLISIS DEL MACRO-ENTORNO

En el análisis del macro entorno se trataran dos temas de relevancia para el entendimiento de la investigación. Estos son la producción de aceite de palma y las técnicas de tratamiento del POME en los diferentes países del mundo.

3.1.1.1 ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE ACEITE DE PALMA A NIVEL MUNDIAL

La demanda de aceite de palma cada vez va aumentando mundialmente, esto por sus diferentes usos domésticos y para crear productos de valor agregado. En el presente grafico se muestra la actual producción mundial de aceite de palma.

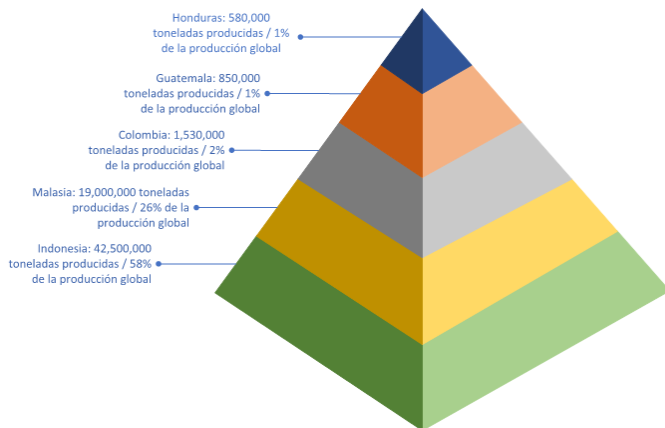


Ilustración 6 Países productores de aceite de palma

Fuente: Elaboración propia recuperado de (Shahbandeh, 2019)

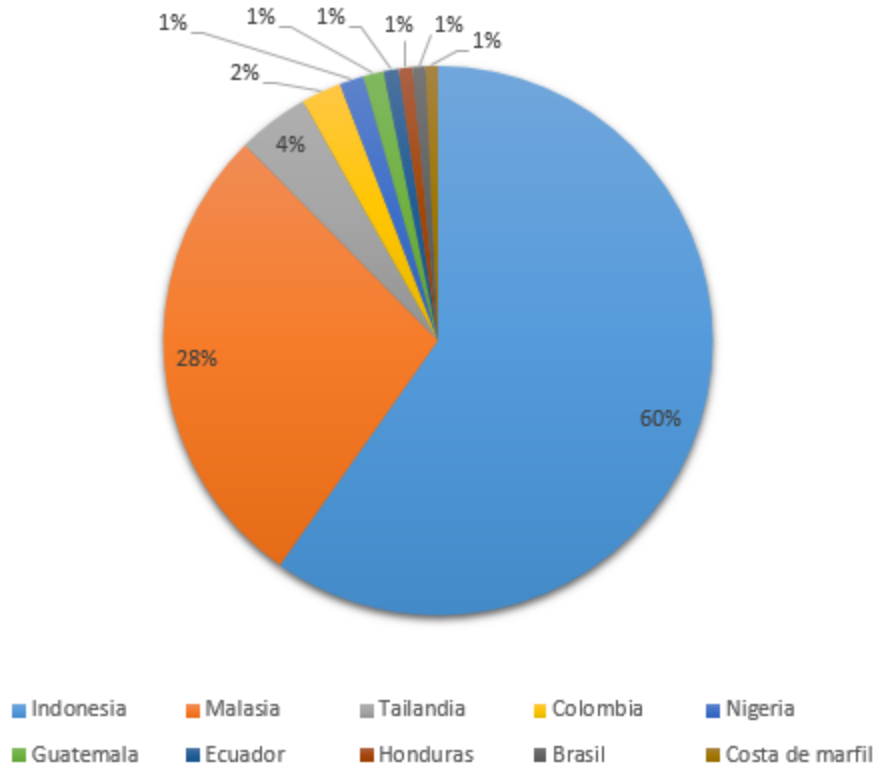


Ilustración 7 Principales productores de ACP y su aportación a la producción mundial

Fuente: Elaboración propia recuperado de (Grepalma, 2019)

3.1.1.2 ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN ACEITE DE PALMA EN ASIA

Los tres productores más grandes de aceite de palma a nivel mundial se encuentran en el continente asiático, en los cuales se han desarrollado una alta variedad de proyectos de cultivo y extracción de aceite.

3.1.1.2.1 INDONESIA

El país de Indonesia ubicado en el continente asiático es el máximo productor del mundo en la agroindustria de la palma africana. Indonesia se ha caracterizado por ser el máximo productor y esto es demostrado ya que aproximadamente el 5% del territorio del país está destinado al cultivo de palma africana. Reportando aproximadamente 43 millones toneladas de aceite de palma producido. (Schleicher & Hilbert, 2019)

Indonesia ha realizado el tratamiento de sus efluentes con grandes estanques de oxidación a aire libre, esta técnica presenta ciertos riesgos para la atmosfera por su liberación de gases deliberadamente. Esta técnica solo es utilizada actualmente para efluente con niveles bajos de materia orgánica, esto debido a que para el tratamiento anaeróbico es necesario una alta concentración de DQO y DBO en el POME.(Lokman et al., 2021)

3.1.1.2.2 MALASIA

Malasia siendo el segundo país con mayor producción de aceite de palma registró en 2017 un total de 5.81 millones de hectáreas con el cual han aumentado su producción de aceite crudo en 12.4%. Las exportaciones de han aumentado en un 2.7% en el 2017, esto demostrando una mejoría en la economía del país. (Kushairi & Nambiappan, 2018)

La técnica más utilizada en Malasia para el tratamiento de efluentes es el método de estanques de oxidación a aire libre. Esta técnica al no ser muy útil para la reutilización de estas aguas residuales ha generado que el país opte por nuevas propuestas para el tratamiento del POME. Malasia ha desarrollado usar las aguas residuales como fertilizante para el cultivo de micro algas y también utiliza hongos y bacterias alteradas para la descomposición de la materia orgánica de los efluentes.(Kamyab et al., 2018)

3.1.2 ANÁLISIS DEL MICRO ENTORNO

En este apartado se hace mención de una selección de país de Latinoamérica para el análisis de su producción de aceite de palma y sus técnicas de tratamientos de efluentes.

3.1.2.1 ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN DE ACEITE DE PALMA EN LATINOAMÉRICA

El subcontinente latinoamericano posee un clima con temperaturas adecuadas para la siembra de la palma africana y para desarrollar diferentes técnicas de tratamiento de efluentes. En este apartado se hace mención de la producción de aceite, exportación de aceite y las diferentes técnicas que los países utilizan para el tratamiento de efluentes.

3.1.2.2 COLOMBIA

Colombia es el país de Latinoamérica con mayor producción de aceite de palma, con una producción de 1,528,739 toneladas de aceite crudo en 2019. Aunque pasaran por un decrecimiento en su producción total en el año 2019 en comparación a su producción en 2018 que fue registrada en 1,631,506, demostrando un decrecimiento del 6.3% en la producción total, siempre sigue posicionado como el máximo productor de aceite de palma en Latinoamérica.(Fedepalma, 2020)

En Colombia los efluentes son tratados con un sistema híbrido de estanques de oxidación, conformado por cuatro etapas: tratamientos preliminares, lagunas de equalización, fosas anaerobias y facultativas. Este sistema ayuda a remover la materia orgánica del efluente en un 80%. (Martínez Valencia et al., 2011)

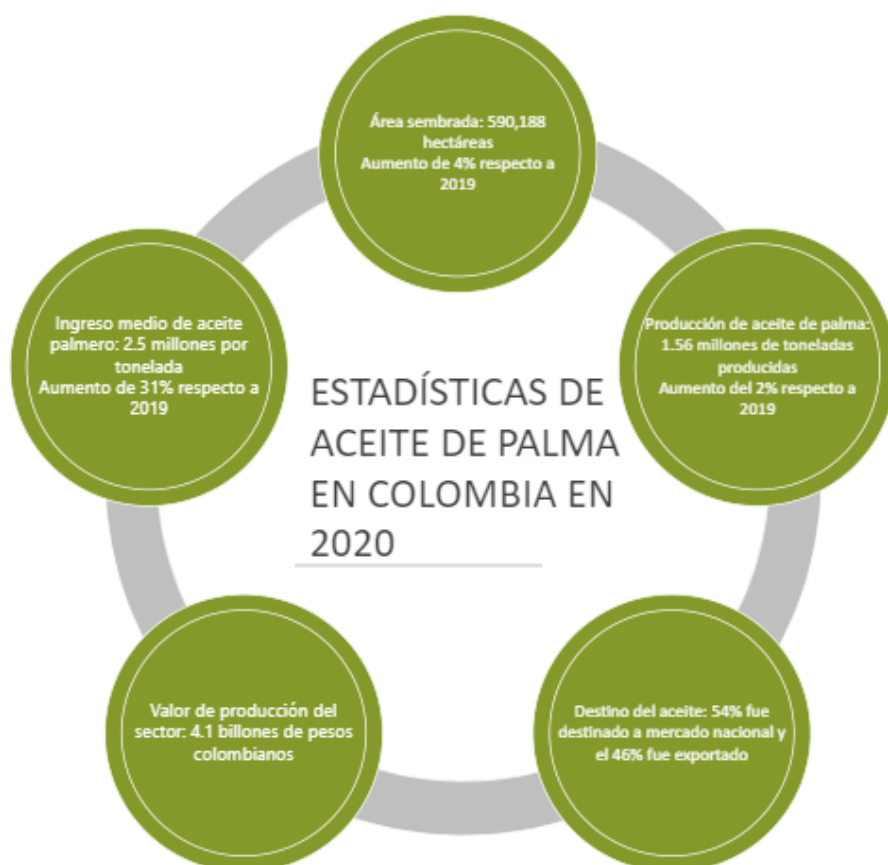


Ilustración 8 Estadísticas de aceite de palma en Colombia

Fuente: Elaboración propia recuperado de (Fedepalma, 2020)

3.1.2.3 GUATEMALA

Guatemala se ubica como el segundo país más productor de Latinoamérica, con una aportación de 850,000 toneladas de aceite de palma a la producción de aceite mundial. Guatemala se ha dedicado a optimizar sus procesos de extracción de aceite crudo de palma, por lo que en 2019 han registrado un porcentaje de 23% de extracción de aceite crudo de palma, aumentando un 1% respectivamente al 2018. Guatemala es el máximo productor de aceite crudo de palma sostenible certificado por la RSPO con el 44% de su producción total anual certificada por la RSPO.(Grepalma, 2019)

Guatemala recientemente ha implementado nuevos lineamientos de proceso y tratamiento de efluentes en el país. Grupo HAME en representación de la agroindustria de la palma en Guatemala ha redactado y detallado los pasos para el procedimiento de tratamiento de efluentes, compuesto por diferentes etapas que son: Torres de enfriamiento para disminuir la temperatura entrante del efluente al proceso de tratamiento, la implementación de biodigestores para digestión de la materia orgánica y lagunas facultativas.(Repsa Agroindustria Palma, 2019)

3.1.2.4 HONDURAS

Honduras es el 4 mayor productor de Latinoamérica, con una producción reportada en 2019 de aproximadamente 580,000 toneladas de aceite crudo de palma. Honduras reportó un crecimiento del 9.5% desde 2016 a 2019, con el cual ha impulsado sus exportaciones en un 0.8%. Honduras en el periodo de 2015-2019 aumentó su PIBA en un 6.2%, esto por su mejora de procesos productivos en sus distintos procesos productivos de la agroindustria. (UPEG & USDA, 2019)

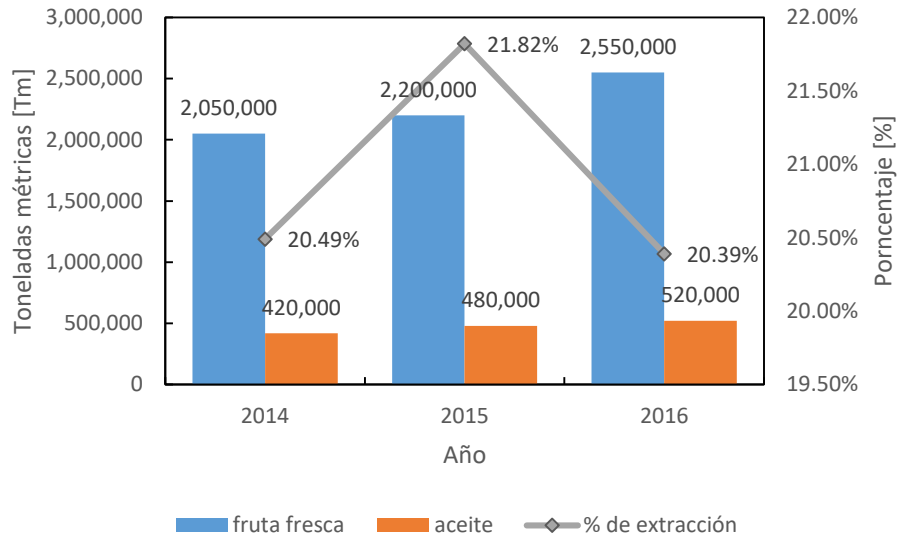


Ilustración 9 Datos de producción de ACP en Honduras

Fuente: Elaboración propia recuperada de (UPEG & USDA, 2019, p. 12)

La producción de aceite de palma se concentra en la ubicación del litoral atlántico en cuatro departamentos, los cuales son Cortés, Colón, Atlántida y Yoro. (UPEG & USDA, 2019)



Ilustración 10 Zonas productoras de Aceite de palma en Honduras

Fuente: (UPEG & USDA, 2019)

3.2 DESCRIPCIÓN DEL ACEITE DE PALMA AFRICANA

El aceite de palma se extrae del mesocarpio del fruto de la semilla de la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq) a través de procedimientos mecánicos. Está constituido por una mezcla de ésteres de glicerol (tri-glicéridos) y es fuente natural de carotenos y vitamina E. (Rincón M. & Martínez C., 2009, p. 12)

El aceite procedente de la palma se mantiene como el producto más estudiado de las plantaciones tropicales hasta el momento, sus estudios son llevados a cabo mayoritariamente por los países productores y son enfocados en mejorar los niveles de producción y eficiencia de las plantas extractoras. Por otra parte, se realizan amplios estudios para mejorar la calidad del aceite producido y el alcance de utilidad que este puede tener. (Lai et al., 2012)

3.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA AFRICANA

Es de alta importancia entender cada paso de la extracción de aceite de palma africana para así, identificar las etapas de los que surgen los efluentes y por el proceso que atraviesan para la obtención de las cargas orgánicas.

3.2.1 RECEPCIÓN DE FRUTOS DE LA PALMA AFRICANA

El proceso de recepción de frutas se centra en el transporte de la fruta a la planta extractora de aceite, en el cual se realiza un proceso de pesado del camión con la fruta y otra medición sin la fruta para obtener el peso neto de la fruta. Luego es puesto a prueba con una prueba de calidad propia de la empresa extractora, para finalizar en el llenado de las tolvas para proceder al inicio del proceso de extracción. (Ortiz A & Alfaro C, 2006)

3.2.2 ESTERILIZACIÓN

El proceso de esterilización es la primer etapa del proceso en la planta extractora, en el cual se basa en someter los frutos de la palma a condiciones de vapor de agua para el objetivo del

ablandamiento de los frutos y disminuir la resistencia de los tejidos de la fruta para facilitar el proceso de digestión y prensado.(Afoakwa, 2013)

3.2.3 DESFRUTADO

En esta etapa se centra en la separación del fruto de su racimo haciéndolo con uso de un tambo rotatorio, para luego ser enviado al digestor.(Ortiz A & Alfaro C, 2006)

3.1 DIGESTIÓN

En esta etapa el fruto es macerado por medio de una agitación circular producto de unas paletas en el digestor. También se le aplica vapor para impulsar el desprendimiento de las células de aceite del fruto.(Ortiz A & Alfaro C, 2006)

3.2.5 PRENSADO

En la etapa de prensado se busca compactar lo más posible la mezcla producida en el digestor, esto para que la extracción del aceite sea lo más eficiente posible y preparar el fruto para la etapa de clarificación.(Ortiz A & Alfaro C, 2006)

3.2.6 CLARIFICACIÓN

La etapa de clarificación se centra en remover las impurezas del aceite, agregándole claridad y buena apariencia a este. Se adiciona una gran porción de agua en este proceso para una separación efectiva del aceite y los lodos efluentes del proceso. Luego la mezcla de aceite, agua y lodo es inyectada en un proceso de desarenado para la eliminación de arenas y tierra de la mezcla para próximamente ser pasado al proceso del tamizado para remover la mayor cantidad de materia solida de la mezcla del aceite. Toda materia separada y agua utilizada en el proceso de clarificación es llevado a tratamiento de efluentes por su alta carga orgánica.(Afoakwa, 2013)

3.2.7 PALMISTERIA

La mezcla obtenida del proceso de prensado es enviada a un proceso de separación de la nuez y la fibra, esto para poder ser discriminada y enviar la fibra a ser utilizada como combustible para las calderas, mientras la nuez es enviada a un proceso de extracción de su aceite.(Ortiz A & Alfaro C, 2006)

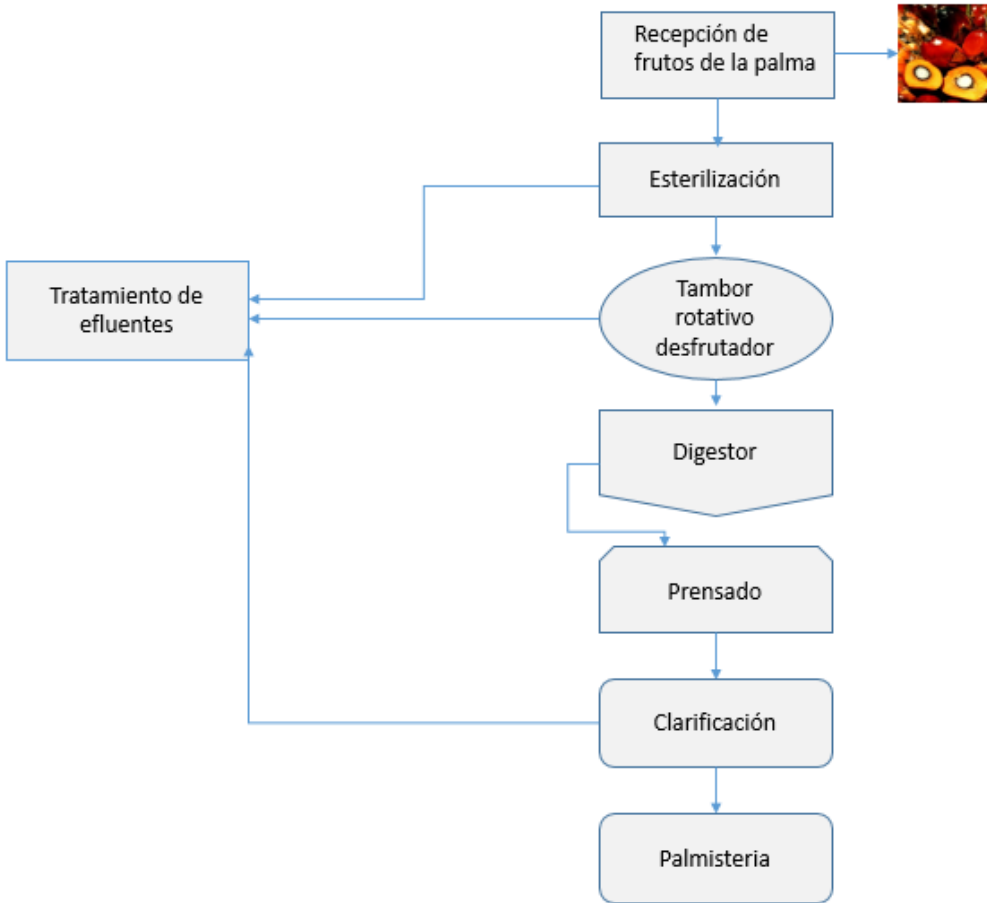


Ilustración 11 Proceso de extracción de aceite de palma

Fuente: Elaboración propia recuperada de (Ortiz A & Alfaro C, 2006)

3.3 EFLUENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA

El efluente del proceso de extracción está incorporado por diferentes fluidos, tierra, lodo, sólidos y restantes de aceite del proceso llevado en la planta de palma africana. El POME es generalmente un residuo de alta calidad por su alta concentración de materia orgánica. El efluente generalmente es creado por el proceso de esterilización, digestión y clarificación de la extracción del aceite, el cual está compuesto principalmente por material celuloso, grasas y lípidos. Asimismo, contiene materia sólida disuelta en un rango de 18,000 a 45,000 mg/L. (Kamyab et al., 2018)

El POME resultante de la extracción de aceite de palma es una mezcla de color café con niveles arriba de los rangos permitidos de DQO, DBO y un pH entre 4.5 – 5. El POME de la extracción de aceite de palma contiene un alto potencial energético para ser aprovechado con técnicas como la biodegradación con hongos y algas. Esto es posible ya que los hongos y algas tienen la propiedad de romper enzimas y degradar los parámetros químicos del efluente. (Ibegbulam-Njoku & Achi, 2014)

La agroindustria de palma global ha catalogado al POME como uno de los máximos causantes de la contaminación de cuerpos de agua o tierras aledañas a la planta extractora. Aproximadamente 2.5 toneladas de POME son creadas por cada tonelada de aceite de palma crudo generado. Este POME está desglosado como 95% agua y 5% otros compuestos orgánicos, en los cuales se incluyen sólidos suspendidos y sólidos disueltos. Los sólidos suspendidos son los principales actuadores para el color café de los efluentes del proceso de extracción de aceite de palma. (Farraji et al., 2021)

3.4 BIODIGESTORES

Los biodigestores son lugares u objetos que facilitan a la materia orgánica a realizar el proceso de descomposición, este proporciona un ambiente favorable para que las bacterias de la materia orgánica actúen y digieran en un ambiente cerrado y sin oxígeno. (Brito Sauvanell, 2011)

3.4.1 TIPOS DE BIODIGESTORES

Los biodigestores son herramientas que se adaptan a la disponibilidad de materia orgánica que se dispone y el proceso necesario para tratar esta materia prima. Existen cuatro principales tipos de biodigestores los cuales son.

a. Biodigestor Tipo Batch

Los biodigestores tipo batch normalmente son utilizados para experimentar con distintas materias orgánicas es decir, se utilizan para pruebas de laboratorio para determinar si las materias orgánicas son útiles para la generación de biogás. En estos biodigestores se suele permitir de 20% a 40% de espacio para el gas. (Casanovas et al., 2019)



Ilustración 12 Biodigestores tipo batch

Fuente: (Casanovas et al., 2019)

b. Biodigestores tipo globo

Los biodigestores de tipo globo tienen un aspecto de un tubo largo el cual se entierra un parte en la tierra y una parte está libre a la superficie. Su diseño ayuda a las cargas líquidas a crear un movimiento de agitación y ahorrar la instalación de agitadores. Los biodigestores tipo globo son fáciles de movilizarse y tienen un costo menor a los biodigestores de domo fijo al ser formados por materiales de menor costo. (Casanovas et al., 2019)



Ilustración 13 Biodigestor tipo globo

Fuente: (Casanovas et al., 2019)

c. Biodigestores de domo fijo

Los biodigestores de domo fijo o rígido son biodigestores elaborados con materiales como ladrillo u hormigón, los cuales presentan mayor resistencia al tipo globo y una mayor oportunidad de implementar sistemas de agitación de la materia prima sin dificultad. Al ser una estructura fija hay un mayor margen de modificación específica para materias primas y otras variables. (Casanovas et al., 2019)

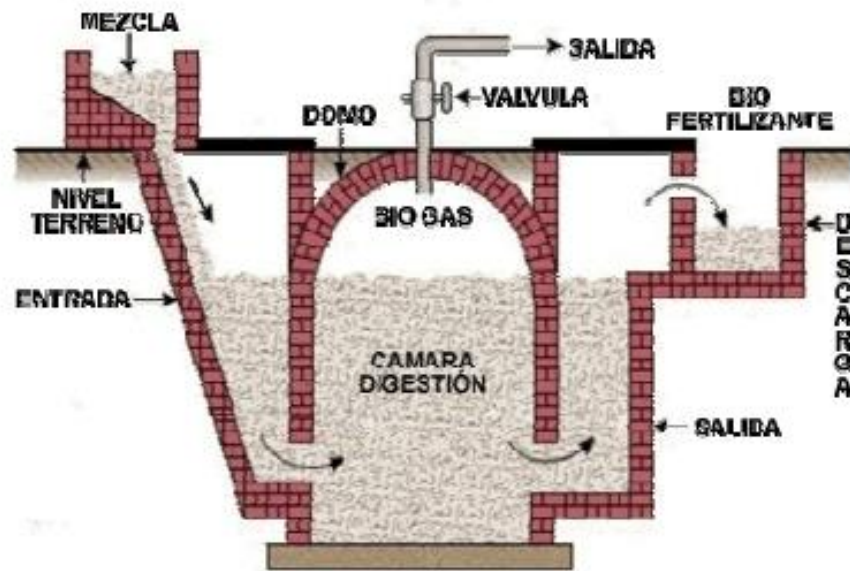


Ilustración 14 Esquema de biodigestor de domo fijo

Fuente: (Corona Zúñiga, 2007)

d. Biodigestor de tambor flotante

Los biodigestores de tambor flotante consisten en una estructura subterránea y un recipiente de gas móvil o flotante arriba de la mezcla, este captura los gases que suben en el proceso de digestión. En este tipo de biodigestor es más accesible la forma de medir la cantidad de gas producido por su facilidad de observación en el tambor flotante. La presión es constante en el tambor flotante pero presenta un gran costo de elaboración por el material del tambor flotante es de acero y la estructura al igual que la del domo fijo, es de ladrillos u hormigón. (Corona Zúñiga, 2007)

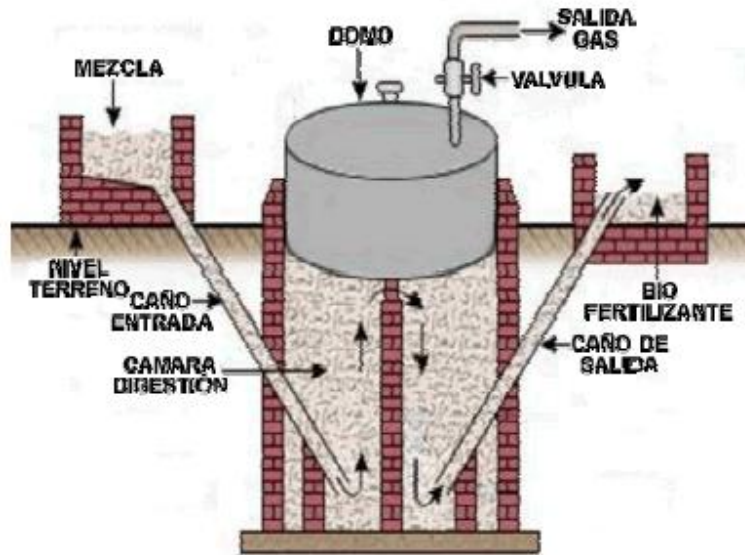


Ilustración 15 Biodigestor de tambor flotante

Fuente: (Corona Zúñiga, 2007)

3.5 DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica es un proceso popularmente utilizado para la descomposición de materia orgánica, fomentando un ambiente sin oxígeno en el cual microbios descomponen materia con alta carga orgánica para la producción de metano y dióxido de carbono. La digestión anaeróbica se centra en un proceso secuencial realizado por grupos de bacterias y arqueas metanogénicas. (Laiq Ur Rehman et al., 2019)

3.5.1 HIDRÓLISIS

El proceso de hidrólisis es la primera etapa de la digestión anaeróbica, este consta en la acción de bacterias hidrolíticas comienzan a quebrar y descomponer los carbohidratos, proteínas y grasas de la materia prima a utilizar. Luego de quebrar y descomponer esto se convierte en soluciones más simples como las azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Este proceso de conversión es creado por la ausencia de oxígeno en el ambiente. (Laiq Ur Rehman et al., 2019)

3.5.2 ACIDOGENESIS

La etapa de acidogenesis se centra en utilizar los productos de la hidrólisis como son la azúcar, ácidos grasos y aminoácidos para convertirse en sustratos para las bacterias acidogénicas para que lo degraden y creen pequeñas cadenas de carbonos. En la etapa de acidogenesis los ácidos orgánicos liberan compuestos como el alcohol, hidrógeno y dióxido de carbono producto de una etapa de fermentación. (Laiq Ur Rehman et al., 2019)

3.5.3 ACETOGENESIS

La etapa de acetogenesis es la tercera etapa de la digestión anaeróbica, en la cual se involucra el metabolismo, la transformación de ácidos orgánicos y los alcoholes en acetatos. En este proceso se crea fermentación de los hidrocarburos, lo cual produce dióxido de carbono e hidrógeno que será utilizado para formar metano.(Laiq Ur Rehman et al., 2019)

3.5.4 METANOGÉNESIS

La etapa de metanogénesis es la última etapa de la digestión anaeróbica, en la cual se centra en la creación de metano. Las bacterias metanogénica usan de sustrato los compuestos de hidrógeno, dióxido de carbono, acetato, metanol para suplir la ausencia del oxígeno en el ambiente. Al terminar la descomposición de estos sustratos el producto es lo que comúnmente es conocido como biogás, un compuesto creado por mayormente metano y dióxido de carbono. (Laiq Ur Rehman et al., 2019)

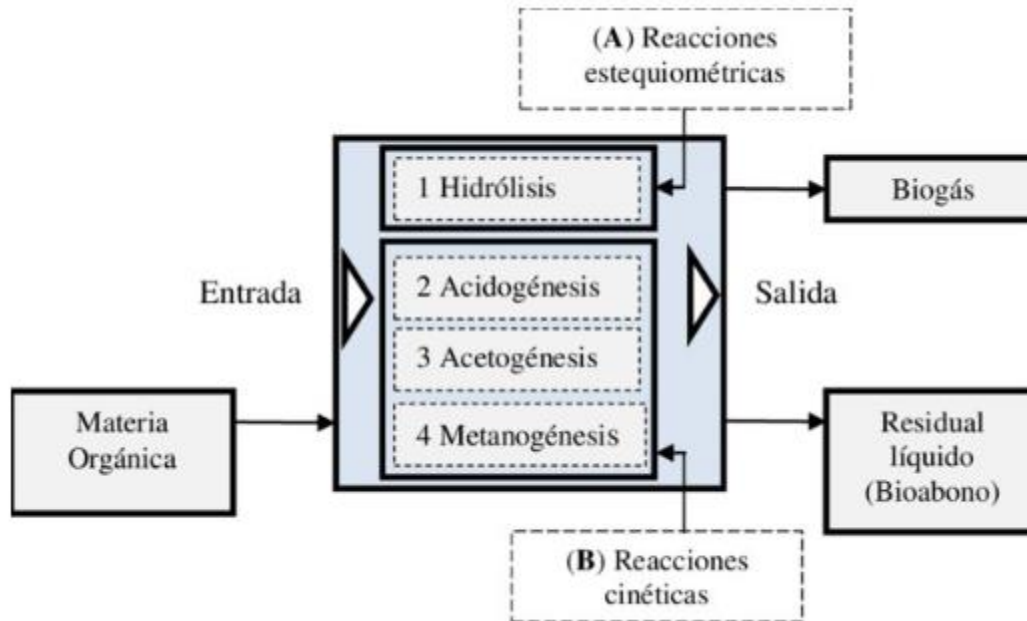


Ilustración 16 Proceso de la digestión anaeróbica

Fuente: (Suárez et al., 2019)

3.6 BIOGÁS

El biogás es un gas producto de medios naturales o ambientes creados específicamente para la creación de biogás, estos siendo los ambientes anaeróbicos. El biogás es producido por un proceso llamado digestión anaeróbica, en el cual bacterias descomponen materias orgánicas y cadenas de carbonos para crear un producto de metano y dióxido de carbono. La producción de biogás es catalogada como una tecnología de energía renovable, al ser crear un ambiente circular para los productores del biogás, por su función de utilizar desechos orgánicos para darles un diferente uso y reutilizarlos para autoconsumo o generación de energía. (Kougias & Angelidaki, 2018)

3.6.1 PROPIEDADES DEL BIOGÁS

El biogás es un producto de la digestión anaeróbica, este tomando una materia y generando un producto de valor agregado por sus distintas aplicaciones y por ser un combustible alternativo. El biogás tiene como promedio un poder calorífico entre 4.500 a 5.600 kilocalorías por m³.(Sawyer et al., 2019)

3.6.2 PARÁMETROS AMBIENTALES Y DE CONTROL DEL BIOGÁS

La producción de biogás se ve directamente afectada por parámetros químicos, ambientales y de control. Estos parámetros son utilizados para llevar un control de la calidad del biogás a producir. (Tian et al., 2017)

3.6.2.1 TEMPERATURA

La temperatura es el factor principal para la producción de biogás, esto porque la temperatura afecta directamente el crecimiento de los microorganismos involucrados. Al alterar la temperatura del biodigestor se puede alterar el crecimiento de los microorganismos por ende, alterar la velocidad del proceso de producción de biogás. (Das & Mahanta, 2014)

Existen tres rangos de temperaturas que los microorganismos utilizan en procesos anaeróbicos, las cuales son: rango psicrófilico, el cual llega a temperaturas hasta 25 [°C], mesófilico, el cual abarca temperaturas de 32 [°C] a 42 [°C] y el rango termófilico que abarca temperaturas de 50 [°C] a 67 [°C]. (Tian et al., 2017)

3.6.2.2 pH y alcalinidad

El valor de pH es la medida utilizada para medir la cantidad de acidez o alcalinidad presente en una solución. La medida de pH es la unidad de indicación de concentración de iones hidronio [H₃O⁺] presentes en las distintas sustancias. Las siglas, hacen mención a potencial de hidrógeno. (Ibegbulam-Njoku & Achi, 2014)

Tabla 4 Rangos óptimos de pH para la digestión anaeróbica

Proceso de digestión anaeróbica	Rangos de pH
Fermentativos	7.2 – 7.4
	7.0 – 7.2
Acetogénicos	6.5 – 7.5
Metanogénicos	

Fuente: (Parra et al., 2014)

3.6.3 APLICACIONES DEL BIOGÁS

El biogás tiene una variedad de aplicaciones en la agroindustria y el sector de energías renovables, desde crear una economía circular para las empresas de la agroindustria al reutilizar sus desechos para generar biogás y utilizarlo para autoconsumo y luego lo restante utilizarlo para fertilizante, hasta ser el combustible principal para una planta de vapor para generar energía eléctrica para un lugar. El biogás también puede servir como un combustible alternativo para el sector transporte en automóviles y buses, al ser un gran contenedor para la derogación del GLP. Otra aplicación del biogás es en el sector doméstico, siendo una gran alternativa para utilizar en las estufas de gas y como alternativa de combustible para calefacción de un hogar. (Gancone et al., 2020)

3.6.4 COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS

El biogás está mayormente compuesto por metano y dióxido de carbono, y otros gases en menores concentraciones.

Tabla 5 Composición del biogás

Componente	Concentración media
Metano (CH ₄)	55-73 Vol. %
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25-45 Vol. %
Agua (H ₂ O)	2-7 Vol. %(20-40 C)
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	20-20,000 ppm
Nitrógeno (N ₂)	≤ 2 Vol. %
Oxígeno (O ₂)	≤ 2 Vol. %
Hidrógeno (H ₂)	≤ 2 Vol. %
Amoníaco	≥ 0.15 g/L
Azufre	≥ 50 mg/L

Fuente: (Calbry-Muzyka et al., 2021)

IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 ENFOQUE

El enfoque que se seleccionó para la investigación es un enfoque de tipo mixto, una combinación de enfoque cuantitativo y cualitativo. Esto porque, al realizar mediciones se estarán analizando a un nivel cuantitativo para obtener estadísticas que ayudarán a cumplir los objetivos de la investigación y comprobar la viabilidad de usar dicha materia prima seleccionada.

Por otro lado, el enfoque cualitativo ayudará a la investigación a analizar todas esas variables que no se pueden cuantificar y presentan una nueva perspectiva que puede impactar a la investigación a lo largo que se lleve a cabo. Posteriormente se observará como ambos enfoques influyen en la investigación.

4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Las variables de la investigación son los factores escogidos que presentan una reacción por un factor que los acciona, pueden ser medibles y manipulados para analizar diferentes escenarios de la investigación. En esta sección se harán mención de las variables independientes y las variables dependientes escogidas para llevar a cabo la investigación.

4.2.1 VARIABLE DEPENDIENTE

La variable dependiente es aquella que no se altera o cambia de escenarios, es la parte o función de la investigación que se ve afectada directamente por las variables independientes. Para la investigación a realizar se ha determinado la producción de biogás como variable dependiente, la cual es un compuesto de en su mayoría metano y dióxido de carbono.

4.2.2 VARIABLE INDEPENDIENTE

Las variables independientes son todos los factores que se pueden alterar y manipular en propósito de causar una reacción en la variable dependiente. Para la presente investigación se determinaron los factores posibles a medir que afectan directamente a la variable dependiente.

4.2.2.1 TEMPERATURA AMBIENTE

La temperatura ambiente es presentada como la primera variable independiente esto porque presenta una reacción directa con la variable dependiente que es la producción de biogás en el experimento. La temperatura es uno de los factores más determinantes en los procesos de digestión anaeróbica, debido a que altera directamente el comportamiento de las bacterias y microorganismos que toman acción en la descomposición de la materia.

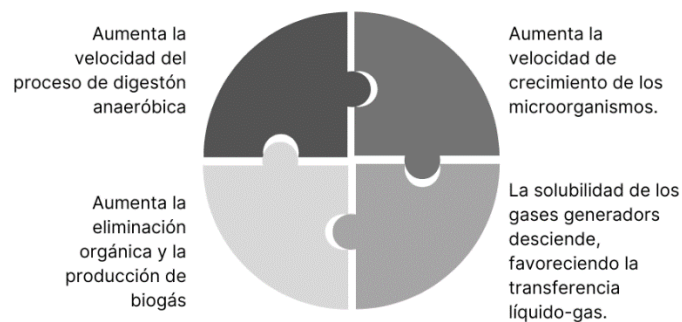


Ilustración 17 Temperatura como variable independiente

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2 AGITACIÓN DE LA MEZCLA

La agitación de la mezcla dentro del biodigestor es esencial para la distribución uniforme de la materia en el biodigestor. Esto genera que la temperatura dentro del biodigestor se disperse y sea uniforme. Genera un movimiento de las bacterias y lodos dentro del biodigestor, para así realizar una producción mayor y evitar que los lodos se agrupen en la parte superior del biodigestor y esto evite que el biogás ascienda y pueda conducirse por la tubería.



Ilustración 18 Agitación como variable independiente

Fuente: Elaboración propia

4.1 HIPÓTESIS

La hipótesis de investigación está basada en experimentar con un sustrato y evaluar su viabilidad técnica para la producción de biogás.

Hipótesis de investigación (Hi): El efluente de palma es viable técnicamente y producirá más de 1.5 L de biogás en 3 semanas de proceso de digestión anaeróbica.

Hipótesis nula (Ho): La utilización de efluente del proceso de aceite de palma no produce biogás o su producción es mínima y muy tardía para implementarlo en un proyecto a gran escala.

4.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

Para la realización de la investigación se utilizaron técnicas para búsqueda de información necesaria para sustentar la teoría aplicada en la investigación. Para cumplir objetivos se realizó la utilización de diferentes softwares para el análisis de datos y simulaciones.

4.4.1 TÉCNICAS

El apartado a continuación hace mención de todas las técnicas utilizadas a la hora de realizar la investigación y el experimento a analizar.

4.4.1.1 OBSERVACIÓN

La técnica de observación se utilizó a la hora del análisis del prototipo al anotar toda variación visual que se percibió dentro del tiempo del experimento.

4.4.1.2 RECOLECCIÓN DE DATOS

La recolección de datos es esencial para optar por un enfoque cuantitativo para esta investigación, se realizaron mediciones en el experimento y se recopilaron estos datos para luego analizarlos.

4.4.1.3 REVISIÓN DE LITERATURA

La revisión de literatura se realizó para dar un amplio sustento a la temática de la investigación, esto para dar un marco teórico detallado y amplio. Para la revisión de literatura se utilizaron libros, documentos gubernamentales, informes, artículos científicos, estadísticas, revistas científicas y artículos de conferencias de temas relacionados a la investigación.

4.4.2 INSTRUMENTOS

En este apartado se hace mención de todos los instrumentos utilizados en la realización de la investigación.

4.4.2.1 *Microsoft Excel*

Este programa fue utilizado para recopilar datos de mediciones realizadas y luego analizar los datos obtenidos en la investigación.

4.4.2.2 *Biodigestor Pro*

Este software fue utilizado para realizar simulaciones de la producción de biogás con la materia prima propuesta para la investigación y realizar comparaciones entre el proyecto real y los resultados de las simulaciones.

4.4.2.3 *Microsoft Visio*

Este programa fue utilizado para realizar mapas conceptuales y diagramas para facilitar la presentación de datos e información necesarios para la investigación.

4.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO



Ilustración 19 Metodología de estudio

Fuente: Elaboración propia

4.5.1 ETAPA 1: RECOLECCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS

El presente proyecto se llevó a cabo en San Pedro Sula, Cortés, Honduras. La temperatura fue seleccionada como una variable independiente, por lo que es indispensable la recolección de datos de meteorológicos del lugar para analizar como las temperaturas ambientales afectan directamente la producción de biogás en el biodigestor prototipo elaborado.

En la ilustración 20 se observa las temperaturas mínimas y máximas en San Pedro Sula en el año de 2021, las cuales presentan una máxima de aproximadamente 34 [°C] y una mínima de aproximadamente 19 [°C].

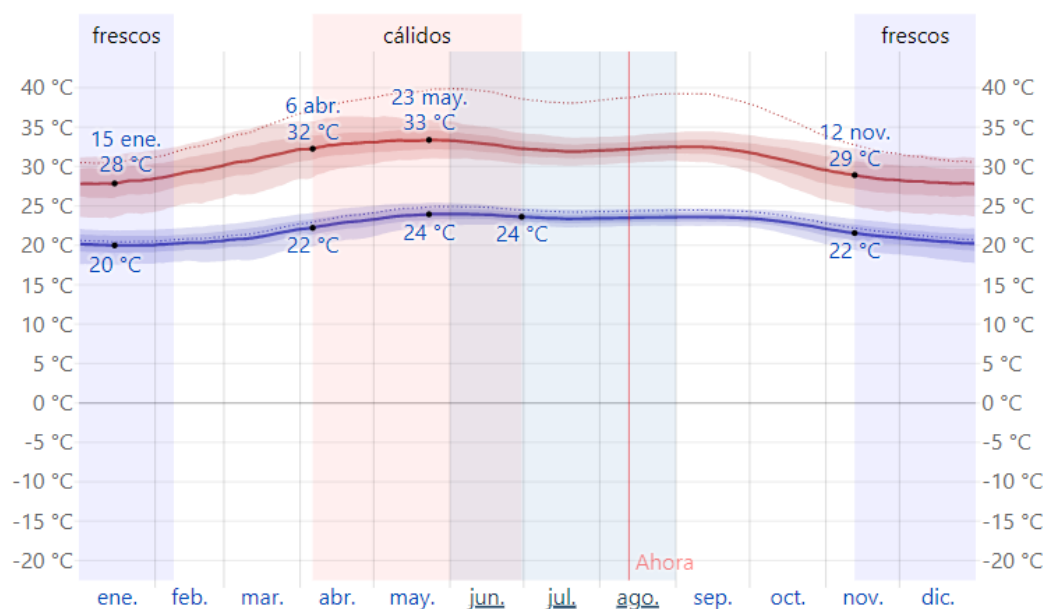


Ilustración 20 Temperatura máxima y mínima en San Pedro Sula

Fuente: (WeatherSpark, 2021b)

En la ilustración 21 se puede observar la precipitación en [mm] en San Pedro Sula en 2021, podemos observar que los meses con mayor precipitación son: Septiembre, Octubre y Junio.

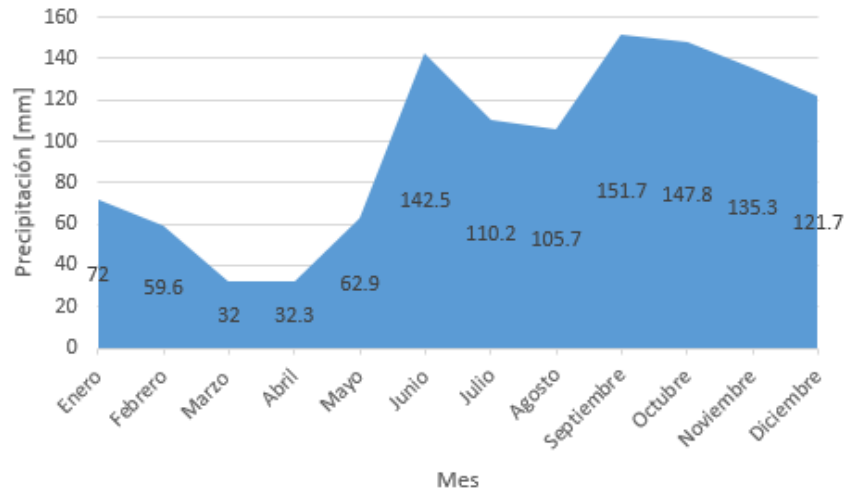


Ilustración 21 Precipitación en 2021 en San Pedro Sula

Fuente: Elaboración propia recuperada de (NASA, 2021)

En la ilustración 22 se muestra la humedad [%] en el ambiente en San Pedro Sula, se puede observar que los meses con mayor humedad son: junio, julio, agosto y septiembre.

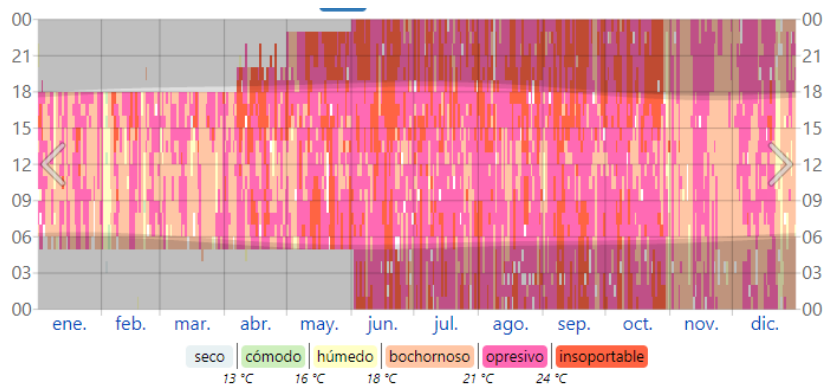


Ilustración 22 Mapa de humedad en San Pedro Sula

Fuente: (WeatherSpark, 2021)

4.5.2 ETAPA 2: OBTENCIÓN DE POME

Para la obtención del POME se realizará una visita técnica a una planta extractora, en la cual se realizará una observación del proceso completo de la extracción de aceite y la generación de aguas residuales de dicho proceso.

4.5.3 ETAPA 3: OBTENCIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL POME

Para la obtención de los parámetros fisicoquímicos se realizaron pruebas de medición de pH. Con el apoyo de una planta extractora de aceite en Honduras se realizaron otras pruebas para la obtención de los distintos parámetros como el DBO, DQO, pruebas de masa seca y demás parámetros.

4.5.3.1 DETERMINACIÓN DE VALOR DE PH

Para la realización de la prueba del valor de pH de las aguas residuales se tomará una muestra de 5 [ml] del efluente en un beaker. Con la muestra extraída se hace una prueba con el respectivo sensor medidor de valores de pH.

4.5.3.2 DETERMINACIÓN DE DQO Y DBO

La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de la materia orgánica por métodos químicos para la conversión a dióxido de carbono y agua. La demanda bioquímica de oxígeno es la cantidad de oxígeno que las bacterias y otros organismos, consumen en el proceso de degradación de la materia orgánica. La determinación de ambos es necesario para determinar la capacidad de degradación del sustrato a seleccionar. Para la determinación de estos parámetros se realizará una solución química llamada Dióxido de Cromo, el cual será con soluciones de 1:1000 y 1:500 de sustrato a 150 [°C] de temperatura.

4.5.3.3 DETERMINACIÓN DE LA MASA ORGÁNICA SECA

La masa orgánica seca es la cantidad de sólidos orgánicos en el sustrato. Es uno de los parámetros principales para la producción de biogás con su degradación. Para realizar el cálculo se seca la muestra en un horno a 150 [°C], para eliminar el agua presente. Luego la muestra es colocada en un segundo horno a 500 [°C], para quemar toda materia orgánica y obtener como restante los lodos. La diferencia de pesos finales es el resultado de masa orgánica seca.

4.5.4 ETAPA 4: ELABORACIÓN DE BIODIGESTOR A ESCALA

Para la experimentación de la viabilidad del sustrato escogido se utilizará un biodigestor tipo batch, estos siendo biodigestores a escala para la demostración de si un sustrato es útil para la producción de biogás.

4.5.4.1 RECIPIENTE DEL BIODIGESTOR

Para la elaboración del biodigestor se utilizará un garrafón de agua con capacidad de 18 litros. Este tamaño fue escogido para tener una concentración considerable de POME, pero siendo aún un tamaño apto para la experimentación con un sustrato.



Ilustración 23 Garrafón de agua de 18 litros

Fuente: Elaboración propia

4.5.4.2 ELABORACIÓN DE SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE BIOGÁS

Para la conducción del biogás creado en el biodigestor se utilizaron mangueras de aire, dos accesorios terminación macho para adaptación de mangueras de aire con la válvula de bola. Todas las medidas utilizadas fueron de $\frac{1}{2}$ [in].



Ilustración 24 Válvula de bola con accesorios de conducción de aire

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 25 se puede observar el sistema implementado, desde las mangueras de aire conectadas a la válvula de bola y el objeto utilizado para la unión al garrafón de agua.



Ilustración 25 Sistema de conducción de biogás

Fuente: Elaboración propia

4.5.4.3 SELLAMIENTO DEL BIODIGESTOR

Para el sellamiento del biodigestor se utilizó silicón para el sellamiento de las uniones de las mangueras al biodigestor. Para sellar las mangueras a la válvula se utilizaron abrazaderas de aluminio de ½ [in]. Al incorporar todo el sistema de conducción se sellaron todos los puntos posibles de infiltración de oxígeno con tape sellador aislante.



Ilustración 26 Sellamiento de biodigestor

Fuente: Elaboración propio

4.5.5 ETAPA 5: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A BASE DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Mediante el uso del método de la digestión anaeróbica utilizando un ambiente sin oxígeno para la producción de biogás. El biogás que será producido en el biodigestor está compuesto principalmente por dos componentes, los cuales son: metano [CH_4] y dióxido de carbono [CO_2]. La producción de biogás está directamente relacionada con la temperatura ambiente del lugar en el cual se está realizando el proyecto y la cantidad de agitaciones realizadas en el día, para facilitar la ascensión de los gases en el biodigestor y crear una mezcla homogénea del sustrato.

4.5.6 ETAPA 6: ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA

Para el análisis de la viabilidad técnica se tomarán los resultados obtenidos de producción de biogás y realizar pruebas de combustión para determinar si es viable y si su composición tiene los parámetros necesarios para hacer la acción de combustionar y ser útil como un combustible alternativo.

4.6 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Actividades	Semanas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Planteamiento del problema	■	■								
Marco Teórico		■	■							
Visitas técnicas		■			■					
Obtención del POME		■								
Metodología de la investigación			■	■						
Análisis y resultados				■	■	■	■			
Introducción y Abstract							■	■		
Conclusiones y Recomendaciones							■	■		
Artículo científico								■	■	■

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el siguiente apartado se presentarán los resultados obtenidos al realizar la metodología de validación de la investigación a realizar.

5.1 RECOLECCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos meteorológicos nos proporcionaron la temperatura ambiente de los días que se llevó a cabo el experimento de producción de biogás en San Pedro Sula, Cortés.

5.1.1 TEMPERATURA AMBIENTE

Para medir la temperatura ambiente se recopilaban datos diarios de las temperaturas máximas y mínimas en San Pedro Sula, Cortés, Honduras. Durante cinco semanas se produjo biogás a base del efluente de aceite de palma, por lo que se recopilaban datos de temperatura ambiental durante de cinco semanas respectivamente.

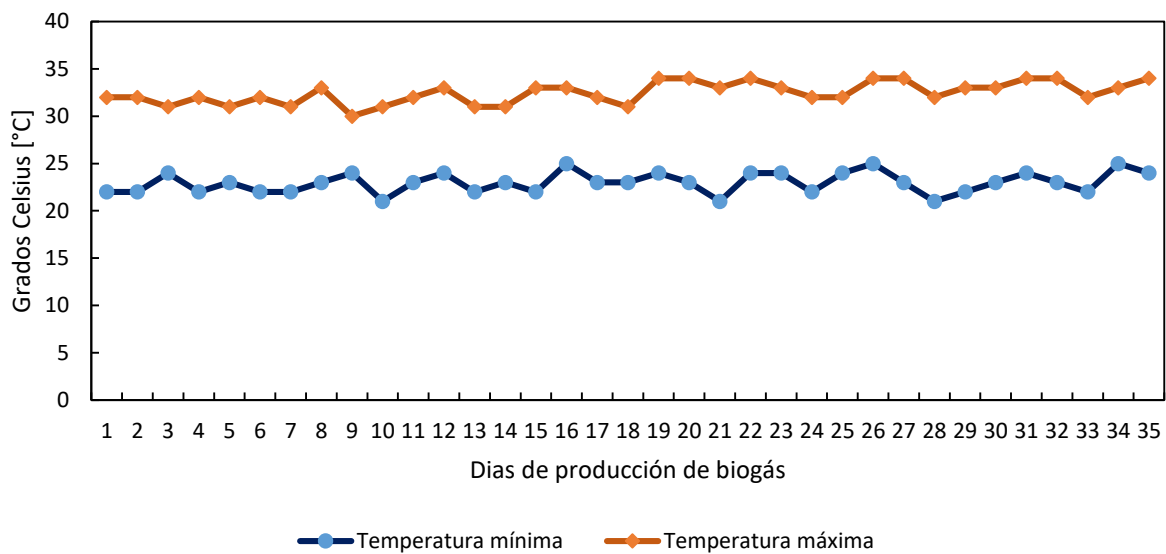


Ilustración 27 Medición de temperatura ambiente durante el experimento

Fuente: Elaboración propia

5.2 OBTENCIÓN DE POME

El POME es el sustrato elegido para el experimento de viabilidad técnica, este fue obtenido con una planta extractora, con la cual también se obtuvieron los parámetros fisicoquímicos del mismo POME a utilizar para el experimento.

5.2.1 VISITAS TÉCNICAS

Para la obtención del POME se contactó una planta de extracción de aceite de palma africana, ubicada en Cortés, Honduras. Con la planta extractora se programó visitas técnicas para observar los procesos de extracción, los procesos de clarificación del aceite y los subproductos del proceso de extracción.



Ilustración 28 Visita Técnica en planta Extractora de ACP en Honduras

Fuente: Elaboración propia con planta de ACP en Honduras y Asesor temático

Para comenzar las visitas técnicas se dio un recorrido por las etapas de la extracción de aceite, comenzando por la báscula que pesa los camiones para obtener el peso neto del fruto que llega a la planta extractora. Luego de ser pesado en la báscula, la fruta es pasada por un método de esterilización, siendo esta la primera etapa de producción de producción de efluentes líquidos, lodos o grasas. Luego de la esterilización se llega al proceso de desfrutado con un tambor para separar el fruto del racimo. Luego es transportado por bandas transportadoras al digester.



Ilustración 29 Banda transportadora a etapa de digestión

Fuente: Elaboración propia en Planta extractora de ACP en Honduras

Se observaron las etapas de digestión y clarificado, las cuales son las etapas más productoras de efluente líquido, lodos y grasas. La etapa de digestión y clarificado hace uso de agua y vapor a alta temperatura, para remover impurezas del aceite extraído del fruto de palma. En la etapa de clarificación los efluentes son mezclas de lodo, lípidos, grasas y aceite restante que se filtra en la sección de efluentes.



Ilustración 30 Etapa de digestión y Clarificación en planta ACP en Honduras

Fuente: Elaboración propia

La etapa de clarificación es la etapa final del proceso, en el cual ya se obtiene el producto de valor agregado, que es, el aceite de palma. El aceite de palma tiene varios usos en la industria farmacéutica, la industria gastronómica y en la industria de cosméticos.

Los efluentes sólidos del proceso de extracción de aceite de palma son todos los racimos vacíos que representan aproximadamente el 64% del peso neto del peso de entrada en la planta extractora. Estos efluentes sólidos son usados para biomasa. Los efluentes líquidos a diferencia de los sólidos, tienen su propio sistema de conducción para discriminación entre el aceite y los efluentes. Se utilizan tuberías y lagunas de oxidación para el tratamiento de estos.



Ilustración 31 Sistema de conducción de efluente en planta de ACP en Honduras

Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Recolección de POME

Para la recopilación del POME, se utilizaron dos salidas del sistema de efluentes líquidos del proceso de extracción, utilizando efluente sin digerir, recién producido por el proceso de extracción de aceite. Se obtuvo otro efluente ya previamente digerido para acelerar los procesos de producción de biogás.



Ilustración 32 Obtención de POME sin digerir en planta de ACP en Honduras

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 32 se observa la recolección de POME sin digerir en la salida inicial del proceso de extracción de aceite de palma.



Ilustración 33 Vertimiento de POME sin digerir en compartimiento para biodigestor

Fuente: Elaboración propia

Se recolectaron 18 litros de POME, entre ellos repartidos entre POME sin digerir y POME previamente digerido para realizar el proceso de evaluación técnica para determinar si el sustrato es apto para producción de biogás.



Ilustración 34 Obtención de POME previamente digerido

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 35 Vertimiento de POME digerido en compartimiento para biodigestor

Fuente: Elaboración propia

5.3 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL POME

Para la obtención de los parámetros fisicoquímicos del POME se realizaron pruebas de laboratorio y se recopilaron datos de pruebas elaboradas por parte de la empresa con laboratorios certificados para utilizar métodos de calidad del Standard Methods of Water and Wastewater, utilizar métodos de laboratorio de la American Works Association y el acuerdo 58-96 sobre la Norma de Calidad para la Descarga de Aguas Residuales en Cuerpos Receptores.

5.3.1 MEDICIÓN DE PH

Para la medición de pH se utilizó un beaker para verter la mezcla previamente obtenida y un instrumento medidor de pH. Las mediciones se realizaron previamente a realizar el sellado del biodigestor, debido a que el diseño elegido fue un biodigestor tipo batch sin posibilidad de retirar o ingresar más POME.

Se realizaron 2 mediciones diferentes, con 3 días de diferencia para observar la variación del pH.



Ilustración 36 Medición de pH de POME

Fuente: Elaboración propia con asesor temático

Tabla 6 Resultado de medición de pH

Fecha	Título de muestra	Valor pH
26/07/2022	POME (I)	4.51
29/07/2022	POME (II)	4.40

Fuente: Elaboración propia

5.3.2 MEDICIÓN DE DQO Y DBO

La medición de DQO Y DBO es un parámetro fisicoquímico necesario para entender el comportamiento del POME a la hora de realizar la digestión anaeróbica. La demanda química y bioquímica de oxígeno representan la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación química y bioquímica.

Se realizaron tres pruebas de los parámetros de DQO y DBO, una acompañado del asesor temático, con soluciones de: 100:1, 150:1 y 200:, utilizando la solución química Dióxido de Cromo.

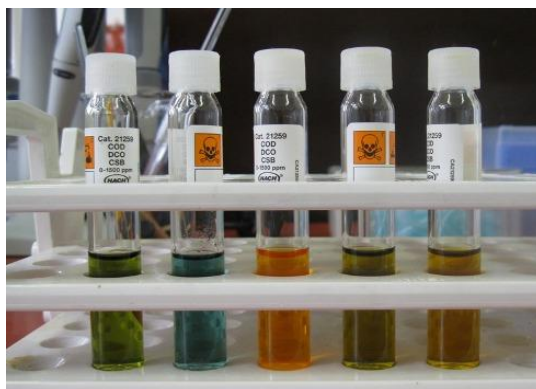


Ilustración 37 Mediciones de DQO Y DBO en 100:1, 150:1 y 200:1

Fuente: Elaboración propia acompañado de asesor temático

Tabla 7 Resultados de medición de DQO

Fecha	Título de muestra	Solución	DQO [mg/L]
28/07/2022	POME	100:1	74.942
	POME	150:1	79.881
	POME	200:1	75.921

Fuente: Elaboración propia con Asesor Temático

Tabla 8 Resultados de medición de DBO

Fecha	Título de muestra	Solución	Valor DBO [mg/L]
28/07/2022	POME	100:1	39.832
	POME	150:1	42.501
	POME	200:1	41.254

Fuente: Elaboración propia con Asesor Temático

5.3.3 MEDICIÓN DE MASA SECA

La medición de masa seca es el resultado de realizar un secador para la eliminación del agua del sustrato a medir y luego pesar la cantidad de sustrato colocado. Este resultado es la cantidad de masa orgánica e inorgánica del sustrato. El resultado de la medición determina el porcentaje de masa seca en el sustrato.



Ilustración 38 Medición de masa seca

Fuente: Elaboración propia con Asesor temático

Tabla 9 Resultado de medición de masa seca

Fecha	Título de muestra	Masa seca [%]
28/07/2022	POME	8.12

Fuente: Elaboración propia con Asesor temático

5.3.3 MEDICIONES DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN LABORATORIO AGROINDUSTRIAL

Junto con la planta extractora de aceite de palma donde fue obtenido el efluente se realizaron mediciones en un laboratorio agroindustrial. Estos análisis del efluente son necesarios para las plantas para su cumplimiento con los parámetros establecidos en las licencias ambientales otorgadas para la operación de la planta.

Tabla 10 Resultado de mediciones de parámetros fisicoquímicos en laboratorio agroindustrial

Parámetros	Método	Unidades	Normas	Resultado
Color	HACH 8025	UPtCo	<200	11,400
DQO	5220C	mg/L	200.00	102,000
DBO	5210B	mg/L	50.00	30,500
Grasas y aceites	5520D	mg/L	10.00	1,650
pH	4500-HB	-	6.0-9.0	4.69
Sólidos disueltos	2540C	mg/L	-	29,760
Sólidos sedimentables	2540F	mL/L/h	1.0	1,000
Sólidos suspendidos	2540D	mg/L	100.0	39,866.7
Temperatura	2550B	°C	<25.0	25.0

Fuente: Ver anexos

5.4 ELABORACIÓN DE BIODIGESTOR A ESCALA

Para realizar el biodigestor se utilizaron dos garrafones de agua, esto debido a que el garrafón de efluente se encontraba a máxima capacidad, por lo que fue necesario vaciar cierta cantidad para dar espacio para realizar el proceso de biogás.



Ilustración 39 Vertimiento en segundo garrafón

Fuente: Elaboración propia

Para el objetivo de la producción de biogás se realizó una mezcla de dos tipos de efluentes del proceso de extracción de aceite de palma, estos siendo el POME puro, recién salido del proceso de extracción y el POME con un proceso previo de oxidación para ser un efluente previamente digerido.

Tabla 11 Mezcla de biodigestor

Materia	Tipo	Unidad	Cantidad
Líquida	Efluente fresco	L	8.5
Líquida	Efluente digerido	L	6

Fuente: Elaboración propia

El resultado final del biodigestor se puede observar en la ilustración 35. El biodigestor elegido para la evaluación del sustrato fue un biodigestor tipo batch. Se utilizó un neumático de bicicleta para cumplir la función de almacenamiento de biogás producido y liberar presión dentro del biodigestor. Al liberar presión dentro del biodigestor ayuda a que el biogás producido no se escape del garrafón y toda la presión por el proceso anaeróbico sea regulada con el neumático actuando como cámara de gas.



Ilustración 40 Elaboración de biodigestor

Fuente: Elaboración propia

5.5 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La producción de biogás fue uno de los objetivos principales de la investigación, por lo que se realizaron mediciones para cuantificar la producción en intervalos de 24 horas y ver como las variables independientes afectaban directamente a la producción de biogás.

5.5.1 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Las altas temperaturas ambiente del lugar donde fue ubicado el biodigestor ayudaron a acelerar el proceso de digestión anaeróbica, en el cual en el día 5 ya presentaba evidencias visuales de la digestión anaeróbica en proceso.



Ilustración 41 Evidencia de etapa de hidrólisis en biodigestor

Fuente: Elaboración propia

La producción de biogás comenzó a mediados de la semana dos de haber comenzado el proceso de digestión anaeróbica en el biodigestor elaborado con efluente del proceso de extracción de aceite de palma africana.

5.5.2 MEDICIÓN DE BIOGÁS

Para medir el biogás producido por día se utilizó el método de desplazamiento de agua, esto porque el biogás tiene la propiedad adecuada para este método, la cual es, no ser un gas que se disuelva en agua.

5.5.3 Método de desplazamiento de agua

Para realizar el método de desplazamiento de agua se utilizó una hielera llena de agua y una taza medidora con capacidad de 1 [L], con intervalos de 100 [ml]. La taza medidora fue sumergida totalmente para evitar restos de aire que pudieran alterar las mediciones.



Ilustración 42 Método de desplazamiento de agua

Fuente: Elaboración propia

Para realizar las mediciones diarias se introdujo la manguera por debajo de la taza y se abrió la válvula de bola para que el biogás fuera conducido a la manguera y desplazara el agua de la taza. El resultado de este método fue el espacio desplazado de agua que fue medido en [ml].



Ilustración 43 Medición de producción de biogás

Fuente: Elaboración propia

5.5.4 RESULTADOS DE MEDICIONES DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Utilizando el método de desplazamiento de agua se realizaron mediciones desde la semana dos de haber comenzado el proceso de digestión anaeróbica. Hasta mediados de la semana dos se observaron los primeros datos de producción de biogás. Se observó que los días con temperaturas ambientales más elevadas aumentaron los datos de producción de biogás.

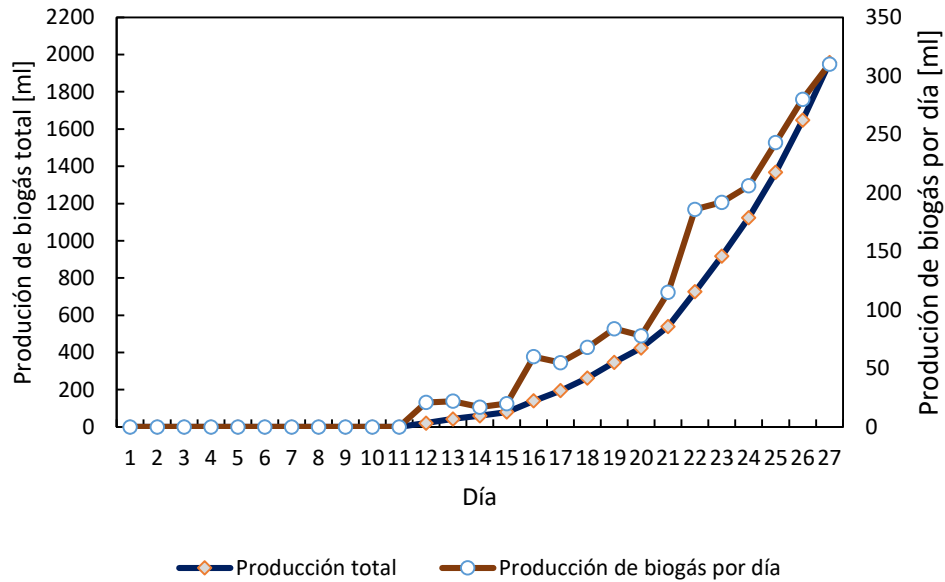


Ilustración 44 Resultados de producción de biogás

Fuente: Elaboración propia

La producción de biogás es directamente afectada por la temperatura y la agitación del sustrato, esto debido a que la temperatura es la que afecta directamente la velocidad del proceso de la digestión anaeróbica y la agitación ayuda a crear una mezcla homogénea del sustrato y evitar que se creen capas de espuma y sedimentos en la parte superior del biodigestor, las cuales pueden evitar la ascensión del biogás.

A lo largo de la investigación se cambiaron las cantidades de agitaciones al sustrato por día para cuantificar el efecto que tenía la agitación en la producción de biogás. Se pudo observar que la cantidad de producción de biogás disminuyó cuando no se realizaban agitaciones en el día medido y consecuentemente también aumentó la producción cuando se realizaron dos agitaciones por día.

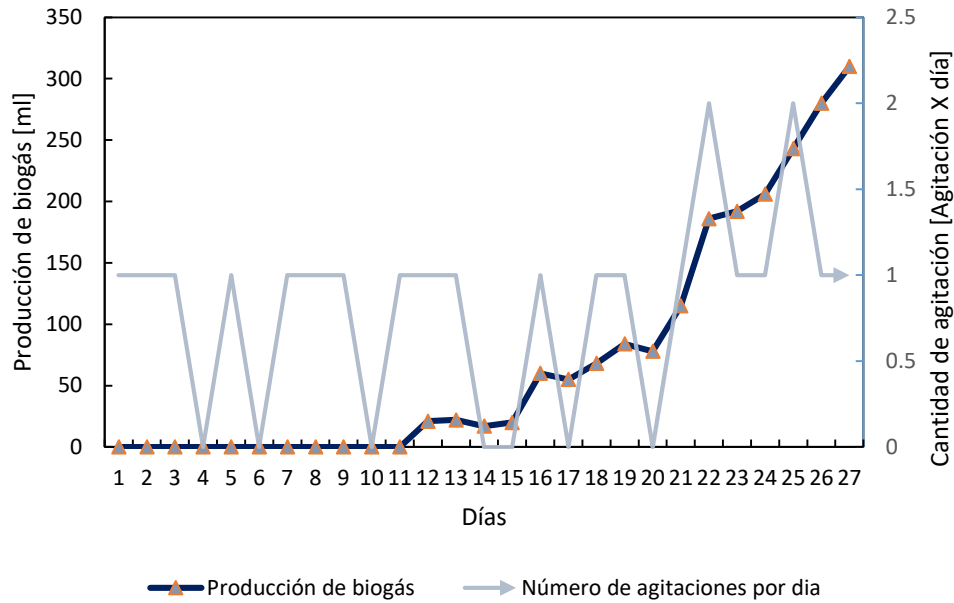


Ilustración 45 Resultados de agitación en producción de biogás

Fuente: Elaboración propia

5.5.5 SIMULACIÓN EN BIODIGESTOR PRO

Para realizar la simulación de producción de biogás se utilizó el software *Biodigestor Pro* en el cual se ingresaron datos del efluente, volumen de efluente utilizado para el biodigestor, diseño del biodigestor, niveles de masa seca y niveles de masa volátil para realizar el dimensionamiento del biodigestor en el software.

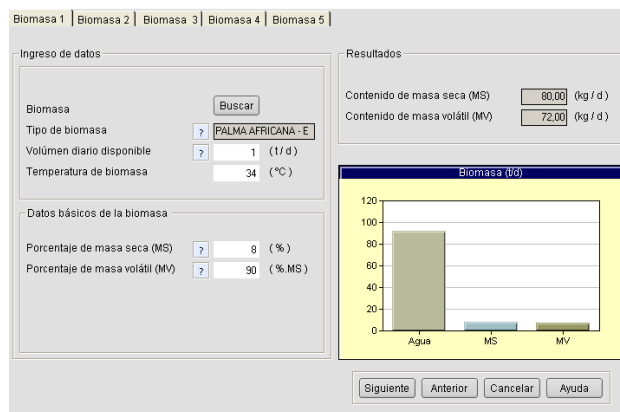


Ilustración 46 Datos de volumen para el biodigestor en software Biodigestor Pro

Fuente: Elaboración propia

5.5.5.1 DIMENSIONAMIENTO DE BIODIGESTOR EN SOFTWARE BIODIGESTOR PRO

Con los datos obtenidos del resultado del ingreso de datos de volumen necesarios del biodigestor se realizó el dimensionamiento del biodigestor en el software.

Parámetro	Valor	Unidad
Volúmen total de biomasa	1,00	(t/día)
Masa seca de la mezcla (MS)	80,00	(kg /día)
Masa volátil de la mezcla (MV)	72,00	(kg /día)
Tasa de dilución recomendada	10	(%)
Volúmen de agua adicional para mezcla	0,00	(m3)
Volúmen total de afluente al digestor	1,00	(m3/día)
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	22	(días)
Volúmen requerido de biodigestor	22,00	(m3)
Margen de seguridad	2	(%)
Volúmen seleccionado de biodigestor	22,44	(m3)
Temperatura de proceso	43,00	(°C)
Carga orgánica volumétrica	3,21	(kg/m3.d)

Ilustración 47 Dimensionamiento de biodigestor en software Biodigestor Pro

Fuente: Elaboración propia

5.5.5.2 DISEÑO DEL BIODIGESTOR EN SOFTWARE BIODIGESTOR PRO

Se realizó un diseño de biodigestor con los datos geométricos y de implantación otorgados por el software.

Implantación de biodigestores

Sobre tierra: Acero, Hormigón

Bajo tierra: Membrana, Hormigón

Asignar el volumen máximo de cada biodigestor

Volúmen total requerido (cálculo): 22 (m3)

Número de biodigestores: 1

Volúmen máximo de cada biodigestor: 22 (m3)

Profundidad de cada biodigestor: 4,00 (m)

Borde libre: 0,50 (m)

Altura total: 4,50 (m)

Tanque de alimentación y mezcla

Volúmen recomendado: 1,00 (m3)

Profundidad máxima recomendada: 1,20 (m)

Número de tanques: Un tanque para cada biodigestor, Un tanque para todos los biodigestores

Forma del tanque: Circular, Rectangular

Relación largo / ancho: 1,50

Forma del biodigestor: Circular, Rectangular

Relación largo ancho: 1, 1,50

Inclinación de talud 1:n: 1, 1,00 n

Tanque de descarga

Volúmen recomendado: 3,00 (m3)

Profundidad máxima: 1,20 (m)

Relación largo ancho: 1, 1,50

Ilustración 48 Datos geométricos y de implantación en software Biodigestor Pro

Fuente: Elaboración propia

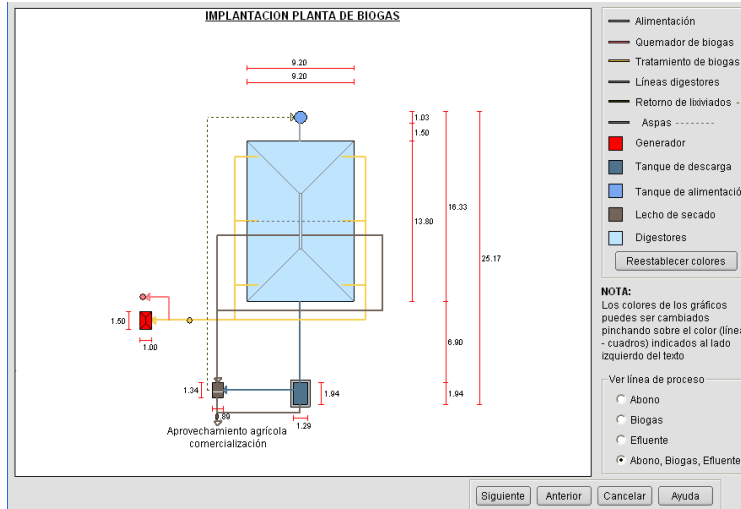


Ilustración 49 Diseño de planta de biogás en software Biodigestor Pro

Fuente: Elaboración propia

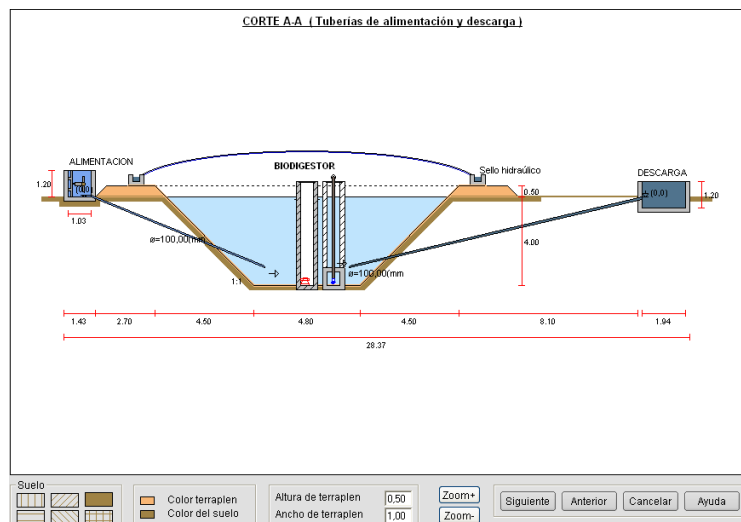


Ilustración 50 Corte lateral de diseño en software Biodigestor Pro

Fuente: Elaboración propia

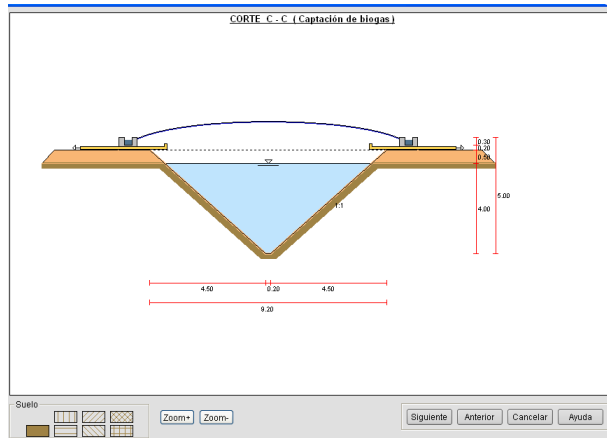


Ilustración 51 Sistema de captación de biogás en software Biodigestor Pro

Fuente: Elaboración propia

5.5.5.3 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN SOFTWARE BIODIGESTOR PRO

Con los datos de volumen del efluente disponible se logró realizar el dimensionamiento del biodigestor. Con los datos de dimensionamiento se realizaron los diseños de la planta de biogás, tuberías de alimentación y descarga y el diseño del sistema de captación de biogás. El resultado del diseño y el dimensionamiento son los datos de producción de biogás de la planta de biogás diseñada.

Estimación de producción de biogás y toneladas equivalentes CO2			
Eficiencia de remoción MV	?	55,19 (%)	39,74 (kg/día)
Producción de metano CH4	?	21,86 (m3/d)	7,979 (m3/año)
Porcentaje metano en biogás	?	60 (%)	
Producción de biogás	?	36,43 (Nm3/d)	13,297 (Nm3/año)
Producción de metano CH4	?	0,02 (t/d)	7 (t/año)
Toneladas equivalentes CO2	?	147,00 (t/año)	

Producción específica biogás (Nm3)			
Por m3 de biodigestor		1,62	(m3/día)
Por m3 de biomasa		36,43	(m3/m3)
Por kg masa seca		0,46	(m3/kg.MS)
Por kg masa volátil		0,51	(m3/kg.MV)

Producción específica CH4 (Nm3)			
Por m3 de biodigestor		0,97	(m3/día)
Por m3 de biomasa		21,86	(m3/m3)
Por kg masa seca		0,27	(m3/kg.MS)
Por kg masa volátil		0,30	(m3/kg.MV)

Energía total disponible para la unidad de generación			
Producción de biogás		36,43 (Nm3/d)	13,297 (Nm3/año)
Grado total de eficiencia unidad de generación	?	85 (%)	
Producción de energía total bruta	?	185	(kWh/día)

Producción de energía eléctrica			
Eficiencia eléctrica sistema de generación	?	35 (%)	
Generación de energía eléctrica por día		65	(kWh/día)
Generación de energía eléctrica por mes		1,969	(kWh/mes)
Generación de energía eléctrica por año		23,634	(kWh/año)
Horas de operación por día		24	(horas)
Potencia eléctrica nominal de generador		3	(kWel)*

Producción de energía calorífica			
Eficiencia calorífica sistema de generación	?	65 (%)	
Producción de energía calorífica		120	(kWh/día)
Potencia calorífica		5	(kW)

Equivalencias energéticas biogás			
	(Por día)	(Por año)	
Biogás (Nm3)	36	13,297	
BTU	771,986	281,774,854	
Mega Joule	814	297,288	
M.cal	195	71,006	
MWhe	0	24	
HP.h	304	110,935	
BHP	23	8,417	
Ton TNT	0	71	

(*) Se recomienda que se instale una unidad de generación con una potencia del 20% mayor que la nominal: en éste caso: 3,60 (kW)

Figure 52 Datos de producción de biogás en software Biodigestor Pro

Fuente: Elaboración propia

5.6 ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA

Para el análisis de la viabilidad técnica se realizó por etapas, comenzando por la etapa número uno del análisis del biodigestor. Se comprobó que el biodigestor cumplía con las funciones deseadas, con un sellado sin fugas, un sistema de conducción sin fugas y con la capacidad de resistir las presiones del biodigestor y un compartimiento de almacenamiento de biogás apto para la investigación debido a que no presentó fugas, resistió las altas temperaturas, empapamiento por inevitables lluvias durante el proyecto y liberó presiones del biodigestor.



Ilustración 53 Sistema de almacenamiento de biogás en semana 3 del proyecto

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 54 Sistema de almacenamiento de biogás en semana 6 del proyecto

Fuente: Elaboración propia

La etapa número dos se basó en las pruebas de combustión del biogás creado, se realizaron pruebas durante toda la última semana para obtener certeza que el biogás tenía propiedades aptas de combustión y poder determinar que en una planta extractora de aceite de palma africana se pudieran implementar biodigestores de mayor escala, combustionar el biogás y utilizarlo como un combustible alternativo para generar energía eléctrica o utilizarlo directamente como combustible.



Ilustración 55 Prueba de combustión de biogás

Fuente: Elaboración propia

VI. CONCLUSIONES

Aplicando el biodigestor para hacer la prueba del sustrato se obtuvieron resultados para obtener conclusiones sobre los objetivos de la investigación. Los resultados fueron obtenidos en dos etapas, comenzando por la etapa número uno, la cual hace énfasis en los parámetros fisicoquímicos del sustrato. Se realizaron mediciones propias y mediciones en un laboratorio agroindustrial para tener dos perspectivas diferentes para evaluar que parámetros fisicoquímicos son aptos para la producción de biogás. La segunda etapa se centró en la producción de biogás y como las variables independientes afectan directamente la producción de biogás. Con los resultados obtenidos de ambas etapas se llegó a las conclusiones presentes:

- A partir de los análisis propuestos, se determinaron que los parámetros de DQO, DBO, pH y sólidos totales de la muestra utilizada en el biodigestor produjeron biogás.

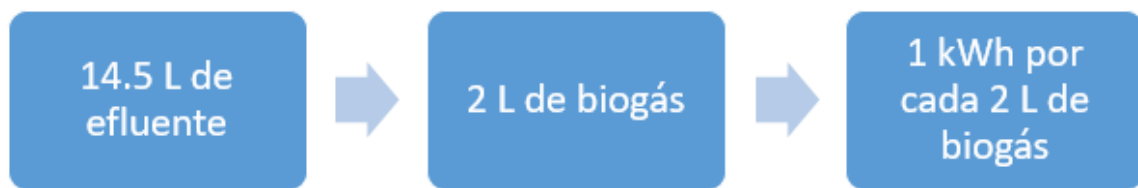


Ilustración 56 Potencial energético de biogás producido en biodigestor prototipo

Fuente: Elaboración propia

- Resumiendo el proceso de producción de biogás, se aplicó un ambiente anaeróbico para realizar digestión anaeróbica del sustrato para la producción de una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono.
- A partir de observar el comportamiento de la combustión del biogás se concluye que implementando una turbina de gas o de vapor se puede generar energía en una planta de extracción de aceite de palma con el biogás a base de efluente del proceso realizado en planta.

VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar biodigestores de alta capacidad volumétrica para tener la mayor capacidad de efluente posible para el proceso de digestión anaeróbica, esto debido a que, mientras mayor sea el volumen de efluente, mayor será la producción de biogás. Entre mayor sea el volumen del POME, mayor será el potencial de producción de biogás porque se presenta una mayor concentración de carga orgánica y población bacteriana junta para acelerar los procesos de producción de biogás.
- Se recomienda dimensionar la planta de biogás, realizando estudios de demanda eléctrica de la planta para cubrir el consumo habitual de la planta. Se recomienda inyectar todo excedente de energía eléctrica de la planta de biogás para generar un beneficio monetario para la planta extractora.
- Para evaluar un sustrato y analizar si es factible para la producción de biogás se recomienda usar el tamaño mínimo de biodigestor posible, esto debido a que al ser un experimento de evaluación de factibilidad de un sustrato, es posible que no sea apto y así evitar altos costos por un proyecto que no será viable luego.
- Se recomienda realizar una simulación si se quiere elaborar en un proyecto en una escala mayor a la usada en la investigación, esto para tener un apoyo previo para el dimensionamiento del proyecto.

VIII. APLICABILIDAD

Se espera que la presente investigación impulse a las empresas extractoras de aceite de palma africana a implementar el método de producción de biogás en sus plantas productoras. El proceso completo de producción de biogás apunta a implementar una economía circular para las empresas extractoras de aceite de palma, esto debido a que todos los productos y subproductos del proceso son útiles para el proceso de extracción. Se busca generar energía eléctrica con la combustión del biogás producido o ser utilizado como combustible alternativo para la planta y todos los excedentes que obtenga de estos procesos pueden ser vendidos al inyectarlos a la red o vender el biogás como combustible alternativo. En los biodigestores implementados tendrán como producto principal la reducción de carga orgánica para las aguas residuales y como subproducto se generarán lodos digeridos que pueden ser utilizados como abonos orgánicos para impulsar la cosecha de la palma africana, para así crear una economía circular para las plantas extractoras y apoyando los objetivos ambientales del sector agroindustrial de la palma africana.

IX. BIBLIOGRAFÍA

Afoakwa, E. O. (2013). *Palm Oil Processing Technology*.

<https://doi.org/10.13140/2.1.1629.2647>

Briceño, I., Valencia, J., & Posso, M. (2015). Potencial de generación de energía de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. *Palmas*, 36(3), 43–53.

Brito Sauvanell, A. L. (2011). *Modelo de biodigestor para purines de cerdo en la Utmach. Revista de Biotecnología*, 2. 7.

Calbry-Muzyka, A., Madi, H., Rüsçh, F., Gandiglio, M., & Biollaz, S. (2021).

Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy*, 181.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.100>

Casanovas, G., Della Vecchia, F., Reymundo, F., & Serafini, R. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Secretaría de Agroindustria.

Corona Zúñiga, I. (2007). *Biodigestores*.

<http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/362/Biodigestores.pdf?sequence=1>

Das, M., & Mahanta, P. (2014). *Effect of temperature on biogas production from lignocellulosic biomasses* (p. 121).

<https://doi.org/10.1109/ICONCE.2014.6808702>

Farraji, H., Dahlan, I., & Eslamian, S. (2021). *Water Recycling from Palm Oil Mill Effluent*. 307–320. <https://doi.org/10.1002/9781119478911.ch20>

Fedepalma. (2020). *Anuario estadístico 2020: Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia*.

<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/article/view/13235/13024>

Gancone, A., Bumbiere, K., Pubule, J., & Blumberga, D. (2020). *Sustainable biogas application in energy sector* (p. 4).

<https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316593>

González-Cardenas, A. (2016). *La agroindustria de la palma de aceite en América*. 37, 215–228.

Grepalma. (2019). *Anuario estadístico 2018-2019: Agroindustria sostenible de aceite de palma*. Gremial de palmicultores de Guatemala.

https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2020/04/Anuario_estadistico_2018_2019.pdf

- Ibegbulam-Njoku, P., & Achi, O. (2014). Biodegradation of Palm Oil Mill Effluent. *British Microbiology Research Journal*, 4, 1440–1450.
<https://doi.org/10.9734/BMRJ/2014/12008>
- Iskandar, M. J., Baharum, A., Anuar, F. H., & Othaman, R. (2018). Palm oil industry in South East Asia and the effluent treatment technology—A review. *Environmental Technology & Innovation*, 9, 169–185.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.11.003>
- Kamyab, H., Chelliapan, S., Md Din, M. F., Rezania, S., Khademi, T., & Nadda, A. (2018). *Palm Oil Mill Effluent as an Environmental Pollutant* (pp. 13–28). <https://doi.org/10.5772/intechopen.75811>
- Kougias, P. G., & Angelidaki, I. (2018). Biogas and its opportunities—A review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 12(3), 14.
<https://doi.org/10.1007/s11783-018-1037-8>
- Kushairi, A., & Nambiappan, B. (2018). *Malaysia's Palm Oil Supply and Demand for 2017 and Outlook for 2018*.
- Lai, O.-M., Tan, C.-P., & Akoh, C. C. (2012). *Palm Oil: Production, Processing, Characterization, and Uses* (Vol. 1). AOCS Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-9818936-9-3.50004-6>

Laiq Ur Rehman, M., Iqbal, A., Chang, C., Li, W., & Ju, M. (2019). Anaerobic Digestion. *Water Environment Research*, 91.

<https://doi.org/10.1002/wer.1219>

Lokman, N. A., Ithnin, A. M., Yahya, W. J., & Yuzir, M. A. (2021). A brief review on biochemical oxygen demand (BOD) treatment methods for palm oil mill effluents (POME). *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101258.

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101258>

Martínez Valencia, P., Yáñez Angarita, E., & García Núñez, J. (2011). *Estudio de los efluentes líquidos de las plantas de beneficio de palma africana, orientado al cumplimiento de normas ambientales*. Cenipalma.

<https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/Estudio%20efluentes%20liquidos%20Cenipalma.pdf>

Mohammad, S., Baidurah, S., Kobayashi, T., Ismail, N., & Peng, L. C. (2021). Palm Oil Mill Effluent Treatment Processes-A Review. *Processes*, 9.

<https://doi.org/10.3390/pr9050739>

NASA. (2021). *POWER data global climate access viewer*.

<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Ngan, M. (2002). *Innovaciones en el manejo del efluente de las plantas extractoras de aceite de palma* (2nd ed., Vol. 21). Revista Palmas.

<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/733>

Ortiz A, E., & Alfaro C, M. (2006). *Proceso de producción del aceite de palma*.

Ministerio de agricultura.

Parra, B., Torres Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L., Cardenas, L., Vásquez, C.,

Torres, W., & Ordonez, J. (2014). INFLUENCE OF pH ON ANAEROBIC DIGESTION OF MUNICIPAL BIO-WASTES. *Revista UDCA Actualidad y Divulgacion Cientifica*, 17, 553–562.

Repsa Agroindustria Palma. (2019). *Procedimiento de tratamiento de efluente de planta extractora de aceite de palma*. Grupo HAME.

<https://repsa.com.gt/wp-content/uploads/2021/02/Procedimiento-tratamiento-efluente-REPSA.pdf>

Rincón M., S. M., & Martinez C., D. M. (2009). *Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria*. Cenipalma.

<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1432/1432>

Sawyerr, N., Trois, C., Seyoum Workneh, T., & Okudoh, V. (2019). An Overview of Biogas Production: Fundamentals, Applications and Future Research.

International Journal of Energy Economics and Policy, 9, 105–115.

<https://doi.org/10.32479/ijeep.7375>

Schleicher, T., & Hilbert, I. (2019). *Production of Palm Oil in Indonesia*.

<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/BioMacht-palm-oil-report.pdf>

Secretaría de Salud. (1997). *Normas Técnicas de las descargas de agua residuales a cuerpos receptores y alcantarillado sanitario 058-96*. Gobierno de la Republica de Honduras. <http://h1.honducompras.gob.hn/Docs/Lic480BID-Mdej-002-2009407-EnmiendaoAdendum.pdf>

Shahbandeh, M. (2019). *Palm oil industry worldwide—Statistics & facts*.

https://www.statista.com/topics/6079/global-palm-oil-industry/#topicHeader__wrapper

Sierra, J., Olivero, J., & Márquez, L. (2017). Potencial económico de la palma aceitera. *Agronomía Mesoamericana*, 28(2), 523–534.

<https://doi.org/10.15517/ma.v28i2.25927>

Suárez, V., Suarez Chernov, V., López Díaz, I., & Álvarez González, M. (2019). ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE PROCESOS. *Revista Centro América Odontológica*, 64, 73–85.

Tan, A. (2006). By-products of palm oil extraction and refining. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 13, 9–11. <https://doi.org/10.1051/ocl.2006.8888>

Tian, Y., Zhang, H., Chai, Y., Wang, L., Mi, X., Zhang, L., & Ware, M. (2017). Biogas properties and enzymatic analysis during anaerobic fermentation of *Phragmites australis* straw and cow dung: Influence of nickel chloride supplement. *Biodegradation*, 28. <https://doi.org/10.1007/s10532-016-9774-5>


UPEG & USDA. (2019). *Palma Africana: Análisis de Coyuntura*. Secretaría de Agricultura y Ganadería. <https://www.upeg.sag.gob.hn/wp-content/uploads/2021/07/AC-PALMA-V20.1.pdf>

WeatherSpark. (2021a). *Humidity in San Pedro Sula*. <https://es.weatherspark.com/h/y/12985/2021/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-2021-en-San-Pedro-Sula-Honduras#Sections-Humidity>

WeatherSpark. (2021b). *Temperatura Promedio en San Pedro Sula*. <https://weatherspark.com/h/y/12985/2022/Historical-Weather-during-2022-in-San-Pedro-Sula-Honduras#Sections-Temperature>

Yusoff, S. (2006). Renewable energy from palm oil—Innovation on effective utilization of waste. *Journal of Cleaner Production - J CLEAN PROD*, 14, 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.07.005>

X. ANEXOS

 <p>Laboratorios Agroindustriales de Centroamérica</p>	<p>INFORME DE RESULTADOS DE ANALISIS FISICOQUÍMICOS AGUA RESIDUAL</p>	<p>Código: RT-91 Versión: 8</p>
--	--	--

Interesado:	Empresa Extractora	No. Muestra:	FQ0570CH-AG
Atención:	Ing.	Fecha/Hora de Colecta:	Conocido por el cliente
Tel. - Fax:	Cel:	Fecha/Hora de Recepción:	2022-07-27/12 h 30 min
Dirección:	Honduras	Fecha/Ejecución del Análisis:	2022-07-28 Al 2022-08-03
Colectada por:	El cliente	Fecha/Emisión del Resultado:	2022-08-05

DETALLE DE LA MUESTRA

Muestra Analizada en:	Honduras	Plan de Muestreo/S.S.A.:	N/A / 0326
Tipo de Muestra:	Conocido por el cliente	Instructivo de Muestreo:	N/A
Cantidad de Muestras:	1	No. Cotización:	2813
Identificación:	Entrada	Punto de Colecta:	Conocido por el cliente
Observaciones:	Muestra suministrada por el cliente		

Análisis Físico - Químicos

Parámetros	Método	Unidades	Normas	Resultado
Color Verdadero	HACH 8025	UPTCo	< 200	11 400,0
Demanda Química de Oxígeno	5220C	mg/L	200,0	102 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	5210B	mg/L	50,0	30 500
Grasas y Aceites (Hexano)	5520D	mg/L	10,0	1 650,0
pH	4500-H*B	—	6,0 - 9,0	4,69
Sólidos Disueltos Totales	2540C	mg/L	-	29 760,0
Sólidos Sedimentables	2540F	mL/L/h	1,0	1 000,0
Sólidos Suspendidos Totales	2540D	mg/L	100,0	39 866,7
Temperatura	2550B	°C	< 25,0	25,0
-----UL-----				

Nota: Los resultados detallados en este documento, corresponden solamente a las muestras analizadas en el laboratorio.
Este resultado no debe ser reproducido, excepto en su totalidad, sin autorización de Laboratorios Agroindustriales de Centroamérica

Método: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd. edition, 2017

** Método: Manual de Laboratorio de la AMERICAN WORKS ASSOCIATION, 2da. edición

Normas: Nivel Máximo Permitido, según acuerdo No. 58 de 1996, Norma de Calidad para la Descarga de Aguas Residuales en Cuerpos Receptores

mg/L:	Miligramos/Litros (ppm)	UPTCo:	Unidades Platino Cobalto	mL/L:	Mililitros/Litros	µS/cm:	Micro Siemens por centímetro
µg/L:	Microgramos/Litro (ppb)				N.T.U.:		Unidades Nefelométricas de Turbidez
°C:	Temperatura, Grados Celsius				UL:		Ultima Línea
ND:	No Detectable						
(mg/L)	Asterisco (*)		Parámetro Subcontratado				
N/A:	No Aplica						