

ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO ANAERÓBICO PARA
LOS EFLUENTES PROCEDENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE
DE PALMA



ANDREINA PÉREZ SALINAS

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS
BIOLOGIA
COLOMBIA

2019

ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO ANAERÓBICO PARA
LOS EFLUENTES PROCEDENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE
DE PALMA

ANDREINA PÉREZ SALINAS

TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADA(O) COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
BIOLOGA

DIRECTOR:

Ph.D. JACIPT ALEXANDER RAMÓN VALENCIA

CODIRECTORA:

MSC. ERIKA ALEXANDRA GUERRERO CÁRDENAS

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL Y GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUAS

GRUPO DE INVESTIGACIÓN:

INVESTIGACIONES AMBIENTALES, AGUA, AIRE Y SUELO
(GIAAS)

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAS DE CIENCIAS BÁSICAS
PAMPLONA, COLOMBIA

2019

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

Nota de aceptación

Firma Jurado 1

Firma Jurado 2

Dedicatoria

*Agradezco principalmente a DIOS por estar siempre a mi lado, a mi abuela **ADOLFINA TORRES DE SALINAS**, porque cuando mis padres no estaban presentes eras tú quien suplía ese lugar, además de mi abuela fuiste mi segunda madre que junto con mi abuelo aportaron muchos valores en mi vida que son invaluable, los amaré infinitamente.*

*A mi madre **INES SALINAS TORRES** por ser el pilar más importante por dedicarme siempre su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y por darme la oportunidad de estudiar una carrera profesional, seguidamente a mi padre **PEDRO JOSE PÉREZ SEHUANES** por su apoyo económico a lo largo de mi formación académica.*

*A **PEDRO LUIS ALVARADO GONZALEZ** por su amor, consejos y palabras de aliento en los momentos difíciles y darme fuerza para seguir adelante para no desfallecer en el intento, gracias.*

*A mi hermana **YELITZA PÉREZ SALINAS** por siempre creer en mí y en mis capacidades
A mis sobrinos **DULCE MARIA OSORIO PÉREZ Y CRISTOPHER OSORIO PÉREZ**
por ser el más grande regalo que me ha dado la vida.*

AGRADECIMIENTOS

A La **UNIVERSIDAD DE PAMPLONA** y **EL LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD** por permitirme sus instalaciones para el desarrollo de este proyecto.

Al Ingeniero **FERNAN BONILLA** por permitirme el ingreso a la planta extractora de aceite de palma, COOPAR LTDA, así como también su acompañamiento en los muestreos realizados.

Al ingeniero **JACIPT RAMÓN VALENCIA** PhD, Por el apoyo en el desarrollo y realización de este proyecto en investigación académica como director.

Al Biólogo **JOSE ANTONIO SIERRA**, por el apoyo y préstamo de las instalaciones del museo José Celestino Mutis, y su orientación en la observación e identificación de macroinvertebrados.

RESUMEN

En este proyecto investigativo se propone un sistema alternativo para el tratamiento biológico anaeróbico de los efluentes procedentes del proceso de extracción de aceite de palma de la planta extractora COOPAR LTDA ubicada en el municipio del Zulia- Norte de Santander, la primera parte incluyó la realización del análisis fisicoquímico, se aplicaron los índices de contaminación ICOpH, ICOMO e ICOSUS, se realizaron análisis bacteriológicos de Coliformes fecales y totales para los tres puntos de muestreo en el sistema de tratamiento implementado por la empresa, así mismo, para el análisis de índices biológicos se hizo con la colecta de macroinvertebrados en tres puntos de muestreo, los cuales se identificaron hasta el nivel taxonómico de familia y se aplicó el índice BMWP/Col. Adicionalmente se realizó un análisis estadístico de componentes principales (ACP) de los parámetros analizados.

Por otra parte, se hizo la propuesta el diseño de un reactor UASB a escala de laboratorio, tratando efluentes de una planta extractora de aceite de palma. Con tiempos de retención hidráulica (TRH) de 9 horas, el seguimiento y evaluación de este sistema se realizó mediante los siguientes parámetros: temperatura, pH y DQO. Los resultados obtenidos en términos de remoción de DQO para tres cargas orgánicas COV fueron: COV1= 13,31 kg/m³dia COV2= 15,984 kg/m³dia COV3= 18,648 kg/m³dia, obteniendo eficiencia de 72%, 83% y 79% respectivamente.

Por último, se hizo el diseño y evaluación un sistema de tratamiento alternativo a escala laboratorio con *Eichhornia crassipes* en el cual se evaluaron los parámetros pH y DQO, en cual se obtuvieron porcentajes de remoción que oscilan entre el 70%.

CONTENIDO

RESUMEN.....	VII
INTRODUCCIÓN	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
JUSTIFICACIÓN.....	17
OBJETIVOS.....	18
OBJETIVO GENERAL	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
MARCO REFERENCIAL.....	19
1.1 ANTECEDENTES.....	19
1.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	19
1.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES.....	20
1.1.3 ANTECEDENTES LOCALES	20
MARCO CONTEXTUAL.....	21
1.2 LÍMITES DEL MUNICIPIO	21
1.3 Descripción Del Zulia – Norte de Santander	21
3. MARCO TEORICO	22

3.1	PRODUCCIÓN DE ACEITE DE PALMA EN AMÉRICA LATINA	22
3.1.1	Proceso de extracción de aceite de palma africana.....	23
3.1.2	Recepción del fruto.....	23
3.1.3	Esterilización	23
3.1.4	Desfrutación.....	23
3.1.5	Extracción.....	23
3.1.6	Clarificación	24
3.1.7	Almacenamiento.....	24
3.1.8	Generación de vapor.....	24
3.1.9	Generación de energía	24
3.1.10	Mantenimiento.....	25
3.1.11	Control de calidad.....	25
3.2	IDENTIFICACIÓN DE LOS EFLUENTES POR ETAPA DEL PROCESO	26
3.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS EFLUENTES QUE SON GENERADOS EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE	26
3.4	TRATAMIENTO BIOLÓGICO	28
3.5	DIGESTIÓN ANAERÓBICA	28
3.5.1	MICROBIOLOGÍA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBICA.....	29
3.5.2	Bacterias hidrolíticas	29
3.5.3	Bacterias acetogénicas.....	30
3.5.4	Bacterias Homo-acetogénicas.....	30
3.5.5	Bacterias metanogénicas.....	30
3.6	MÉTODOS DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO	31
3.6.1	Filtración anaeróbica	31
3.6.2	Reactor de lecho fluidizado (FBR).....	31
3.6.3	Reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB).....	32
3.6.4	Digestor de contacto anaeróbico.....	32
3.6.5	Reactor de tanque agitado continuo (CSTR).....	33
3.6.6	Sistema de plantas acuáticas flotantes	33
3.6.7	Plantas acuáticas en sistemas de tratamiento.....	33
3.6.8	Eficiencia del uso de macrófitas flotantes	35
3.7	MARCO LEGAL	35
4.	METODOLOGÍA.....	37
4.1	ÁREA DE ESTUDIO.....	37
4.2	CARACTERIZACIÓN A TRAVÉS DEL ANÁLISIS PARÁMETROS FISICOCQUÍMICOS.....	38
4.2.1	Análisis microbiológico.....	40
4.2.2	Caracterización de macroinvertebrados.....	40
4.2.3	Análisis estadísticos.....	43
4.3	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL DISEÑO A IMPLEMENTAR	43
4.3.1	Parámetros de diseño	44
4.3.2	Parámetros y cronograma de monitoreo	44
4.3.3	Determinación de la eficiencia del sistema de tratamiento	45
4.4	PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO ALTERNATIVO	45
4.4.1	Diseño de un biosistema a escala piloto utilizando la <i>Eichhornia crassipes</i>	45

4. RESULTADOS Y DISCUSION	48
4.1. CARACTERIZACIÓN A TRAVÉS DEL ANÁLISIS PARÁMETROS FISICOCQUÍMICO	48
4.4.2 Análisis de componentes principales.....	50
4.4.3 Descripción de macroinvertebrados	56
4.4.4 Principales macroinvertebrados comunes	58
4.4.5 Díptera.	58
4.4.6 Coleóptera.....	58
4.4.7 Hemíptera	58
4.5 PROPUESTA DE UN SISTEMA ANAERÓBICO DE TIPO UASB.....	63
4.6 Montaje y operación del sistema de tratamiento	63
4.6.1 Diseño y montaje del sistema de pre-tratamiento.....	63
4.6.2 Adecuación del reactor UASB	64
4.6.3 Preparación del sustrato de alimentación	66
4.6.4 Arranque y bioadaptación del reactor UASB	67
4.7 Operación del reactor	67
4.7.1 pH Y Temperatura	67
Fuente: autor.....	68
4.7.2 Eficiencia del sistema de tratamiento	70
4.8 PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO ALTERNATIVO BIOLÓGICO.....	72
CONCLUSIONES.....	75
ANEXOS.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.</i>	21
<i>Figura 2. Diagrama del Proceso de extracción de palma de aceite</i>	25
<i>Figura 3. Etapas de la Digestión Anaerobia</i>	28
<i>Figura 4. Formación de metano en la digestión anaerobia</i>	29
<i>Figura 5. Grupo de bacterias involucradas en la digestión anaerobia de residuos</i>	31
<i>Figura 6. Morfología de una macrófita flotante (Eichhornia crassipes)</i>	34
<i>Figura 7. Ubicación del área de estudio</i>	37
<i>Figura 8. Recolección de muestras</i>	39
<i>Figura 9. Análisis fisicoquímicos</i>	39
<i>Figura 10. Recolección de macroinvertebrados</i>	42
<i>Figura 11. Identificación de macroinvertebrados</i>	42
<i>Figura 12. Metodología para la evaluación del reactor anaerobio</i>	43
<i>Figura 13. Diseño del biosistema</i>	47
<i>Figura 14. Macroinvertebrados acuáticos encontrados</i>	61
<i>Figura 15. Macroinvertebrados acuáticos encontrados</i>	62
<i>Figura 16. Reactor tipo UASB</i>	66

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Efluentes originados en el proceso para la extracción del aceite rojo y su destino final</i>	26
<i>Tabla 2. Características de los efluentes</i>	27
<i>Tabla 3. Normativa vigente colombiana</i>	35
<i>Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas.</i>	36
<i>Tabla 5. Detalle de Puntos de muestreo</i>	38
<i>Tabla 6. Métodos para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos.</i>	40
<i>Tabla 7. Detalles de las estaciones de muestreo</i>	41
<i>Tabla 8. Parámetros de diseño de un reactor tipo UASB</i>	44
<i>Tabla 9. Temperatura y TRH</i>	44
<i>Tabla 10. Cronograma de muestreo del sistema</i>	45
<i>Tabla 11. Criterios de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales crudas con Jacintos de agua</i>	46
<i>Tabla 12. Índices de contaminación del agua.</i>	48
<i>Tabla 13. Valores propios</i>	50
<i>Tabla 14. Resultados análisis fisicoquímicos</i>	55
<i>Tabla 15. Familias de macroinvertebrados acuáticos encontradas en el canal de drenaje y la Q. agualasal</i>	57
<i>Tabla 16. Puntaje de las familias observadas en el canal de drenaje y en la quebrada agualasal de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP/Col</i>	57
<i>Tabla 17. Clases de calidad de agua, valores BMWP/Col, significado y colores para representaciones cartográficas</i>	59
<i>Tabla 18. BMWP/Col y su significado para los puntos de muestreo</i>	59
<i>Tabla 19. Comportamiento del pH y el tiempo durante la operación</i>	67
<i>Tabla 20. Temperatura en el sedimentador</i>	69
<i>Tabla 21. Datos del Pre-tratamiento</i>	70
<i>Tabla 22. Datos de UASB COV 1</i>	71
<i>Tabla 23. Verificación de Varianza</i>	72
<i>Tabla 24. Tabla ANOVA para pH por Tratamiento</i>	73
<i>Tabla 25. Remociones de DQO en cada uno de los tratamientos.</i>	74

LISTA DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1. Gráfico de sedimentación.....</i>	<i>51</i>
<i>Gráfica 2. Distribución de las variables fisicoquímicas en los Componentes Principales I y II.....</i>	<i>52</i>
<i>Gráfica 3. Gráfico biplot de Componentes principales muestreos en azul y en rojo parámetros fisicoquímicos.....</i>	<i>52</i>
<i>Gráfica 4. Comparación pH en el sedimentador.....</i>	<i>68</i>
<i>Gráfica 5. Comparación pH en el reactor.....</i>	<i>69</i>
<i>Gráfica 6. Comportamiento Temperatura en el sistema.....</i>	<i>70</i>
<i>Gráfica 7. Eficiencia vs tiempo sedimentador.....</i>	<i>71</i>
<i>Gráfica 8. Eficiencia vs tiempo UASB.....</i>	<i>72</i>
<i>Gráfica 9. Intervalos de pH vs tratamiento.....</i>	<i>73</i>

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Matriz de coeficientes de correlación lineal entre las variables fisicoquímicas.	77
Anexo B. Sistema de tratamiento anaeróbico	78
Anexo C. Sistema de tratamiento con <i>E. crassipes</i>	79

INTRODUCCIÓN

El cultivo comercial de palma de aceite (*Elaeis guineensis* y *Elaeis oleifera*) inicia en Colombia hacia el año 1945, estando a la fecha en constante expansión. Para la década de 1960 existen unas 18.000 has en producción (García et al, 2013). Colombia se ubica en el año 2010 como el primer productor de América Latina y el quinto del mundo con un 1.6% de la producción mundial (Superintendencia de Industria y comercio, 2010)

Colombia, es la primera potencia mundial en biodiversidad relativa, pero también es la campeona en depredación ambiental, debido a ciertos factores entre los cuales se encuentran algunas actividades agrícolas (Carvajal & De Francesco, 2012). Desafortunadamente, los aspectos ambientales no tienden a ser la prioridad en las políticas gubernamentales que impulsan la utilización de los biocombustibles. Los cultivos que se utilizan para este fin generan la mayor parte de los impactos ambientales negativos debido a la utilización intensiva de agroquímicos, degradación de suelos y sobreexplotación de recursos hídricos.

El efluente del molino de aceite de palma (POME) es un agua residual producida a partir de la esterilización, desechos de hidrociclones y lodo separado en el curso de producción de aceite de palma crudo, donde el lodo separado y los efluentes de la esterilización son las dos fuentes principales del agua residual que contribuyen a las características altamente contaminantes de las aguas residuales. (Borja & Banks, 1995)

La descarga directa de POME causa un efecto perjudicial al medio ambiente debido a sus características altamente contaminantes (Poh, 2010). La caracterización de las aguas residuales juega un papel fundamental. En el proceso de tratamiento de aguas residuales en las decisiones tomadas sobre un método de tratamiento de aguas residuales adecuado y económico para que el efluente tratado pueda cumplir con los límites de descarga establecido por las autoridades ambientales locales (Hwang, Ong, Seow, & Tan, 1978)

Por lo tanto, en este proyecto se busca plantear una propuesta de alternativas de diseño para un sistema de tratamiento de efluentes generados en el proceso de extracción de aceite de palma, usando para ello la caracterización de parámetros fisicoquímicos específicos para dichos efluentes, una vez obtenidos los valores y usando la bibliografía revisada, se puede proponer un diseño con el se espera obtener resultados proyectados en un rango de valores aceptables según la normativa, según conste en la bibliografía.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El aceite de palma se extrae del fruto de la palma africana (*Elaeis guineensis*), cultivo capaz de producir más de 3.5 toneladas de aceite por hectárea, con un rendimiento diez veces superior al que se obtiene de otros cultivos de semillas oleaginosas como la soya o el girasol, incluso sin ser un producto modificado genéticamente. Estos rendimientos tan elevados, junto con los bajos costes de producción y los múltiples usos, hacen que el aceite de palma sea el aceite vegetal más usado en el mundo (Fedepalma, 2015). Así mismo, el procesamiento del aceite de palma constituye una industria que genera grandes cantidades de desechos líquidos, estos efluentes que se generan son sustancias que requieren de un tratamiento especial, los cuales generan un alto impacto al medio ambiente. Por lo tanto, los sistemas para el tratamiento de estos efluentes que se emplean convencionalmente son: lagunas de oxidación, biodigestores de tanque abierto, sistemas de aireación extendida, al igual que un digestor anaeróbico cerrado (DGCA, 2012).

La extracción del aceite se hace mediante procesos físicos y mecánicos y por las diferencias de densidades se separan los sólidos, el agua y el aceite; así, no se generan elementos tóxicos, ni metales pesados que vayan a parar a las aguas residuales, y el tratamiento se orienta principalmente a estabilizar la materia orgánica presente (Cenipalma, 1996).

En consecuencia, los efluentes generados por la industria de la palma se han convertido en una problemática ambiental, pues estos son vertidos directamente a los cuerpos de agua, afectando principalmente el recurso hídrico, el cual a causa de este vertimiento posee una elevada carga orgánica, así como también un elevado nivel de sólidos en suspensión, grasas y aceites. Por consiguiente, el recurso hídrico contaminado debe ser tratado con un sistema de alto rendimiento, como la implementación de diferentes alternativas tecnológicas existentes que se utilizan en el manejo de los efluentes en el sector palmero, con el fin de disminuir dichos contaminantes.

De esta manera, para la estabilización de estos efluentes, expertos en el sector palmero recomiendan principalmente sistemas de tratamientos de tipo biológico, dado que el uso de sistemas aeróbicos con inyección de oxígeno sería demasiado costoso. Así mismo, la adición de químicos para floculación y sedimentación además de costosa es muy ineficiente. (Whitthing, 1979).

Con base a lo anterior, se hace la siguiente pregunta de investigación: ¿la implementación de un tratamiento biológico resulta ser efectivo para el tratamiento de los efluentes generados en la extracción de aceite de palma? por lo tanto este estudio está dirigido a la implementación de tecnología avanzada para el sistema de tratamiento anaeróbico por medio del diseño de una planta piloto para la remoción de DBO₅ y DQO con una eficiencia del 80%.

JUSTIFICACIÓN

Producto de la extracción de aceite de palma se generan grandes cantidades de aguas residuales que son un material altamente contaminante debido a su naturaleza ácida y alto contenido orgánico (DBO), lo cual lo convierte en una problemática ambiental ya que estos necesitan de un tratamiento específico antes de ser descargados puesto que pueden provocar alteraciones en los sistemas acuáticos, así como también la calidad de vida en las zonas rurales, por lo que son necesarios el empleo de sistemas de tratamientos biológicos. Sin embargo, algunas plantas extractoras no hacen un adecuado manejo de los residuos líquidos de manera que puedan cumplir con los estándares requeridos para vertimientos industriales estipulados en la resolución 0631 de 2015 emitido por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Cabe resaltar otra problemática que es la liberación de gases de efecto invernadero que favorecen al calentamiento global.

En efecto, el tratamiento anaeróbico es el método más adecuado para tratamiento de efluentes que contienen alta concentración de carbono (Perez et al., 2001). Teniendo en cuenta el alto contenido orgánico, este proceso es el enfoque más apropiado para su tratamiento.

Este sistema se ha venido desarrollando como una nueva alternativa para el tratamiento de aguas residuales ya que resulta viable y presenta bajos costos de inversión, operación y mantenimiento, en este proyecto se propone un sistema alternativo para el tratamiento biológico anaerobio.

Por esta razón con este proyecto se busca brindar una alternativa por medio de este sistema de tratamiento, el cual se pueda aplicar a gran escala en las plantas extractoras que no cumplan con los parámetros requeridos por la normativa ambiental, logrando una mayor reducción de la carga orgánica para así mitigar los impactos al medio ambiente.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer un sistema alternativo para el tratamiento biológico anaeróbico de los efluentes procedentes del proceso de extracción de aceite de palma, con el fin de dar cumplimiento a la normativa actual.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el contenido de materia orgánica de los efluentes provenientes del proceso de extracción de aceite de palma por medio de la caracterización fisicoquímica y microbiológica utilizando métodos estandarizados.
- Diseñar una planta piloto para el tratamiento biológico anaeróbico de los efluentes procedentes del proceso de extracción de aceite de palma utilizando la mejor tecnología que se adapte al proceso de remoción de materia orgánica.
- Establecer un sistema de tratamiento alternativo para la remoción de materia orgánica de los efluentes procedentes del proceso de extracción de aceite de palma.

MARCO REFERENCIAL

1.1 ANTECEDENTES

1.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

A continuación se presentan los principales estudios a nivel internacional que han contribuido en la estructuración de esta investigación.

(Zhang Yejian et al., 2007). Diseñaron y contruyeron una planta piloto para el tratamiento de efluentes del proceso de extracción de aceite de palma, la cual estuvo constituida por dos etapas en donde la primera etapa biológica estuvo constituida por digestión anaerobica y aeróbica, mientras que en la segunda etapa se combinaron las unidades de membrana de ultrafiltración y de ósmosis inversa, con lo cual se logró una eficiencia en la reducción de la DQO del 93%. Después de todo el proceso de tratamiento, la materia orgánica expresada por DBO y DQO, se eliminó casi por completo; el efluente tratado estaba cristalino en tal alta calidad que podría usarse como agua de alimentación de la caldera.

(Won-Ho Choi et al., 2013). Diseñaron un sistema combinado de reactores anaerobicos de alta velocidad para el tratamiento del efluente de la planta de aceite de palma (POME). Este sistema se compone por un reactor hibrido y dos reactores de filtro diferente, en donde el reactor primario estaba compuesto en la parte inferior por un lecho de lodos y de medios filtrantes para la zona superior; por otra parte, los reactores secundarios se componian de un reactor de filtro desconcertado anaeróbico (ABF) y un reactor de filtro de flujo descendente anaeróbico (ADF). La combinación de reactores anaeróbicos fue exitosa ya que se logró una eficiencia en la eliminación de la DQO de 93.5 % puesto que los reactores secundarios contribuyeron no solo a mejorar la eficiencia de eliminación de DQO, sino también a garantizar la estabilidad del rendimiento de todo el sistema. En consecuencia se considera que dicha combinación de sistemas es un proceso con alta aplicabilidad para el tratamiento del efluente de la planta de aceite de palma.

(Armendariz, 2016). Desarrollo un proyecto en el cual propuso utilizar la metodología MBBR para tratar los efluentes generados en los procesos de extracción de aceite de palma, esta metodología tiene como objetivo la degradación de la materia orgánica mediante bacterias aerobias. Para llevar a cabo la investigación primeramente se hizo la toma de muestras del efluente, luego la cacterizacion fisicoquimica para identificar sus respectivas concentraciones, por medio de los siguientes parámetros: DQO, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, aceites y grasas, fósforo, pH, temperatura y sólidos totales disueltos. El reactor demostró efectividad para ciertos parámetros medidos por lo que se recomienda hacer un tratamiento secundario para remover otros parámetros, además debido a una elevada carga orgánica que presentan los POME, se deben hacer diluciones en las muestras para obtener resultados dentro del rango de cálculo.

1.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES

(Sarmiento et al., 2017). Debido a los problemas existentes en el sistema de tratamiento en la Hacienda La cabaña, los autores propusieron un sistema de tratamiento para el agua residual, y así evaluar la viabilidad de esta para ser reutilizada en riego por aspersión en los cultivos de palma africana, con el objetivo de dar cumplimiento a la normativa. Por lo anterior se planteó un sistema de tipo anaerobio constituido por un tanque de igualación seguido de un reactor anaerobio flujo a pistón, con cuatro cámaras para la degradación y remoción de los excesos de carga orgánica presentes en el efluente, seguido de un sistema de filtración de arena y carbón activado, finalizando con un sistema de desinfección que garantice las condiciones óptimas del efluente para su posterior riego en cultivo. En cuanto a las características fisicoquímicas del efluente y debido a sus altos contenidos de materia orgánica plantearon un sistema de tipo anaerobio ya que son los más eficientes y de bajo costo que se pueden aplicar en este caso, debido a que los sistemas de tipo aerobio generan costos mucho más elevados por lo tanto, evaluaron que la unidad más apta para el caso es un reactor anaerobio flujo a pistón.

1.1.3 ANTECEDENTES LOCALES

(Díaz et al., 2013). Realizaron un estudio sobre el efecto de la variación de la carga orgánica, utilizando efluentes de una planta extractora de aceite de palma, operando un reactor UASB a escala laboratorio con tiempos de retención hidráulica (THR) de 24, 18 y 12 h. Este sistema de tratamiento anaerobio presentaba un efluente proveniente de una planta de procesamiento y el inóculo fue un lodo granular obtenido de una planta de aguas residuales de la industria cervecera; para el seguimiento el comportamiento del reactor se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: Caudal, temperatura, demanda química de oxígeno (DQO), producción de biogás, pH, Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Ácidos Grasos Volátiles (AGV). De acuerdo a los resultados obtenidos los autores concluyeron que el uso de un reactor UASB para tratar los efluentes provenientes de una planta extractora de aceite de palma es eficiente ya que se logró una remoción de la DQO con porcentajes 81,42%, 79,08%, 75,76 % para 24, 18 y 12 horas de TRH.

MARCO CONTEXTUAL

1.2 LÍMITES DEL MUNICIPIO

El municipio de El Zulia, se sitúa en la subregión oriental del departamento, con coordenadas geográficas. Longitud 0° de gran longitud norte $72^{\circ} 36' 7'' 56'$ El municipio de El Zulia limita: al norte con el municipio de Cúcuta, al sur con los municipios de San Cayetano y Santiago, por el oriente con el municipio de Cúcuta y por el occidente con los municipios de Gramalote y Sardinata. Extensión total: 449.07 Km² Extensión área urbana: 1.49 Km² Extensión área rural: 447.58 Km² Altitud de la cabecera municipal (metros sobre el nivel del mar): 220 Temperatura media: 28° C Distancia de referencia: 12 Km de la Capital. (Cali, 2012)



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.
Fuente: Autor

1.3 Descripción Del Zulia – Norte de Santander

El municipio El Zulia está situado en la subregión oriental del departamento, en el Área Metropolitana y en la zona de influencia fronteriza con la República de Venezuela. El

municipio tiene una superficie de 449.07 Km², equivalente al 0.22% del área total del departamento.

El municipio El Zulia fue creado como entidad territorial mediante la ordenanza No. 04 Actualmente cuenta con 26 veredas que conforman su base político administrativa y la unidad territorial objeto del Esquema de Ordenamiento Territorial. De su posición geográfica se derivan algunas singularidades, entre otras el hecho de ser una entidad estrictamente vinculada al proceso de evolución histórica, así mismo, por poseer una base patrimonial de recursos naturales que sustentan las cimientos para un desarrollo sostenido; por contener un entorno natural atractivo de su diversidad biológica y de la presencia de ecosistemas estratégicos, que proporcionan abundantes servicios ambientales a las comunidades. Esta unidad territorial, presenta un relieve básicamente montañoso constituido por la Cordillera Oriental, que permite poseer una diversidad bio- climática y conformar un sistema hidrográfico que se encuentra distribuido en la cuenca mayor del río Zulia y limitantes que se encuentran arraigados a lo largo y ancho de su territorio y por lo tanto afectan su base de sustentación ecológica y presionan sobre las comunidades allí asentadas. (Cali, 2012)

3. MARCO TEORICO

3.1 PRODUCCIÓN DE ACEITE DE PALMA EN AMÉRICA LATINA

América es el segundo productor del mundo, pero la participación de esta es del 5 %, de los cuales, Ecuador, Colombia, Honduras y Costa Rica se le atribuyen el 75 % de producción de América. En América del Sur los países líderes en la producción de aceite de palma en el año 2013 fueron Colombia con 945064 toneladas, seguido de Brasil con aproximadamente 340000 toneladas y finalmente Ecuador con 325000 toneladas. (FAO, 2015).

La producción de aceite de palma crudo en Colombia en 2017 superará las 1.600.000 toneladas, cifra récord que revela un crecimiento de 42% respecto a 2016. Al cierre de 2017, Fedepalma reveló que la producción de aceite de palma crudo para el año que termina fue del orden de 1.632.667 toneladas, con un valor estimado de 3,3 billones de pesos. Este incremento obedece principalmente a una mejora sustancial de las condiciones climáticas que favoreció la producción del fruto de la palma, al inicio de la producción de áreas en

desarrollo, y a aumentos en la productividad en las diferentes zonas palmeras. (Fedepalma, 2017)

3.1.1 Proceso de extracción de aceite de palma africana.

El proceso de extracción de aceite de palma según lo planteado por (Acuña, 2000), comienza realmente desde el amontonamiento y transporte posterior a la planta de extracción, el cual se hace en camiones de carga, o carretas tiradas por tractores de llantas. Los cuales llegan a la planta y se genera el proceso de descarga posterior al pesado de la fruta dándose una secuencia en el proceso que se da normalmente en diez etapas que se describe e a continuación:

La figura 2 esquematiza el proceso de extracción de palma de aceite.

3.1.2 Recepción del fruto

Consiste en pesar el camión lleno de fruta proveniente de los productores agrícolas y luego de descargarlo para obtener por diferencia el peso neto de la fruta. (Bonomie & Reyes, 2012)

3.1.3 Esterilización

Es la etapa más importante del proceso de extracción del aceite de palma; se lleva a cabo, generalmente sometiendo los racimos de fruto fresco de palma a la acción de vapor de agua en recipientes cilíndricos horizontales (autoclaves), donde los factores principales son el tiempo de cocción y la temperatura, dependiendo del tamaño de los racimos y del grado de madurez de los mismos (esta es una de las fases del proceso que genera mayor cantidad de efluentes). (Bonomie & Reyes, 2012)

3.1.4 Desfrutación

Luego de esterilizador los racimos se proceden a separar el fruto del racimo. Esto se hace en un tambor rotatorio, el fruto se separa para luego enviarlo al digestor por medio de un elevador y el racimo vacío es llevado al campo para utilizarlo como abono orgánico. (Bonomie & Reyes, 2012)

3.1.5 Extracción

Sección donde se extrae mecánicamente el aceite contenido en el mesocarpio. El objetivo de esta etapa es romper, mediante calor y presión mecánica las celdas que contienen el aceite

del mesocarpio. La presión aplicada debe ser tal que se extraiga la mayor cantidad de aceite y se minimice la rotura de nueces y almendras. (Bonomie & Reyes, 2012)

3.1.6 Clarificación

El aceite crudo extraído del mesocarpio por medio del prensado contiene cantidades variables de impureza de material vegetal, parte de las cuales se presentan como sólidos insolubles y partes disueltos en el agua que contiene el aceite. Tanto el agua como las impurezas deben removerse, lo que se logra mediante la clarificación. Está conformado por un tanque clarificador continuo de aceite, diseñado para separar el aceite del agua y los sólidos con los cuales están mezclados, al salir del tanque de aceite crudo después del tamiz vibratorio obrando en una forma continua. En este tanque es necesario tener una dilución adecuada para mejorar la decantación estática y una altura óptima entre la salida del aceite clarificado y el lodo, para lograr un trabajo continuo y acelerado en la separación de aceite. (Bonomie & Reyes, 2012)

3.1.7 Almacenamiento

Una vez que el aceite alcanza los niveles de pureza requerido es enviado a los tanques de almacenamiento para su posterior despacho. Ahora bien, se describe a continuación, las actividades de apoyo relacionadas directamente con el manejo de efluentes vinculados a su vez con el proceso productivo de la extracción de aceite de palma o rojo. (Bonomie & Reyes, 2012)

3.1.8 Generación de vapor

Proporciona vapor a las etapas del proceso productivo tales como esterilización, extracción y clarificación, con el propósito de realizar de una manera más efectiva los procesos para la extracción de aceite. La generación de vapor necesaria como fuente de calor para los equipos de la planta; la caldera utiliza como combustible la fibra y la cáscara generada en el proceso productivo. La calidad del vapor es del tipo saturado y para controlar la emisión de partículas por la chimenea se emplea un sistema de recolección de cenizas, compuesto por un ventilador, ciclón y esclusa. (Bonomie & Reyes, 2012)

3.1.9 Generación de energía

Es catalogada como actividad de apoyo, en la medida que proporciona energía a algunas etapas del proceso de extracción de aceite. Esta actividad es producto de la generación de desperdicios de algunas etapas, tales como: las cáscaras, o raquis así como de plantas eléctricas o de energía proveniente del servicio público. (Bonomie & Reyes, 2012)

3.1.10 Mantenimiento

Es necesario en el proceso de extracción de aceite, desde la báscula en la etapa de recepción hasta palmistería. Asimismo, está relacionado directamente con las otras actividades del proceso tales como: generación de vapor y control de calidad. (Bonomie & Reyes, 2012)

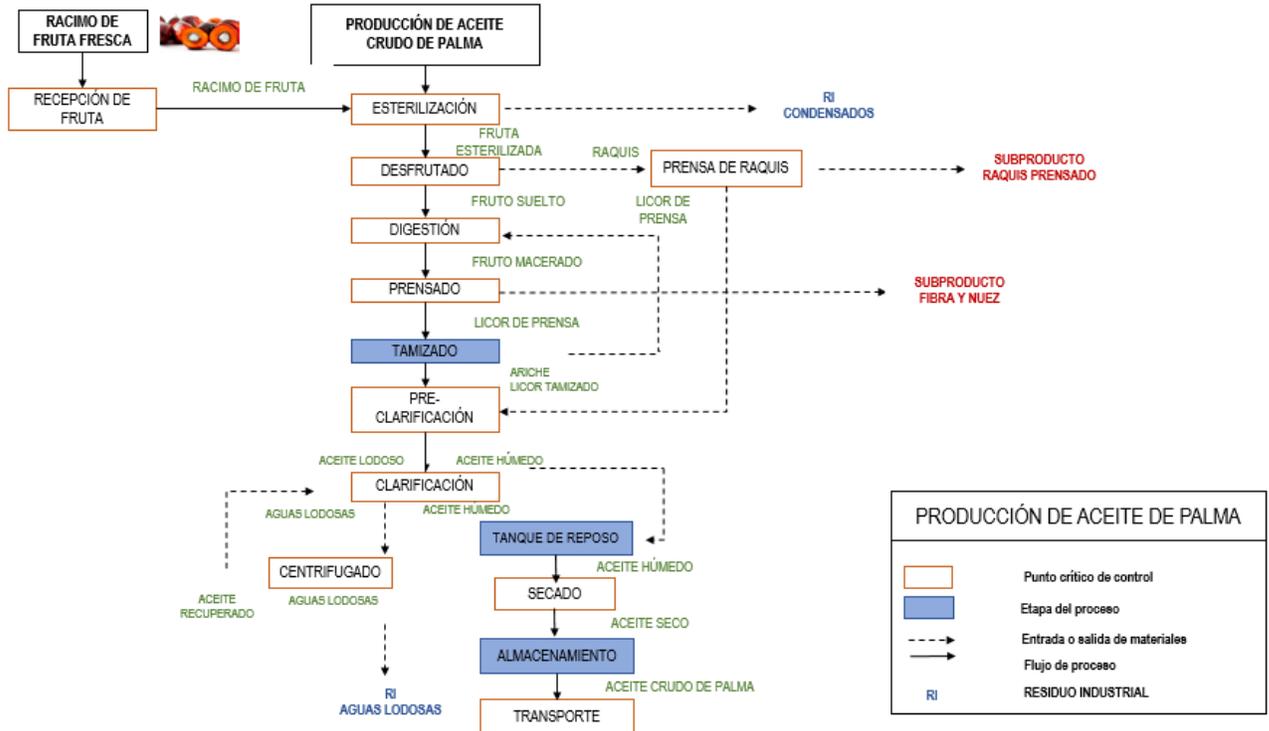


Figura 2. Diagrama del Proceso de extracción de palma de aceite

Fuente: (Sarmiento et al., 2017)

3.1.11 Control de calidad

Participa en el proceso en las etapas de recepción, desfrutado, extracción y clarificación, estableciendo algunas normas y procedimientos para que en algunas etapas se extraiga la mayor cantidad de aceite y en otras para mantener las características del mismo. El control de calidad se realiza evaluando el aceite rojo con el propósito de valorar su vida útil, (análisis químicos de porcentaje de humedad, porcentaje de acidez e índice peróxido), así como las características requeridas para poder valorarse como un producto óptimo para ser convertido en aceite comestible. (Bonomie & Reyes, 2012)

3.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS EFLUENTES POR ETAPA DEL PROCESO

Al realizar la recepción de la fruta, las impurezas de las frutas, son llevadas a las plantaciones para que sirvan de abono, es decir, se utiliza este desecho de esta etapa del proceso para ser utilizado en las plantaciones de palma. En cuanto a la etapa de esterilización los líquidos que salen del proceso producto del vapor utilizado para esterilizar la fruta, son llevados a las lagunas de tratamiento de las aguas. En el desfrutado se obtienen como residuos de esta etapa las ramas vacías producto del desmembrado de la fruta (raquis), las cuales son llevadas a las plantaciones de palma para ser utilizadas en el control de maleza de las mismas; y los líquidos que salen de esta etapa producto del calor y vapor utilizado, es conducido a las lagunas de tratamiento. (Bonomie & Reyes, 2012). En la tabla 1 se puede ver con mas detalles los efluentes originados en el proceso para la extracción del aceite y su destino final.

Tabla 1. Efluentes originados en el proceso para la extracción del aceite rojo y su destino final

Etapa del proceso	Efluente	Destino del efluente
Recepción	Impureza de la fruta	Plantaciones → Abono
Esterilización	Líquidos	Tratamiento de aguas (lagunas)
Desfrutado	Raquis vacías	Plantaciones → control de malezas
	Líquidos	Tratamiento de aguas (lagunas)
Extracción	Líquidos	Tratamiento de aguas (lagunas)
Clarificación	Aguas y lodos residuales	Tratamiento de aguas (lagunas)

Fuente: (Bonomie & Reyes, 2012)

3.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS EFLUENTES QUE SON GENERADOS EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE

Se reporta que alrededor de 2.5 a 3 toneladas de efluentes producidos en el proceso de extracción, conocidos como POME (Palm Oil Mill Effluent) son generados por cada tonelada producida de aceite crudo que se obtiene en el proceso de extracción. Los POME son suspensiones coloidales que se dan a partir de la mezcla del condensado de esterilización, masa de separación y el agua del proceso del hidrociclón, todo esto con una proporción de 9:15:1 respectivamente, cuando está fresca, es un líquido grueso de color marrón, que está compuesto por una mezcla de agua, aceite y sólidos finos suspendidos, se

encuentra a una temperatura entre 80 a 90°C y posee una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) elevada, normalmente con una concentración de 25000 g/L, una concentración de demanda química de oxígeno de 50000 g/L y aceites y grasas de 4000 g/L. Esta no es tóxica ya que no se incluyen productos químicos en la extracción, cuenta con un pH de alrededor de 4.5 ya que contiene ácidos orgánicos en formas complejas que son adecuados como fuentes de carbón. (Madaki & Seng, 2013). Cuyas características se muestran en la tabla 2.

Consiste de componentes solubles en agua y materiales suspendidos como: residuos de aceite, fibras de palma, paredes celulares, una variedad de carbohidratos entre otros constituyentes minerales y orgánicos. (Madaki & Seng, 2013)

Los POME que no han sido tratados o tuvieron un tratamiento incompleto, tienen una carga alta de aceite sin recuperar lo que hace que tenga materia orgánica, esta puede aportar a la contaminación del agua, formándose componentes peligrosos como el ácido sulfhídrico, por lo que la ecología del cuerpo de agua receptor quedaría destruida. A pesar de su biodegradabilidad, los POME no pueden ser descargados sin un tratamiento previo por su naturaleza ácida y contenido de aceite residual que no pueden ser separados por usos convencionales, estos necesitan de un tratamiento con una cantidad grande de oxígeno antes de poder ser dispuestos completamente, lo cual es dar una demanda bioquímica de oxígeno muy alta ya que, sin tratar, se obtienen valores hasta 100 veces más elevados que las descargas normales. (Madaki & Seng, 2013)

Tabla 2. Características de los efluentes

Parámetro	Unidad	Rango	Promedio
pH	Unidad	3,87-5,25	4,55
DBO	mg/L	18700-175521	48873
TEMPERATURA	°C	53-77	67,4
DQO	mg/L	45256-232000	79729,6
Sólidos totales (ST)	mg/L	32482-232000	79729,6
Sólidos suspendidos (SS)	mg/L	19129-88258	35105
Grasas y aceites	mg/L	6480-80701	18747,1

Fuente:
(Cenipalma, 1996)

3.4 TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales se basan en la interacción y el metabolismo de los microorganismos, procesos que dependen de la capacidad de la comunidad microbiana de utilizar los compuestos del agua. No existe un único organismo capaz de utilizar todos los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales; por tanto, un proceso biológico constituye un ecosistema diverso que se alimenta del agua cruda que entra al sistema y que depende de la disponibilidad de oxígeno, del pH y de las condiciones de la mezcla. (Fuhs, 1975)

3.5 DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica es el método más adecuado para el tratamiento de efluentes que contienen alta concentración de carbono orgánico como POME (Borja et al., 1996^a). La digestión anaeróbica se define como la descomposición metanogénica anaeróbica modificada de la materia orgánica. Implica diferentes especies de microorganismos anaerobios que degradan la materia orgánica. (Cote et al., 2006). (Ver Figura 3.)

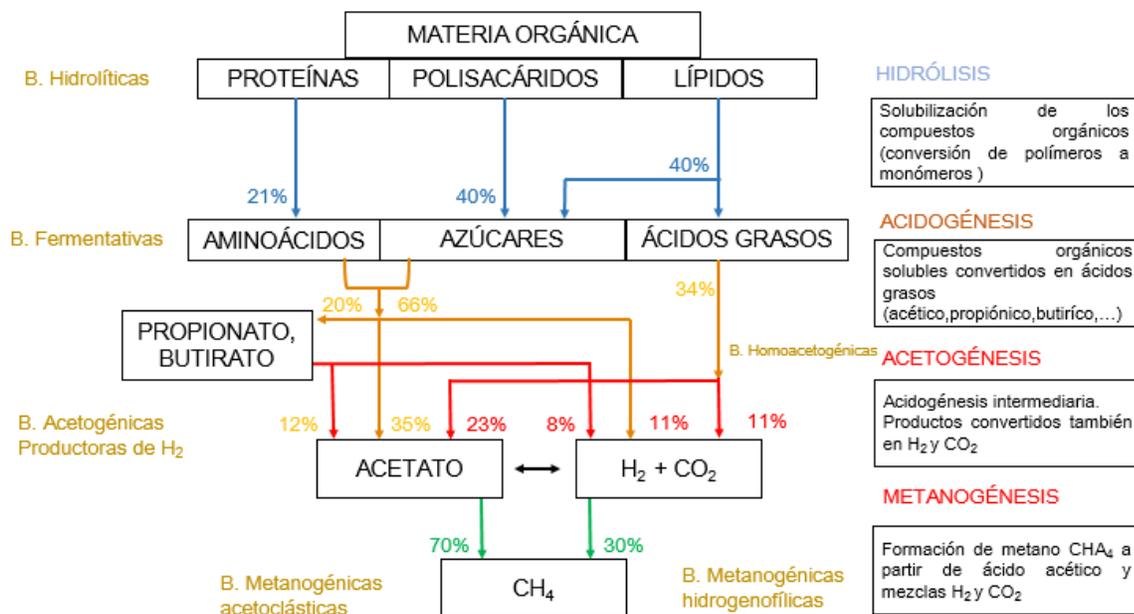


Figura 3. Etapas de la Digestión Anaerobia

3.5.1 MICROBIOLOGÍA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBICA

El tratamiento anaerobio es el proceso de degradación u oxidación de la materia orgánica por la acción coordinada de cinco grupos diferentes de microorganismos en cuatro etapas secuenciales: hidrolisis, Acidogénesis, Acetogénesis y metanogénesis en ausencia de oxígeno u otros agentes oxidantes fuertes (SO_4 , NO_3 . Etc.), para obtener la energía requerida para el crecimiento y mantenimiento de los organismos anaerobios. (Camargo, 2017)

El proceso microbioal es muy complejo y está integrado por múltiples reacciones paralelas y en serie, interdependientes entre sí. Como subproducto de gas, denominado usualmente biogás, cuya composición básica es metano CH_4 y dióxido de carbono CO_2 en un 95% pero con la presencia adicional de nitrógeno, hidrogeno, amoniaco y sulfuro de hidrogeno, usualmente inferiores al 1%. (Romero, 2008). (Ver Figura 4.)

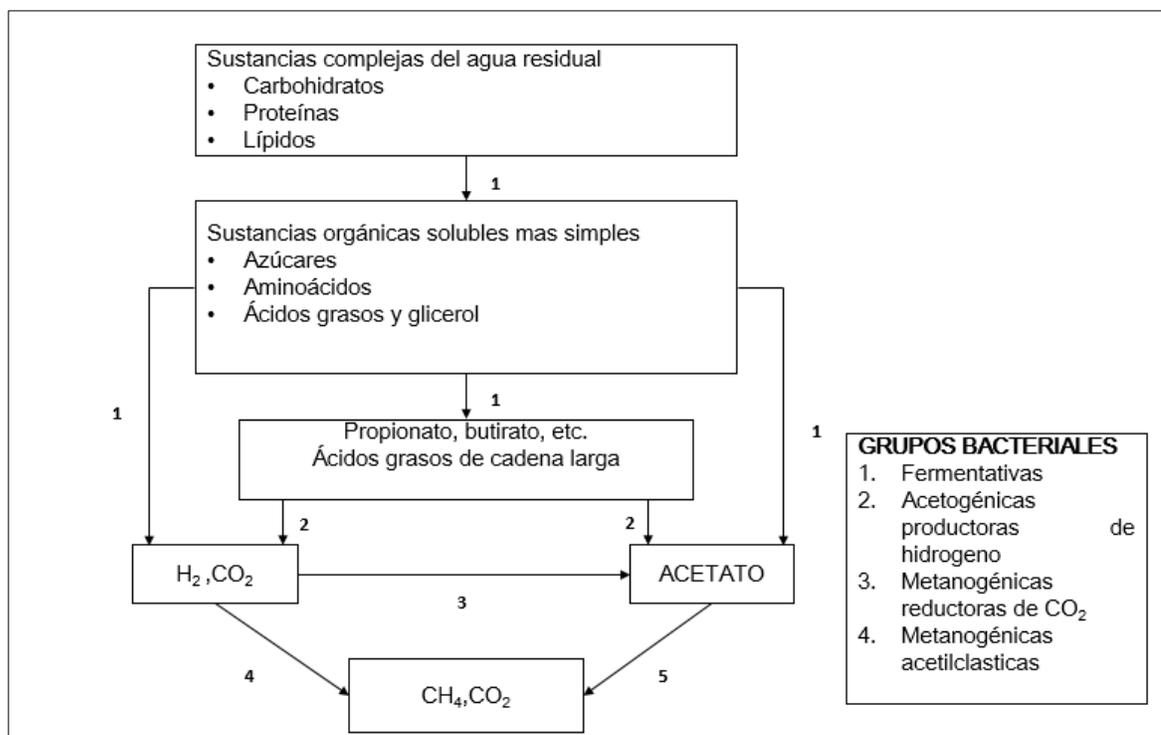


Figura 4. Formación de metano en la digestión anaerobia

Fuente: (Romero, 2008)

3.5.2 Bacterias hidrolíticas

La utilización microbioal de polímeros complejos requiere que los microorganismos involucrados en su degradación sean capaces de hidrolizar o romper las moléculas de

polisacáridos, proteínas y grasas e hidrolizarlas a compuestos simples como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Las bacterias que llevan a cabo estas reacciones son anaerobias facultativas y los géneros más frecuentes que llevan a cabo esta reacción son los miembros de la familia *Enterobacteriaceae*. (Díaz, Espitia, & Molina, 2002)

3.5.3 Bacterias acetogénicas

Para que tenga lugar una eficiente metanogénesis, los productos de fermentación como el propionato y el butirato deben ser oxidados a acetato, CO₂ e H₂. Esta oxidación es llevada a cabo por un grupo denominado organismos acetógenos productores obligados de hidrógeno (OHPA, *Obligate Hydrogen Producing Acetogens*), mediante un proceso conocido como 'acetogénesis'. (Díaz, Espitia, & Molina, 2002)

3.5.4 Bacterias Homo-acetogénicas

Dentro del grupo de acetógenos existe un grupo de bacterias conocidas como 'bacterias homo-acetogénicas' las cuales son anaerobias obligadas y utilizan el CO₂ como aceptor final de electrones, produciendo acetato como producto único de la fermentación anaeróbica. Los electrones para la reducción del CO₂ provienen del H₂ y de una variedad de compuestos como azúcares, ácidos orgánicos, alcoholes, aminoácidos y ciertas bases nitrogenadas. Aunque este grupo no es un grupo taxonómico definido, en él se incluyen una amplia variedad de bacterias Gram (+) y Gram (-) formadoras de esporas tales como *Clostridium aceticum*, *Clostridium formicoaceticum* y *Acetobacterium woodii* (Balch et al., 1977).

3.5.5 Bacterias metanogénicas

Las bacterias metanogénicas pertenecen al grupo actualmente conocido como *Archaea*, cuyos miembros presentan características diferentes a las encontradas en Bacteria. Estas características están relacionadas fundamentalmente con la composición química de algunas estructuras celulares. Aunque la estructura de la membrana celular es una bicapa de fosfolípidos, en lugar de los enlaces éster presentes en la unión entre el glicerol y los ácidos grasos, los lípidos del grupo *Archaea* son químicamente únicos, debido a que la unión del glicerol a las cadenas laterales hidrofóbicas se hacen mediante enlaces éter, además los lípidos carecen de ácidos grasos y en su lugar presentan cadenas laterales constituidas por unidades del hidrocarburo isopreno. Los di-éteres de glicerol y los tetra-éteres de glicerol son las principales clases de lípidos presentes en las especies del grupo Arquea, ellos forman una monocapa lipídica, en lugar de un arreglo de bicapa. Estas monocapas son muy resistentes y se encuentran ampliamente distribuidas en bacterias hipertermófilas. (Díaz, Espitia, & Molina, 2002) (Ver Figura 5.)

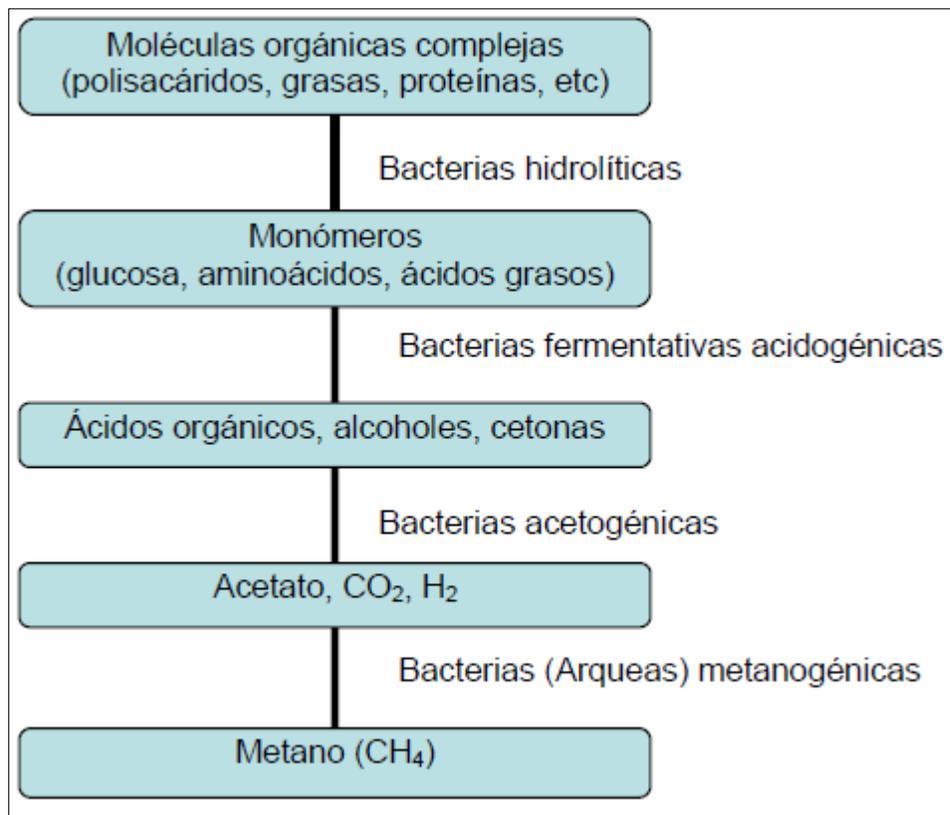


Figura 5. Grupo de bacterias involucradas en la digestión anaerobia de residuos

Fuente: (Rojas, 2005)

3.6 MÉTODOS DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO

3.6.1 Filtración anaeróbica

Los filtros emplean un material de relleno a través del cual circula el fluido que se pretende depurar. En los filtros coexisten dos tipos de mecanismos de retención de la biomasa activa, formación de biopelículas y retención de biomasa libre. Sobre el material de relleno se fijan microorganismos formando una biopelícula de biomasa activa, además en el espacio que queda en forma de huecos entre las partículas de soporte queda retenida biomasa. (Polanco & Seghezzi, 2015)

3.6.2 Reactor de lecho fluidizado (FBR)

Un reactor de lecho fluidizado (FBR) es un tipo de reactor de dispositivo que puede usarse para llevar a cabo tipo de reacciones químicas multifase. El reactor de lecho fluidizado

presenta varias ventajas que hace que sea útil para el tratamiento de aguas residuales de alta resistencia. (N.H. Abdurahman, 2013)

Estos reactores también operan con biomasa inmovilizada en forma de biopelícula. Sobre una pequeña partícula de material de soporte se puede desarrollar una biopelícula, con lo que se consigue una biopartícula. Cuando un lecho poroso formado por biopartículas se pone en contacto con un líquido que tiene flujo ascendente, en función de la velocidad ascendente el comportamiento del lecho es el siguiente. Inicialmente, a velocidades bajas las partículas están inmóviles, manteniéndose la estructura de lecho poroso. Para una determinada velocidad el lecho “se esponja” y a partir de ese momento, cualquier aumento en la velocidad ascensional del fluido se manifiesta en forma de expansión del lecho, que se visualiza en un aumento de su longitud. En función del grado de expansión el lecho suele denominarse expandido (expansión del orden del 15%) o fluidizado (expansión del orden del 30%). (Polanco & Seghezzo, 2015)

3.6.3 Reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB)

Es la tecnología más ampliamente utilizada en tratamiento anaeróbico de aguas residuales. El concepto se basa en tres características diferenciales:

- Aprovechar la capacidad de la biomasa para crecer agrupada, formando flóculos o incluso gránulos, con una buena velocidad de sedimentación, circunstancia que permiten su permanencia en el interior del reactor, sin ser lavados con el efluente.
- Incluir en la parte superior del reactor un sistema de separación de las fases gaseosa-líquida-sólida. En el interior del reactor el gas que asciende provoca la mezcla del líquido y los sólidos, impidiendo la sedimentación de los flóculos de biomasa. El separador trifásico o campana permite la separación de la fase gaseosa, de forma que en la fase exenta de gas las partículas sólidas pueden sedimentar y caer, reincorporándose a la zona activa del reactor.
- La entrada del influente no se hace mediante una única entrada, como en otras tecnologías, sino que se hace de forma regular en toda la base del reactor, mediante un sistema de distribución que aplica flujos iguales por unidad de superficie de la base del reactor. (Polanco & Seghezzo, 2015)

3.6.4 Digestor de contacto anaeróbico

El proceso de contacto anaeróbico es un tipo de digestor anaeróbico. Los digestores anaeróbicos son equivalentes aeróbicos del proceso de lodos activados y actualmente se

utilizan para tratar los efluentes del procesamiento del azúcar, las destilerías, el ácido cítrico y la producción de levadura, las industrias que producen vegetales enlatados, pectina, almidón, productos cárnicos, etc. Este proceso se ha implementado en POME (Ibrahim et al., 1984); aguas residuales de helados, aguas residuales de destilería de alcohol (Vlissidis et al., 1993) y tratamiento de aguas residuales de almazara fermentada (Hamdi et al. 1991).

3.6.5 Reactor de tanque agitado continuo (CSTR)

El reactor de tanque con agitado continuo (ADI-CSTR) es un proceso de digestión anaeróbica de tasa moderada y mezclado completo. Esta tecnología comprobada maximiza el contacto entre la biomasa anaeróbica y el material orgánico degradable, lo cual la convierte en una buena opción para la digestión de desperdicios difíciles con concentraciones elevadas de sólidos, grasa y aceite. Además, el fango principal o fango activado se puede digerir en el ADI-CSTR para aumentar la producción de biogás. (Systems, 2017)

3.6.6 Sistema de plantas acuáticas flotantes

Los cultivos acuáticos o sistemas de plantas acuáticas flotantes son una variación de los humedales artificiales en el que el agua está en contacto con la atmósfera y constituye la fuente principal de oxígeno para aireación; en la que se introduce un cultivo de plantas acuáticas flotantes como *Eichhornia Crassipes* y *Lemna sp*, cuya finalidad es la eliminación de determinados componentes de las aguas a través de sus raíces que constituyen un buen sustrato responsable del tratamiento. Aunque una de las desventajas que presenta este tipo de sistemas es la proliferación de larvas e insectos. (León & Lucero, 2009)

Para mejorar el tratamiento y asegurar el mantenimiento de las condiciones aerobias necesarias para el control biológico de los mosquitos, en los sistemas de plantas acuáticas flotantes se han empleado sistemas complementarios de aireación. (León & Lucero, 2009)

Según Metcalf y Eddy, citado por Celis *et al.* (1995) los sistemas que emplean plantas acuáticas como *Eichhornia crassipes* de agua están diseñados para proporcionar niveles de tratamientos secundarios avanzados. Estos sistemas han sido utilizados como medios de producción de proteínas por las grandes cantidades de biomasa que se generan.

3.6.7 Plantas acuáticas en sistemas de tratamiento

Las macrofitas flotantes comprenden un amplio y variado grupo de plantas, entre las que se destacan el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), la salvinia (*Salvinia Spp.*), la redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*), y algunas especies de lentejas de agua (*Lemna Spp.*, *Spirodella Spp.*) (Schierup, 1989) (Fernandez, 2001) (N. Saenz, 2008)

La morfología de las macrófitas flotantes difiere dependiendo de la especie. Por ejemplo, el Jacinto de agua (especie predominante en los sistemas de tratamiento) es una planta perenne de agua dulce, con desarrollo ascendente, de tallo vegetativo sumamente corto, hojas de color verde brillante y espigas de flores de lavanda. Los pecíolos de las planta son elongados y abultados de aire que contribuye a la flotabilidad de la planta. (Figura 6)

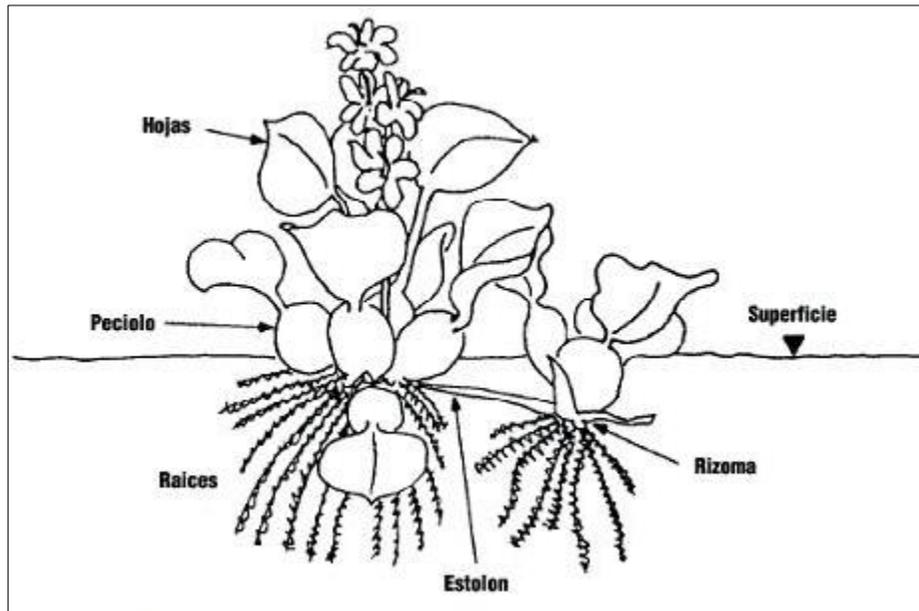


Figura 6. Morfología de una macrófita flotante (*Eichhornia crassipes*)

Fuente: Adaptado de (EPA, 1988)

Según (Brix., 1997) y (Fernandez, 2001), los procesos que tienen lugar para la depuración de contaminantes con macrófitas flotantes se dan a través de tres mecanismos primarios:

- Filtración y sedimentación de sólidos.
- Incorporación de nutrientes en plantas y su posterior cosechado.
- Degradación de la materia orgánica por un conjunto de microorganismos facultativos asociados a las raíces de las plantas; y en los detritos del fondo de la laguna, dependiendo del diseño.

Durante la etapa de crecimiento, las macrófitas absorben e incorporan los nutrientes en su propia estructura (G. Henry-Silva, June 2008.) Y funcionan como sustrato para los microorganismos (Brix., 1997) que promueven la asimilación de estos nutrientes a través de transformaciones químicas, incluyendo nitrificación y desnitrificación.

3.6.8 Eficiencia del uso de macrófitas flotantes

El uso de macrófitas flotantes ha demostrado eficiencias de remoción significativamente altas en todos los constituyentes de las aguas residuales. Una cantidad importante de especies ha sido empleada en sistemas de tratamiento, y en ejercicios investigativos a escala real y a escala laboratorio, siendo el Jacinto de agua, la macrófita de mayor interés dada las características ya señaladas. Esta especie, de acuerdo con los reportes de la literatura, alcanza reducciones de DBO₅ en el orden de 95 %, y hasta 90,2 % para la DQO. En el caso de los sólidos suspendidos se registran disminuciones con valores que se encuentran en el rango de 21 % y 91 %. En cuanto al fósforo total y nitrógeno total, se alcanzaron máximas remociones de 91,7 % y 98,5 % respectivamente, siendo este último, el contaminante con mayor remoción. Los metales también han sido objeto de remoción, encontrándose porcentajes de máxima remoción desde 85 % hasta 95 % para el hierro, cobre, zinc, cadmio y cromo. (Martelo, 2012)

3.7 MARCO LEGAL

Teniendo en cuenta lo establecido en La Constitución Política de Colombia de 1991, se tomarán como referencia las normas vigentes relacionadas con la gestión integral del recurso hídrico y que son relevantes para su uso, protección, conservación y manejo. (Ver tabla 3.)

Tabla 3. Normativa vigente colombiana

NORMATIVA VIGENTE COLOMBIANA	
Ley 99 del 22 diciembre de 1993	“Por la cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el sistema nacional ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones”.
Decreto 1594 de 1984	“Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto- Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos del Ministerio de Agricultura, el Ministerio de Salud y el Departamento Nacional de Planeación.

Decreto – Ley 2811 de 1974	“Por el cual se dicta el Código Nacional de los Recursos Naturales y de Protección al Medio ambiente”.
Decreto 1076 De 2015	“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”.
Resolución 1096 del 17 de noviembre de 2000	“Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS”; Resolución 2320 del 27 de noviembre de 2009“:
Resolución 0631 17 marzo de 2015	“Por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”.
Decreto 3930 de 2010	“Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones”.
Decreto 2667 de 2012	“Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones”

Fuente: Elaboración propia (Pérez, 2019)

ARTÍCULO 15. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas - ARnD para las actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los Capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales. (*Resolución 0631 de 2015-Calidad vertimientos.pdf*, n.d.)

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
Generales		
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	1500,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	50,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00

Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1,00
Grasas y Aceites	mg/L	10,00

Fuente: (Resolución 0631 de 2015-Calidad vertimientos.pdf, n.d.)

4. METODOLOGÍA

4.1 ÁREA DE ESTUDIO

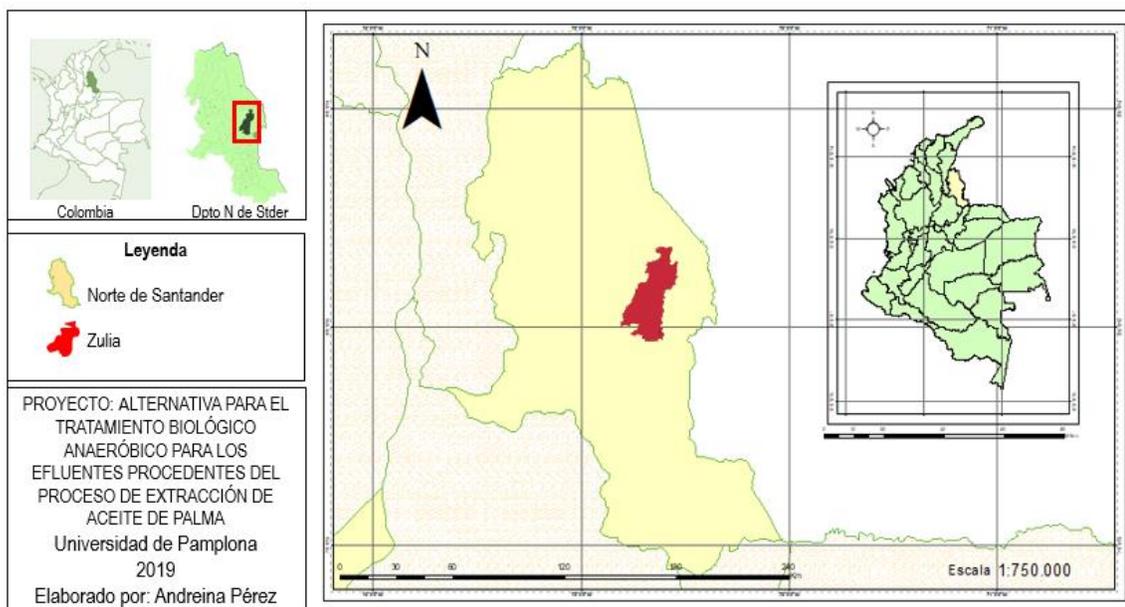


Figura 7. Ubicación del área de estudio

Fuente: (Pérez, 2019)

La planta extractora Cooperativa palma Risaralda, se encuentra ubicada en el municipio de El Zulia, departamento de norte de Santander, específicamente en la vereda Agualasal, vía Tibú, km 7 corregimiento de Astilleros. En norte de Santander la zona donde están los ríos Sardinata y Río Nuevo reúnen las condiciones agro-ecológicas ideales para el cultivo de palma de aceite. Establecidas 4.000 Hectáreas de esta Palma en los Municipios de Tibú, Sardinata, el Zulia, Puerto Santander y Cúcuta - Norte de Santander. (Orozco, Peña, Romero, & Toncon, 2017):

PALMA DE ACEITE EN NORTE DE SANTANDER

El departamento es uno de los mayores productores de aceite de palma, con más de 130000 Ha de área sembrada neta para el año 2012 y en aumento para los últimos años, lo que representa cerca del 32 % de la producción nacional. Las principales zonas de cultivo de

palma de aceite son Tibú y El Zulia, además de pequeñas plantaciones en otras locaciones. Para el año 2012 solo se contaba con una planta extractora, Coopar Ltda, la cual producía cerca de 250000 toneladas de aceite de palma crudo y 60000 toneladas de aceite de palmiste por año. En los últimos años se llevó a cabo la construcción de la extractora Palnorte S.A.S, obteniendo un aumento en la producción (I.C. Garcés, 1997).

COOPERATIVA PALMAS RISARALDA LTDA (COOPAR LTDA)

Creada el 31 de Marzo de 1992, se encuentra ubicada en el municipio del Zulia, en el departamento norte de Santander. Fue creada como respuesta a las marchas campesinas realizadas en los años 1997 y 1998, el gobierno de Colombia en la búsqueda de la sustitución de cultivos ilícitos, hizo presencia en el Municipio de Tibú (N de S) dando mejores resultados a los campesinos para el mejoramiento de vida.

4.2 CARACTERIZACIÓN A TRAVÉS DEL ANÁLISIS PARÁMETROS FÍSICOCQUÍMICOS

Para la caracterización físico-química se realizaron 3 muestreos en cada uno de los tres puntos de muestreo establecidos en donde se colectaron las muestras en recipientes de plástico de 2,5 litros y almacenadas en una caba de icopor con hielo, para realizar su posterior análisis de acuerdo con los métodos establecidos internacionalmente como STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 22ND-EDITION 2012, para la recolección y preservación de las muestras se siguió una cadena de custodia para así asegurar la integridad de estas desde su recolección hasta el reporte de datos. (Ras, 2000)

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Control y Calidad de la Universidad de Pamplona, partiendo de las guías fijadas por el Laboratorio ambiental del IDEAM (IDEAM, Laboratorio de calidad ambiental 2016) y el “MANUAL DE PROCEDIMIENTOS ANALITICOS PARA AGUAS Y EFLUENTES” (Minambiente, 1996). En donde se midieron los siguientes parámetros: DQO, DBO₅, SST, pH, Nitrógeno amoniacal, alcalinidad total, dureza cálcica, color real, hierro, manganeso. En la tabla 5 se resumen los métodos analíticos utilizados en la determinación de cada uno de los parámetros analizados en las muestras de agua.

Tabla 5. Detalle de Puntos de muestreo

PUNTO DE MUESTREO	MUESTRAS TOMADAS	ENVASE	VOLUMEN
--------------------------	-----------------------------	---------------	----------------

Punto 1	Laguna ecualización	4	Plástico	2 L
Punto 2	Laguna anaeróbica 1	4	Plástico	2 L
Punto 3	Vertimiento final	4	Plástico	2 L

Fuente: Pérez (2019)



Figura 8. Recolección de muestras

Fuente: Pérez (2019)



Figura 9. Análisis fisicoquímicos

Fuente: Pérez (2019)

Tabla 6. Métodos para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos.

PARÁMETRO	MÉTODO
DQO	Método de reflujo abierto con dicromato
DBO₅	Método manométrico
pH	Multiparametro
Sólidos suspendidos totales	Métodos gravimétricos
Nitrógeno amoniacal	Espectrofotómetro
Alcalinidad total	Método volumétrico
Dureza cálcica	Método volumétrico
Color real	Espectrofotómetro
Hierro	Espectrofotómetro de absorción atómica
Manganeso	Espectrofotómetro de absorción atómica
Coliformes totales	Microbiológico (NMP/100ml)
Coliformes fecales	Microbiológico (NMP/100ml)

Fuente: AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, (1992), modificado por: (Pérez, 2019)

4.2.1 Análisis microbiológico

Se realizó el análisis de la calidad microbiológica del efluente en cada uno de los puntos seleccionados de acuerdo a lo establecido en la Parte 9000 Microbial Examination de los métodos estandarizados (SMAWW, 2005). En donde se determinaron las bacterias Coliformes totales (BCT), fecales (BCF).

4.2.2 Caracterización de macroinvertebrados

Se realizó un estudio de las comunidades de macroinvertebrados presentes en el canal de drenaje donde son vertidos los residuos finales del sistema de tratamiento que

posteriormente pasan por cultivos de palma y finalmente a la quebrada agualasal, se establecieron tres puntos de muestreo a lo largo de la quebrada con una distancia aproximada de 10 m. Para la recolección de las muestras, se realizó según el método Kick Sampling (Roldán, 2003) (figura 8). Utilizando una red de mano con un diámetro de 25 cm y 40 cm de largo, el método consistió en introducir la red al fondo de la quebrada agitando el sustrato y colocando la red corriente arriba de modo que todos los individuos fueran colectados con mayor eficiencia. El material colectado fue preservado con alcohol al 80% en bolsas ziploc, para luego ser observadas e identificadas en el laboratorio.

Tabla 7. Detalles de las estaciones de muestreo

Estaciones	Coordenadas	Descripción
E1	8°12'14.3"N 72°32'35.3"W	Canal de drenaje de los vertimientos
E2	8°13'6.09"N 72°32'29.17" W	Canal de drenaje de los vertimientos
E3	8°13'6.09"N 72°32'29.17" W	Quebrada agualasal, después del vertimiento

Fuente: (Pérez, 2019)



Figura 10. Recolección de macroinvertebrados
Fuente: Autor



Figura 11. Identificación de macroinvertebrados
Fuente: Autor

4.2.3 Análisis estadísticos

Para el análisis de datos, se organizó la información en una base de datos donde se plasmaron los datos obtenidos por cada variable fisicoquímica en diferentes épocas por muestreo y fueron procesados con ayuda del software estadístico XLSTAT-Pro versión 7.5.2 en versión evaluativa. Se utilizó un análisis de componentes principales (ACP) para observar las correlaciones que se presentan entre variables. Además, se utilizó el Software ICATEST V1.0 (Fernández et al., 2004) para los índices de contaminación ICO.

4.3 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL DISEÑO A IMPLEMENTAR

En el presente trabajo se llevó a cabo la evaluación de un reactor Anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente (UASB) a escala laboratorio para el tratamiento de efluentes de la planta de tratamiento Coopar del Zulia norte de Santander, con el objetivo de evaluar la eficiencia del tratamiento bajo ciertas condiciones de operación controladas como la temperatura; para ello se llevó a cabo lo siguiente.

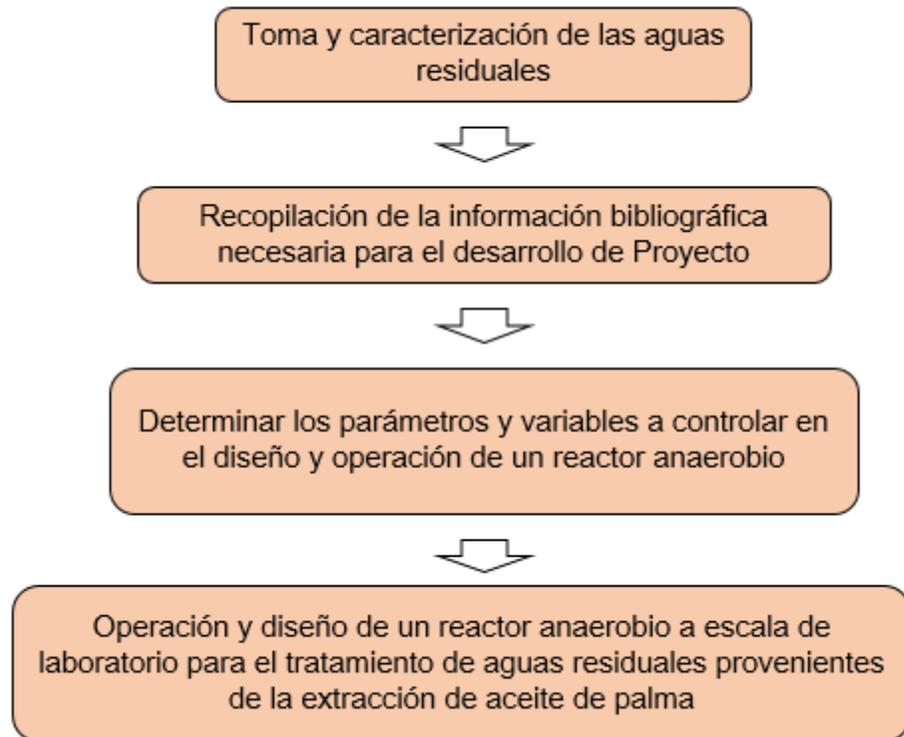


Figura 12. Metodología para la evaluación del reactor anaerobio

Fuente: autor

4.3.1 Parámetros de diseño

Para llevar a cabo la operación del reactor se tiene en cuenta que está basada en el monitoreo de varios parámetros, los cuales están relacionados ya sea con el agua residual, el lodo, el reactor, el contacto del agua residual con el lodo y la forma como está distribuido en el interior de este. En la tabla 8 se muestran los parámetros más importantes y necesarios para la operación del sistema UASB.

Tabla 8. Parámetros de diseño de un reactor tipo UASB

DQO del afluente	5000 - 15000 mg/L
Temperatura del afluente	> 15 °C
Tiempo de retención H.	4 - 12 h
carga orgánica	0,5 - 40 KG DQO/ m3dia
velocidad ascensional	1 – 2 m/h
profundidad del digestor	< 4,5 m
profundidad del sedimentador	< 1,5 m
profundidad del reactor	< 6 m
volumen del reactor	<1500 m3
Eficiencia en la remoción de DQO	60% - 90%

Fuente: (Romero Rojas, 2000)

Tabla 9. Temperatura y TRH

Temperatura	Tiempo de retención hidráulica
16 °C - 19 °C	10 - 14 horas
20 °C - 26° C	7- 9 Horas
> 26 ° C	> 6 horas

Fuente: (Romero Rojas, 2000)

4.3.2 Parámetros y cronograma de monitoreo

Para hacer el muestreo del sistema de tratamiento de los efluentes, se fijaron algunos puntos de seguimiento, los cuales se distribuyeron de la siguiente forma: entre la entrada y la salida

del sistema se tienen dos puntos, en el cual se monitorea la salida del sedimentado primario y por último la salida del reactor. Esto con el fin de hacer seguimiento de los parámetros de control establecidos en este proyecto. La medición de estos parámetros se realizó tres veces por semana midiéndolos una vez al día, cada día por medio, también se alternaron los días de muestreo entre una semana y otra de esta manera:

Tabla 10. Cronograma de muestreo del sistema

Parámetro	Semana 1						Semana 2				
	L	M	MI	J	V	S	L	M	MI	J	V
pH		X		X		X	X		X		X
Temperatura		X		X		X	X		X		X
DQO		X		X		X	X		X		X

Fuente: Autor

4.3.3 Determinación de la eficiencia del sistema de tratamiento

Para comprobar la eficiencia de remoción del reactor, se realiza el análisis de los parámetros pH, temperatura y DQO. Para ello, se establece un muestreo compuesto tanto en la entrada como en la salida del sistema, teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulica de cada una de las unidades de tratamiento que lo compone, que en este caso fueron 2 horas para el sedimentador primario y 9 horas para el reactor UASB. Para determinar la eficiencia del reactor UASB, se realizan los cálculos utilizando la siguiente ecuación:

$$E = \frac{[DQO_i - DQO_s]}{DQO_i} * 100$$

Donde:

- E= porcentaje de eficiencia
- [DQO_i]= Concentración de DQO a la entrada del reactor
- [DQO_s]= concentración de DQO a la salida del reactor

4.4 PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO ALTERNATIVO

4.4.1 Diseño de un biosistema a escala piloto utilizando la *Eichhornia crassipes*

El diseño fue a escala piloto en el invernadero de la Universidad de Pamplona en el cual se utilizaron plantas de *Eichhornia Crassipes* (figura 13). El cual tenía unas longitudes de largo 26 cm, de alto 13cm y de ancho 20cm respectivamente. Se empleó la metodología propuesta

por la US Environmental Protection Agency –EPA (EPA, 2002) para el diseño de sistemas con macrófitas flotantes, la EPA clasifica los sistemas de acuerdo con el contenido de oxígeno disuelto y el método de aireación empleado, teniendo así: sistemas aerobios con juncitos sin aireación suplementaria, en los cuales se lleva a cabo tratamiento secundario y remoción de nutrientes, dependiendo de la carga orgánica; lo que provee la ventaja de tolerar altas cargas orgánicas, y los requerimientos de área son menores; y por último, los sistemas con Jacintos que operan bajo altas cargas orgánicas, con el propósito de lograr tratamientos secundarios. El parámetro determinante en el diseño y operación de estos sistemas es la carga orgánica.

Los criterios de diseño para este sistema están dispuestos en la Tabla 8.

Tabla 11. Criterios de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales crudas con Jacintos de agua

Criterio	Valor de diseño	Calidad esperada
Carga orgánica, kg DBO/ha.d	≤ 220	DBO < 30 mg/l
Tiempo de retención, d	10	SST < 30 mg/l
Carga hidráulica, m ³ /ha.d	1000	
Área de lagunas individuales, ha	0,04	
Profundidad, m	$\leq 1,5$	
Relación longitud/ancho	>3:1	
Temperatura del agua, °C	>10	

Fuente: Tomado de (Romero, 2004)

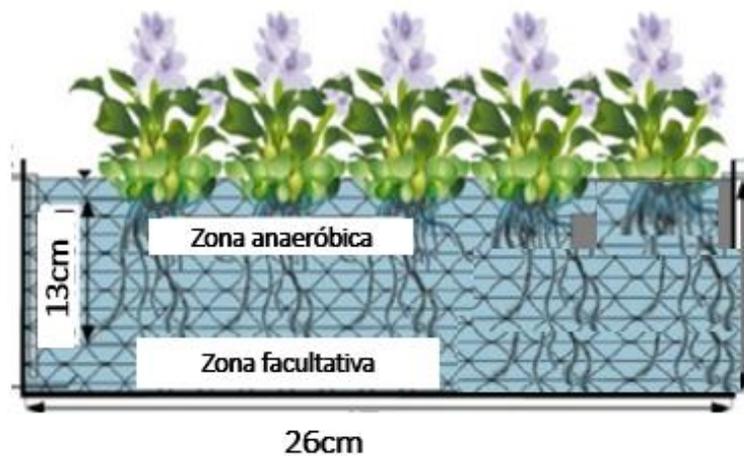


Figura 13. Diseño del biosistema

Fuente: tomado de Valipour, A., Raman, V.K., & Ahn, Y. (2015).

Editado por (Pérez, 2019)

Análisis con macrófitas flotantes

El uso de macrófitas flotantes se ha venido usando desde hace muchos años bajo diversos esquemas de sistemas de tratamiento. En ese sentido, hay una amplia gama de diseños en función de las características de cada uno de los sistemas (EPA, 2002); el más comúnmente empleado es el sistema de humedales. Así, un diseño con macrófitas flotantes puede ser considerado bajo criterios de sistemas de humedales, que la literatura referencia como humedales con plantas flotantes, y humedales con macrófitas emergentes en flotación. (Fernández, 2000)

4. RESULTADOS Y DISCUSION

A continuación, se presentan los resultados obtenidos después realizar los anteriores procedimientos. Los datos fueron obtenidos a través de muestreos durante diferentes momentos del año 2019. Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos específicos, se presentan los resultados de los métodos estadísticos.

4.1. CARACTERIZACIÓN A TRAVÉS DEL ANÁLISIS PARÁMETROS FÍSICOCQUÍMICO

Se evaluó la calidad del agua mediante la determinación de los índices de contaminación (ICOs) utilizando el Software ICATEST V1.0 (Fernández et al., 2004), en el cual se llevó a cabo un análisis comparativo a partir de los índices de contaminación por Ramírez y Viña (1998), los cuales fueron: ICOMI (Índice de Contaminación por Mineralización); ICOpH (Índice de Contaminación por pH); ICOSUS (Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos; ICOMO (Índice de Contaminación por Materia Orgánica) e ICOtemp.

Tabla 12. Índices de contaminación del agua.

	MUESTREOS											
INDICES	1 06/07/2017			2 10/04/2019			3 30/07/2019			4 13/11/2019		
MUESTRA	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
ICOMI	0,73 4	0,66 7	0,667	1	-	1	-			0,667	0,667	0,667
ICOpH	0,65 9	0,03 8	0,005	0,636	0,001	0,046	0,718	0,003	0,01	0,91	0,335	0,644
ICOSUS	1	1	0,188	1	1	0,985	1	1	1	1	1	0,604
ICOMO	0,96 4	0,64 3	1	1	-	-	-	1	-	-	-	1
ICOTemp	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

NULA		BAJA		MEDIO		ALTO		MUY ALTO	
------	--	------	--	-------	--	------	--	----------	--

Fuente: Autor

Según la tabla 8, los índices de contaminación por materia orgánica (ICOMO) y los índices de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) son los que presentan los valores más altos en los diferentes puntos de muestreo, esto es un indicativo de altas concentraciones de materia orgánica y por lo tanto los valores de DBO₅ y DQO altos. En cuanto al índice ICOSUS que en solo dos estaciones de muestreo arrojó valores cercanos a 0, por lo tanto estas aguas residuales presentan contaminación por dicho índice. Por otra parte de acuerdo a los índices ICOMI e ICOpH, presenta contaminación por minerales o influenciado por el pH, cabe destacar que estas aguas residuales se caracterizan por presentar un pH ácido, entre 4 y 5 por lo tanto requieren de un tratamiento adecuado antes de ser vertidos o descargados a aguas superficiales. Con respecto al índice ICOMI este recoge datos en relación con la conductividad y la alcalinidad que en general mantuvieron en rangos de alta contaminación.

La conductividad es el reflejo de todos los sólidos disueltos, lo que se mantuvo en valores 1,9 y 2,72 durante los muestreos y la alcalinidad puede generarse por bicarbonatos de calcio y magnesio que se forman por la acción de CO₂ sobre el suelo. Esta es una medida de la capacidad que tiene el agua de neutralizar un ácido fuerte a un pH determinado que aumenta al acercarse el pH a básico. Todos los puntos de muestreo presentan valores altos y muy altos de ICOMI que se debe a la alta alcalinidad. Y el índice de ICO Temp también presento valores elevados.

A continuación se presentan los resultados de componentes principales.

4.4.2 Análisis de componentes principales

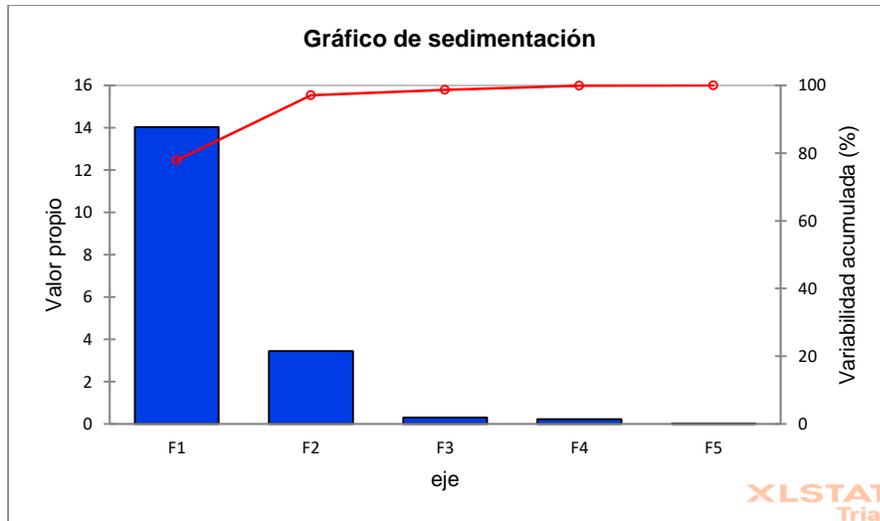
En este apartado se muestran los resultados más relevantes del análisis de componentes principales, se muestra el gráfico de sedimentación el cual ayuda a seleccionar y determinar el número de componentes con base en el tamaño de los valores propios representando así el porcentaje de varianza total explicada. Estos análisis destacan las similitudes o contrastes que presenten estos parámetros. Así como también muestran que elementos están correlacionados y su interpretación se limita a los dos primeros factores, las variables están representadas en 18 parámetros fisicoquímicos. Los resultados muestran cinco factores representados porcentualmente de esta manera. El primer factor explica el 85% de varianza, el segundo el 11%, el tercero el 1,3%, el cuarto el 1% y el quinto el 0,5, siendo el factor 1 y no los que explican mejor la varianza.

Tabla 13. Valores propios

	F1	F2	F3	F4	F5
Valor propio	15,385	2,084	0,252	0,182	0,097
Variabilidad (%)	85,472	11,578	1,399	1,011	0,540
% acumulado	85,472	97,050	98,449	99,460	100,000

Fuente: Autor

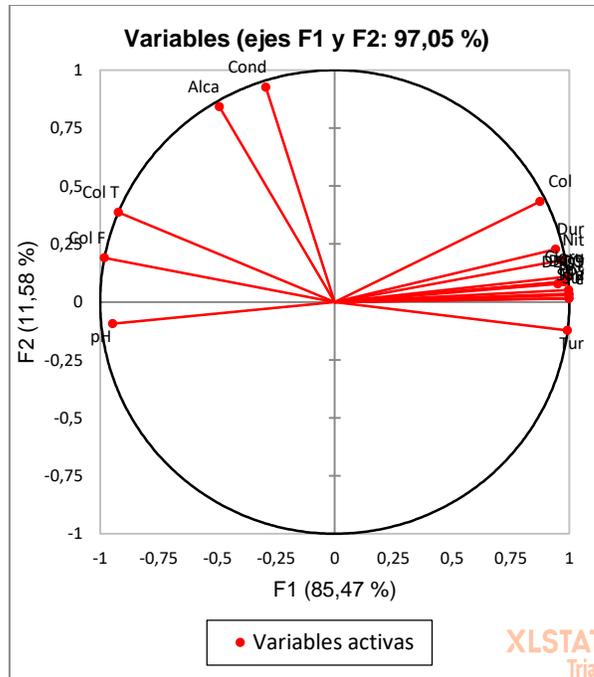
El análisis de componentes principales (ACP) sintetizó los patrones fisicoquímicos de las aguas residuales de la planta extractora de aceite de palma (Figura 14), indicando que el primer componente respondió por el 63,65% y el segundo 16,54% de la varianza. De este modo se puede identificar cuales variables tienen mayor efecto en cada componente.



Gráfica 1. Gráfico de sedimentación

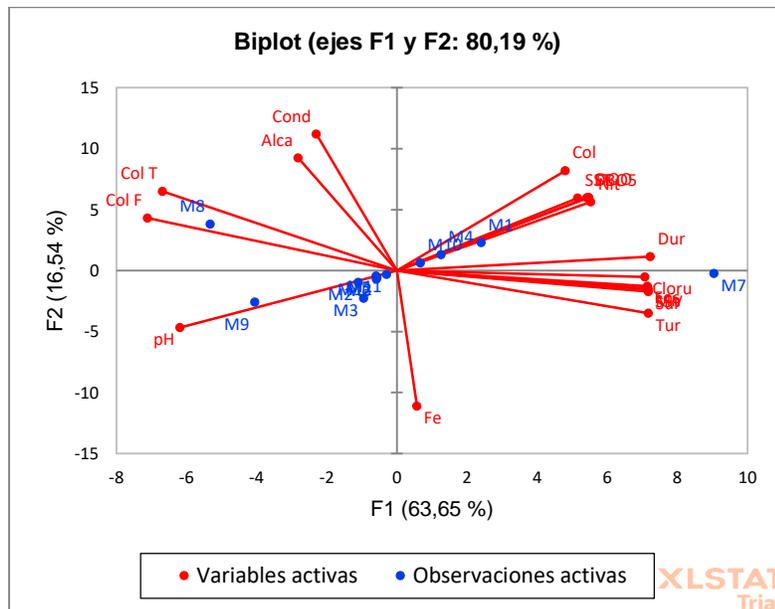
Fuente: Autor

En la gráfica 2, la F1 aporta el 85,47% y la F2 el 11,58, las variables que se aproximan a -1 o 1 indican que esta afecta considerablemente al componente; las variables cercanas a 0 indican que esta afecta muy poco al componente, es decir las variables con mayor distancia al origen explican en mayor proporción su varianza, en este caso, color, dureza, sólidos totales, solidos volátiles, DQO, DBO₅, cloruros, nitritos, hierro y manganeso; este conjunto de variables relaciona la mayor cantidad de correlaciones positivas por lo tanto, aporta en mayor grado los resultados del primer componente. Lo anterior, muestra que dentro de estas variables se encuentran algunas de las variables fisicoquímicas de contaminación por mineralización, en las cuales se encuentran, dureza, solidos disueltos, cloruros y fosfatos. Así como también contaminación por solidos suspendidos haciendo referencia a los compuestos inorgánicos.



Gráfica 2. Distribución de las variables fisicoquímicas en los Componentes Principales I y II

Asimismo, turbiedad, DQO, DBO₅ y sólidos suspendidos; muestran una proximidad en el plano cartesiano, es decir, que hay correlación entre ellas, estas variables relaciona procesos de óxido- reducción de la materia orgánica en los procesos de contaminación del agua.



Gráfica 3. Gráfico biplot de Componentes principales muestreros en azul y en rojo parámetros fisicoquímicos.

Fuente: Autor

Por otra parte, las variables que se muestran con correlaciones negativas, el pH, alcalinidad, conductividad, Coliformes totales y Coliformes fecales se correlacionaron negativamente con la DQO y DBO₅, no están indicando relación alguna, se puede inferir que estos valores no representan significancia ya que dentro de los 4 muestreos realizados solo se tomaron una vez, esto en cuanto a alcalinidad, conductividad, Coliformes totales y Coliformes fecales, por lo tanto este grupo no tiene tanta importancia en la correlaciones encontradas. La correlación negativa entre el pH y la acidez se debe a las altas concentraciones de materia orgánica presentes en las aguas residuales.

Respecto a la alcalinidad total, con la dureza estos presentan una correlación negativa, por lo general estas dos variables no difieren mucho cuando se trata de agua blandas, pero en este caso no están correlacionas por lo tanto estas aguas residuales poseen características de aguas duras.

También, en el gráfico 3 que el punto de muestreo 1 representado por (M1, M4 y M10) presentó los valores más altos en la caracterización fisicoquímica en las diferentes fechas por lo tanto muestran una correlación positiva entre sí, por el contrario de los puntos 2 y 3 que representaron valores mucho más bajos, con respecto al tercer muestreo realizado representados por (M7, M8 y M9) presentan mayor significancia con respecto a los demás ya que en este se analizaron todas las 18 variables.

Tabla 14. Resultados análisis fisicoquímicos

		08/05/2017 lluvia			10/04/19 lluvia			30/07/19 seca			13/11/2019 seca				
		Muestra n°1	Muestra n°2	Muestra n°3	Muestra n°1	Muestra n°2	Muestra n°3	Muestra n°1	Muestra n°2	Muestra n°3	Muestra n°1	Muestra n°2	Muestra n°3	Resolución 631/2015	Cumplimiento con la norma
	Unidades	Laguna ecualización	Laguna anaeróbica 1	Vertimiento final	Laguna ecualización	Laguna anaeróbica 1	Vertimiento final	Laguna ecualización	Laguna anaeróbica 1	Vertimiento final	Laguna ecualización	Laguna anaeróbica 1	Vertimiento final		
DQO	mg/L	37710	587	353	42500	520	472	43806	261	173	45600	620	540	1.500,00	NO
DBO ₅	mg/L	24915	369,8	179	26350	322	293	27159	161,8	107,2	28272	378,2	330	600,00	NO
pH	Unidades de pH	4,8	6,57	7,46	4,83	7,02	8,13	4,72	6,67	7,67	4,32	8,81	9,18	6,00 - 9,00	SI
Conductividad	mS/cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,19	2,72	1,98		
Turbidez	NTU	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32550	7280	11720		-----
Color	mg/L CaCO ₃	-	-	-	35900	16000	14400	32800	21400	24200	38240	27400	21040		-----
Dureza	mg/L CaCO ₃	-	-	-	403	277	151	-	-	-	580	180	120	Análisis y Reporte	-----
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	-	-	-	1500	2000	500	1000	2000	1600	1500	2900	1650	Análisis y Reporte	-----
Cloruros	mg/l Cl ⁻	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1772	673,5	531,7	500,00	NO
Nitritos	mg/l N-NO ₂	-	-	-	-	-	-	0,68	0,05	0,01	0,5	0,06	0,04	Análisis y Reporte	-----
Sulfatos	mg/l SO ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	400	8	9	500,00	-----
Fosfatos	mg/l PO ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	290	30	18	Análisis y Reporte	-----
Hierro (Fe)	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-----	0,0026	0,0457	1,00	NO
Manganeso (Mn)	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5821	0,0245	0,0111	-----	
SST	mg/l	103	-	69,5	14300	370	355	12900	570	350	11780	448	208	400,00	NO
SSV	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11120	368	196	Análisis y Reporte	-----
Coliformes totales	NMP/100ML	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30x10 ³	97x10 ³	67x10 ³	Análisis y Reporte	-----
Coliformes fecales	NMP/100ML	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10x10 ³	34x10 ³	28x10 ³	Análisis y Reporte	-----

4.4.3 Descripción de macroinvertebrados

La evaluación de la calidad del agua se ha realizado tradicionalmente basada en los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos. Sin embargo, en los últimos años, muchos países han aceptado la inclusión de los macroinvertebrados para evaluar la calidad de los ecosistemas acuáticos. Para el ecólogo, un ecosistema acuático es un sistema funcional en el cual hay un intercambio cíclico de materia y energía entre los organismos vivos y el ambiente abiótico. Por lo tanto, la biología y la química, están estrechamente relacionadas; en la evaluación de las aguas naturales y contaminadas juegan papeles complementarios. (Roldán G. , 2016)

El Biological Monitoring Working Party (BMWP) fue establecido en Inglaterra en 1970, como un método sencillo y rápido para evaluar la calidad del agua usando los macroinvertebrados como bioindicadores. Este método sólo requiere llegar hasta nivel de familia y los datos son cualitativos (presencia o ausencia). El puntaje va de 1 a 10 de acuerdo con la tolerancia de los diferentes grupos a la contaminación orgánica (Roldán G. , 2003)

Con base en el conocimiento que actualmente se tiene en Colombia sobre los diferentes grupos de macroinvertebrados hasta el nivel de familia, se propone utilizar el método BMWP / Col. Tabla 13. Como una primera aproximación para evaluar los ecosistemas acuáticos del país (Roldán G. , 2003)

Se capturaron un total de 347 individuos en los 3 muestreos realizados, los cuales pertenecen a 1 phylum, 1 clase, 6 órdenes y 25 familias.

En la tabla 11 se muestra de forma general los niveles taxonómicos hasta familia de los macroinvertebrados encontrados en los puntos de muestreo. Por otro lado, en la tabla 12 se puede observar el puntaje BMWP/Col para cada una de las familias.

Tabla 15. Familias de macroinvertebrados acuáticos encontradas en el canal de drenaje y la Q. agualasal

Reino	Phylum	Clase	Orden	Familia
Animal	Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Glossosmatidae Limnephilidae Philopotamidae Hydrospychidae
			Díptera	Culicidae Ephydriidae Trichoceridae Chaoboridae Simuliidae Tabanidae Ceratopogonidae
			Ephemeroptera	Baetidae Leptophlebiidae Trichoceridae Heptageniidae
			Coleóptera	Hydrophilidae Elmidae
			Plecóptera	Perlidae
			Hemíptera	Naucoridae Corixidae

Fuente: Autor

Tabla 16. Puntaje de las familias observadas en el canal de drenaje y en la quebrada agualasal de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP/Col.

Familias	Puntaje
Perlidae, Heptageniidae	10
Leptophlebiidae	9
Philopotamidae	8
Hydrospychidae, Naucoridae, Elmidae, Hydrospychidae, Limnephilidae, Glossosomatidae	7
Ceratopogonidae, Ptychopteridae, Baetidae, Naucoridae, Glossosomatidae, Simuliidae, Ptychopteridae, Tabanidae	4
Hydrophilidae, Corixidae	3

Fuente: Autor

La composición y distribución de las familias de macroinvertebrados, se relaciona con las condiciones biológicas y ecológicas en las que se encuentre el hábitat, así mismo la adaptación de estos y su grado de tolerancia o sensibilidad según el cambio de las condiciones del ecosistema que indique la calidad del agua en la que se encuentren. A continuación se hace una descripción de los órdenes más abundantes encontrados en el canal de drenaje y la quebrada agualasal.

4.4.4 Principales macroinvertebrados comunes

4.4.5 Díptera.

Los dípteros acuáticos constituyen un de los órdenes de insectos más complejos, más abundantes y más ampliamente distribuidos en todo el mundo. Su literatura a nivel mundial es tan abundante, que para analizarla con cierto grado de detalle habría que hacerlo por familias, y en ciertos casos por géneros, su hábitat es muy variado; se encuentran en ríos, arroyos, quebradas, lagos, en todas las profundidades, depósitos de agua en las brácteas de muchas plantas y en orificios de troncos viejos, y aun en las costas marinas, existen representantes de aguas muy limpias como la familia Simuliidae o contaminadas como la familia Tipulidae y chironomidae. En cuanto su alimentación es muy variada. (GONZÁLEZ & COBO, 2006)

4.4.6 Coleóptera

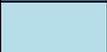
Su gran diversidad ecológica se expresa en la capacidad de colonizar todo tipo de ambientes entre ellos el acuático, abarcando desde aguas continentales hasta sectores litorales o de marismas, y desde zonas litorales hasta ríos de alta montaña, e inclusive lagunas hipersalinas, además todos los cuerpos de aguas continentales constituyen hábitats favorables para los coleópteros acuáticos donde forman parte de las comunidades lólicas y lénticas.

4.4.7 Hemíptera

Viven en remansos de ríos y quebradas: poco resisten las corrientes rápidas, son frecuentes también en lagos, ciénagas y pantanos. Algunas especies resisten cierto grado de salinidad y las temperaturas de las aguas termales. Los hemípteros son depredadores de insectos acuáticos y terrestres; las especies más grandes pueden alimentarse de peces pequeños y

crustáceos. Los hemípteros son cosmopolitas, conociéndose cerca de 3000 especies alrededor del mundo, de estas, cerca de 700 se han reportado en el trópico. (GONZÁLEZ & COBO, 2006)

Tabla 17. Clases de calidad de agua, valores BMWP/Col, significado y colores para representaciones cartográficas

<i>Clase</i>	<i>Calidad</i>	<i>BMWP/Col</i>	<i>Significado</i>	<i>color</i>
I	Buena	>150	Aguas muy limpias a limpias	
		101-120	Aguas no contaminadas	
II	Aceptable	61-100	Aguas ligeramente contaminadas	
III	Dudosa	36-60	Aguas moderadamente contaminadas	
IV	Crítica	16-35	Aguas muy contaminadas	
V	Muy crítica	<15	Aguas fuertemente contaminadas	

Fuente (Roldán, 2012)

De acuerdo con el índice BMWP/Col para determinar la calidad del agua, se halló que los puntajes se encontraban dentro de un rango desde 13 a 79, en donde los puntos 1 y 2 son los que presentaron puntajes más bajos, lo que se refleja una calidad de crítica a muy crítica para estos; mostrando así un alto grado de contaminación en ellas, al contrario el tercer punto presento puntajes más altos, con calidad aceptable mostrando así un menor grado de contaminación , la tabla 18 muestra los valores del índice BMWP/Col.

Tabla 18. BMWP/Col y su significado para los puntos de muestreo

	<i>Muestreo</i>	<i>Clase</i>	<i>BMWP/Col</i>	<i>Calidad</i>	<i>Significado</i>	<i>Color</i>
Punto 1	1	IV	33	Crítica	Aguas muy contaminadas	
	2	V	13	Muy crítica	Aguas fuertemente contaminadas	
Punto 2	1	IV	31	Crítica	Aguas muy contaminadas	
	2	IV	28	Crítica	Aguas muy contaminadas	
Punto 3	1	II	79	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas	
	2	II	76	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas	

Fuente: Autor



Figura 14. Macroinvertebrados acuáticos encontrados
Fuente: Autor

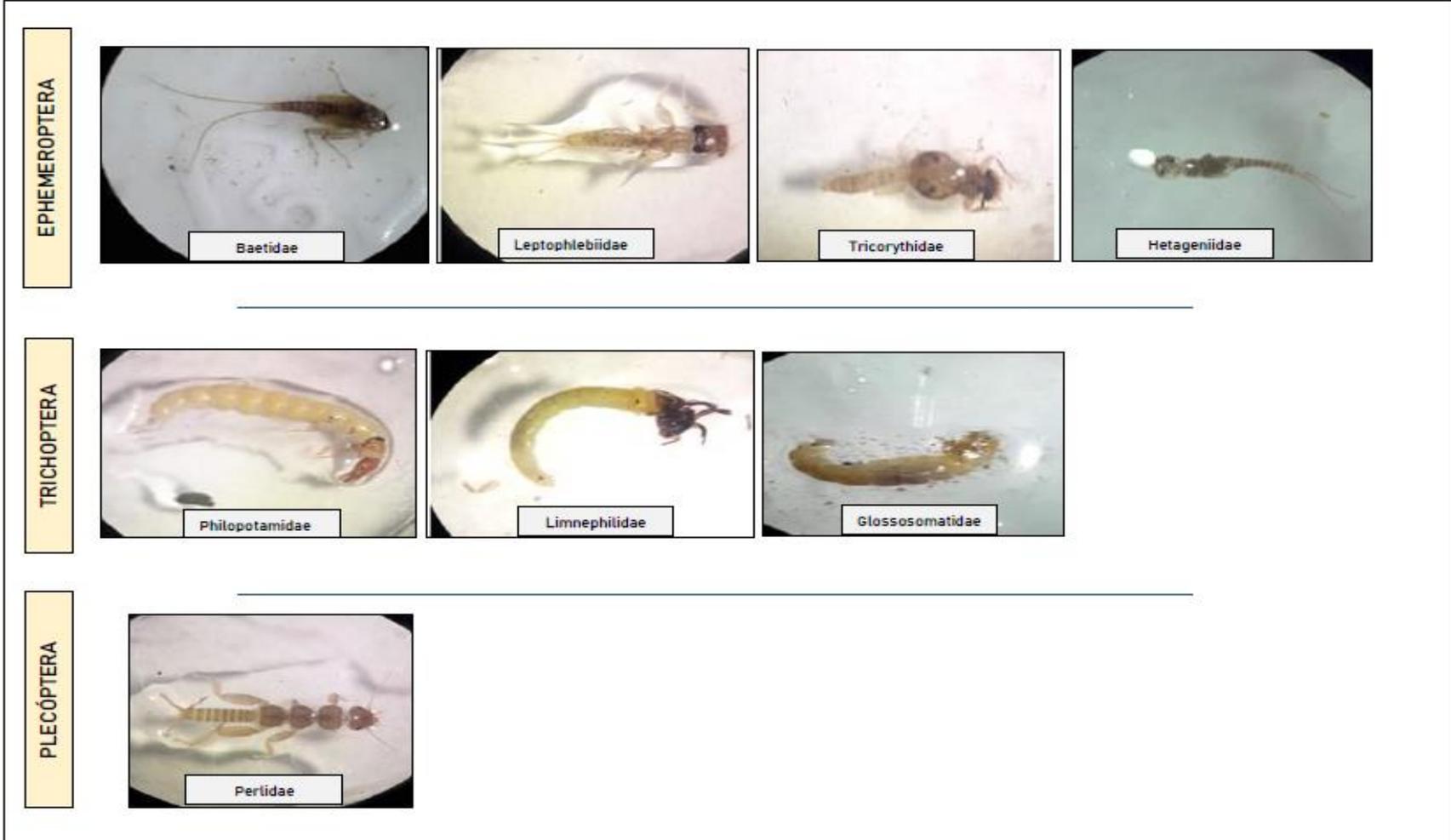


Figura 15. Macroinvertebrados acuáticos encontrados

Fuente: Autor

4.5 PROPUESTA DE UN SISTEMA ANAERÓBICO DE TIPO UASB

4.6 Montaje y operación del sistema de tratamiento

El reactor tipo UASB a escala laboratorio, está compuesto por: un sistema de alimentación, un tanque, una bomba peristáltica, el reactor UASB, un dispositivo de medición de la producción de biogás y un colector para el efluente (tanque). El volumen del reactor UASB es de 40 L.

4.6.1 Diseño y montaje del sistema de pre-tratamiento

Se tuvieron en cuenta los parámetros establecidos en el RAS 2000, asumiendo una velocidad en el sedimentador (V_s) de 0.5m/h, tiempo de retención hidráulica de 2 horas, caudal (Q) 74ml/min. Para esto se realizaron los siguientes cálculos.

Área del sedimentador

$$A = \frac{Q}{V}$$

$$A = \frac{0,0044m^3/h}{0.5m/h}$$

$$A = 0.0088 m^2 = L^2$$

$$L = \sqrt{0.0088m^2}$$

$$L = 0.094m$$

$$B = \frac{A}{L}$$

$$B = \frac{0.008m^2}{0.1 m} = 0.08$$

$$A * = 0.1m * 0.1m = 0.01m^2$$

Volumen sedimentador

$$V = Q * TRH$$

$$V = 0,0044 \frac{m^3}{h} * 2h$$

$$V = 0.0088m^3$$

Longitud sedimentador

$$V = A * L$$

$$L = \frac{0.0088m^3}{0.01 m^2} = 0,88 m$$

4.6.2 Adecuación del reactor UASB

Para la adecuación del reactor se calcularon los parámetros para la operación de este, el tiempo de retención hidráulica (TRH) fue de 9 horas, temperatura de 20 °C y se estableció un caudal (Q) de operación de 74ml/min. Para esto se realizaron los siguientes cálculos:

$$Q = V/TRH$$

$$Q = \frac{40L * \frac{1000ml}{1l}}{9h * \frac{60min}{1h}}$$

$$Q = 74 \frac{ml}{min}$$

Luego se calculó el área del reactor

$$Ar = \pi \frac{D^2}{4}$$

$$Ar = \pi \frac{15.24cm^2}{4}$$

$$Ar = 0.0182m^2$$

Altura del reactor

$$H = \frac{V}{\pi * r^2}$$

$$H = \frac{4000cm^3}{\pi * 7,62^2}$$

$$H = 2,19 m$$

Carga orgánica volumétrica: COV

$$COV = \frac{Q * [c]}{V}$$

$$COV1 = 13.31 \frac{Kg}{m^3 día}$$

$$COV2 = 15.98 \frac{Kg}{m^3 día}$$

$$COV3 = 18.64 \frac{Kg}{m^3 día}$$

Carga hidráulica superficial:

$$CHS = \frac{Q}{A}$$

$$CHS = \frac{74ml/min}{182.4cm^2}$$

$$CHS = 0,40 \frac{cm^3}{cm^2min}$$

Según la bibliografía el reactor tipo UASB utilizado cumple con los parámetros de diseño establecidos por los diferentes autores.

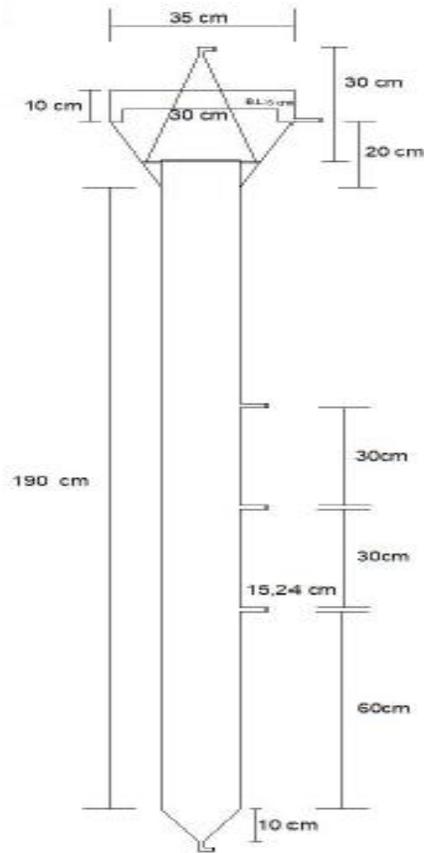


Figura 16. Reactor tipo UASB

Fuente: autor

4.6.3 Preparación del sustrato de alimentación

En esta etapa se usaron concentraciones de 5000 mgDQO/L, 6000mgDQO/L y 7000 mgDQO/L para las cargas orgánicas volumétricas 1,2, y 3. Debido a las concentraciones de los efluentes fue necesario hacer diluciones como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$V_1 * C_1 = V_2 * C_2$$

$$V_1 = \frac{V_2 * C_2}{C_1}$$

$$V_1 = \frac{20 * 5000 \frac{mg \text{ DQO}}{L}}{11800 \frac{mg \text{ DQO}}{L}}$$

$$V_1 = 8,47 \text{ L}$$

De igual forma se hicieron los cálculos para las concentraciones 6000mgDQO/L y 7000 mgDQO/L en el cual se obtuvieron volúmenes de 10,17L y 11,86 L.

4.6.4 Arranque y bioadaptación del reactor UASB

El arranque del reactor se inició mediante la inoculación de estiércol de cerdo diluido en 10 litros y se introdujo un volumen de la mezcla equivalente al 25% de la capacidad del reactor y se completó el volumen con agua residual y se recirculo por tres días. En la fase de bioadaptación al sustrato se preparó una mezcla de 20 L de aguas residuales.

4.7 Operación del reactor

El sistema de tratamiento de efluentes procedentes de la extracción de aceite de palma se manejó aplicando cargas orgánicas volumétricas crecientes de $13,31 \frac{Kg}{m^3 día}$ hasta llegar a una COV de $16,64 \frac{Kg}{m^3 día}$, se evaluaron y monitorearon los parámetros pH, DQO y temperatura donde se obtuvieron los siguientes resultados:

4.7.1 pH Y Temperatura

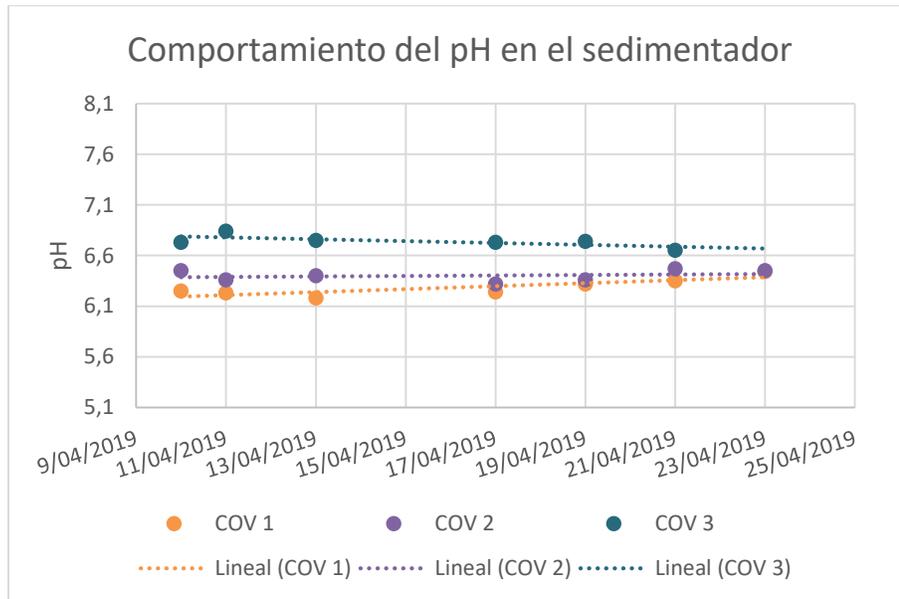
Estos dos parámetros se monitorearon a la salida del pre-tratamiento y en la salida del reactor UASB, se obtuvieron los siguientes resultados de pH que se muestran en la tabla 18 y en las gráficas 1 y 2.

Tabla 19 . Comportamiento del pH y el tiempo durante la operación

Fecha	pH sedimentador					pH UASB					
	COV 1	Fecha	COV 2	Fecha	COV 3	Fecha	COV 1	Fecha	COV 2	Fecha	COV 3
10/04/2019	7,25	25/04/2019	7,45	6/05/2019	7,73	4/04/2019	7,3	21/04/2019	7,3	3/05/2019	7,77
11/04/2019	7,23	27/04/2019	7,36	8/05/2019	7,84	6/04/2019	7,23	23/04/2019	7,47	5/05/2019	7,8
13/04/2019	7,18	29/04/2019	7,4	10/05/2019	7,75	8/04/2019	7,3	25/04/2019	7,43	7/05/2019	7,69
17/04/2019	7,24	1/05/2019	7,32	12/05/2019	7,73	10/04/2019	7,21	27/04/2019	7,31	9/05/2019	7,7
19/04/2019	7,32	2/05/2019	7,36	13/05/2019	7,74	11/04/2019	7,22	29/04/2019	7,38	11/05/2019	7,73
21/04/2019	7,35	3/05/2019	7,47	14/05/2019	7,65	13/04/2019	7,34	31/04/2019	7,43	12/05/2019	7,72
23/04/2019	7,44	4/05/2019	7,45			17/04/2019	7,3	1/05/2019	7,3	13/05/2019	7,75
						19/04/2019	7,36			14/05/2019	7,73
PRMEDIO	7,287142		7,40142857		7,74		7,2825		7,37428571		7,73625

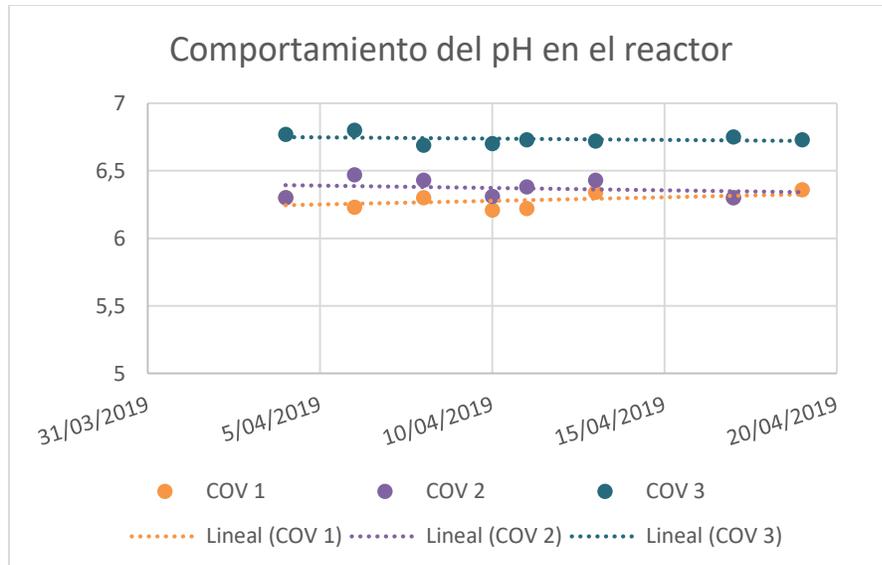
Fuente: autor

Se observaron al inicio de la operación de reactor que el comportamiento del pH del sistema oscilo entre 7,18 - 7,47 en el sedimentador y 7,22 -7,8 en el UASB, estos valores son apropiados en comparación con los valores obtenidos en la caracterización fisicoquímica por lo anterior se evidencia que el sistema de tratamiento empleado no afecta de manera significativa el pH de los efluentes. A lo largo dela operación del sistema el comportamiento de pH no exhibió una alteración significativa. Estos valores se consideran dentro de un adecuado para que se dé el proceso de digestión anaerobia según (Ruiz *et al.*, 2000); (Metcalf y Eddy, 1995)



Gráfica 4. Comparación pH en el sedimentador

Fuente: autor



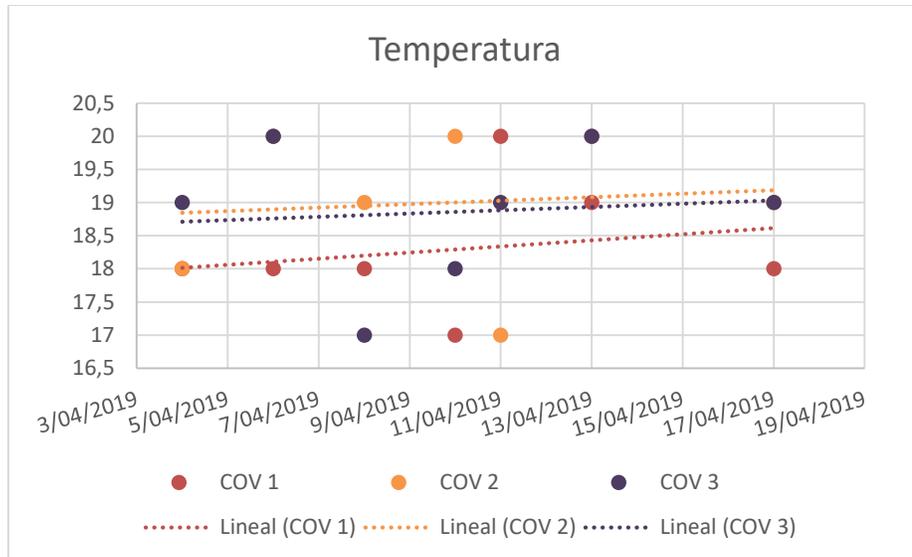
Gráfica 5. Comparación pH en el reactor

Fuente: autor

Tabla 20. Temperatura en el sedimentador

Temperatura sedimentador					
Fecha	COV 1	Fecha	COV 2	Fecha	COV 3
4/04/2019	18,00	21/04/2019	18,00	3/05/2019	19,00
6/04/2019	18,00	23/04/2019	20,00	5/05/2019	20,00
8/04/2019	18,00	25/04/2019	19,00	7/05/2019	17,00
10/04/2019	17,00	27/04/2019	20,00	9/05/2019	18,00
11/04/2019	20,00	29/04/2019	17,00	11/05/2019	19,00
13/04/2019	19,00	31/04/2019	20,00	12/05/2019	20,00
17/04/2019	18,00	1/05/2019	19,00	13/05/2019	19,00
19/04/2019	19,00			14/05/2019	20,00

Fuente: autor



Gráfica 6. Comportamiento Temperatura en el sistema

Fuente: autor

Teniendo en cuenta que el agua residual presenta una temperatura mayor a la ambiente, se puede observar que la temperatura oscilo de 18° a 20 °C; la temperatura del sedimentador primario se mantiene cerca a la deseada que es 20 °C.

4.7.2 Eficiencia del sistema de tratamiento

Los siguientes resultados se obtuvieron evaluando la diferencia de DQO entre la entrada y la salida de cada unidad. En la tabla 20 se muestran los resultados obtenidos en el monitoreo al sedimentador primario así como también la eficiencia máxima y las concentraciones del afluente y el efluente.

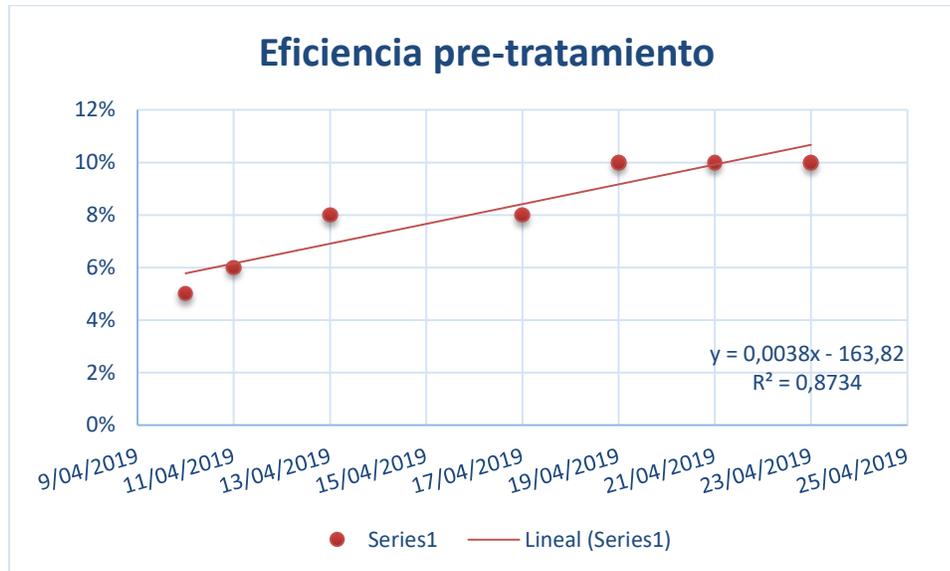
Tabla 21. Datos del Pre-tratamiento

Fecha	Hora	Sedimentador		
		DQO entrada (mg/l)	DQO salida (mg/l)	Eficiencia
10/04/2019	9:00 am	5000	4750	5%
11/04/2019	9:00 am	5000	4700	6%
13/04/2019	9:00 am	5000	4600	8%
17/04/2019	9:00 am	5000	4600	8%

19/04/2019	9:00 am	5000	4500	10%
21/04/2019	9:00 am	5000	4500	10%
23/04/2019	9:00 am	5000	4500	10%

Fuente: autor

En el gráfico se observa que se logró una eficiencia del 10% el cual se mantuvo estable durante la operación del sistema.



Gráfica 7. Eficiencia vs tiempo sedimentador

Fuente: autor

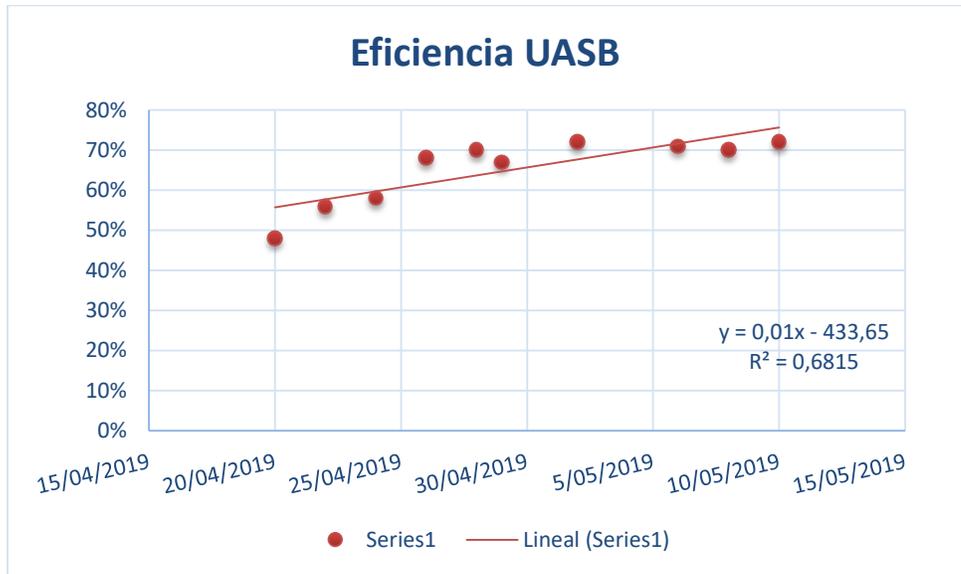
En la siguiente tabla se observan los valores de eficiencia obtenidos por el reactor UASB para la COV 1, además de las concentraciones de entrada y salida del mismo.

Tabla 22. Datos de UASB COV 1

Fecha	Hora	UASB		Eficiencia
		DQO entrada (mg/l)	DQO salida (mg/l)	
20/04/2019	3:00 pm	5000	2600	48%
22/04/2019	3:00 pm	5000	2200	56%
24/04/2019	3:00 pm	5000	2080	58%
26/04/2019	3:00 pm	4750	1510	68%
28/04/2019	3:00 pm	4700	1420	70%
29/04/2019	3:00 pm	4600	1500	67%
02/05/2019	3:00 pm	4600	1270	72%
06/05/2019	3:00 pm	4500	1300	71%
08/05/2019	3:00 pm	4500	1330	70%

10/05/2019	3:00 pm	4500	1280	72%
------------	---------	------	------	-----

Fuente: autor



Gráfica 8. Eficiencia vs tiempo UASB

Fuente: autor

4.8 PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO ALTERNATIVO BIOLÓGICO

Según (García, 2012), el pH de las aguas residuales debe ser entre 6.5 y 8.5 entre neutra y alcalina, el valor máximo aceptado por la normativa ambiental es 9 en donde existe la mayor parte de la vida biológica. En la gráfica 9, el comportamiento del pH se muestra constante las muestras con altas cargas representan un pH hacia la basicidad, esto es debido al origen y naturaleza de las aguas residuales provenientes del proceso de extracción de aceite de palma, lo que se busca es adecuar el pH de las lagunas del sistema de tratamiento con el estándar.

Tabla 23. Verificación de Varianza

	Prueba	Valor-P
Levene's	5,3277	0,00127697

Fuente: autor

En la tabla 23, se evalúa la hipótesis de que la desviación estándar de pH dentro de cada uno de los días de tratamiento es la misma. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del

95,0% de confianza. La tabla también muestra una comparación de las desviaciones típicas para cada par de muestras. P-valores por debajo de 0.05, de los cuales hay 10, indican una diferencia estadísticamente significativa entre las dos sigmas al 5% de nivel de significación.

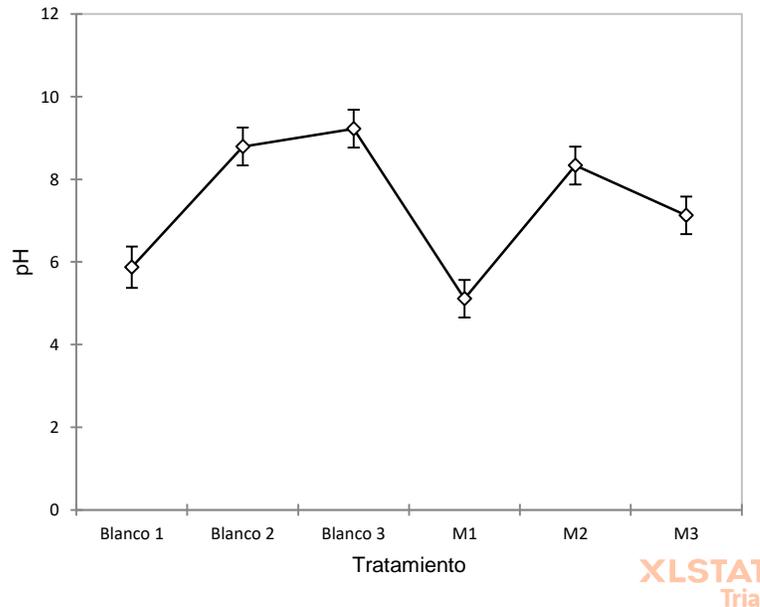
Tabla 24. Tabla ANOVA para pH por Tratamiento

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	82,7828	5	16,5566	57,36	0,0000
Intra grupos	8,65973	30	0,288658		
Total (Corr.)	91,4425	35			

Fuente: autor

La razón-F, que en este caso es igual a 57,357, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de ph entre un nivel de tratamiento y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Grafico de intervalos de pH vs Tratamiento



Gráfica 9. Intervalos de pH vs tratamiento

Fuente: autor

Se realizaron dos seguimientos de la DQO, en cada uno de los tratamientos. Las pruebas fueron el primer día y el último. En la tabla 17 se muestran cada una de las concentraciones iniciales y finales de DQO en mg/L así como también las remociones en porcentajes.

Tabla 25. Remociones de DQO en cada uno de los tratamientos.

DQO mg/L	TRATAMIENTO				Eficiencia
	Sin tratamiento Control		Con tratamiento <i>E. crassipes</i>		
	Inicio	Final	Inicio	Final	
M1	45600	45896	45600	10480	77,01%
M2	620	635	620	154	75,16%
M3	540	5	540	112	79,25%

Fuente: autor

Los análisis mostraron una reducción notable en DQO en las muestras de aguas residuales tratadas con *E. crassipes*, según (Reddy, 1981) la implementación de macrófitas en aguas residuales agota el CO₂ disuelto durante la actividad fotosintética, esta actividad aumenta el oxígeno disuelto del agua residual, creando así condiciones que favorecen las bacterias aeróbicas que funcionan en cooperación junto con *E. crassipes* para reducir los niveles de DQO. Los resultados indicaron una reducción del 70% en un corto periodo.

CONCLUSIONES

El análisis de componentes principales ayudo a identificar los factores responsables de la verificación de la calidad del agua de las muestras de aguas residuales, como mineralización y contaminación orgánica. Por otra parte, los índices de contaminación ICO mostraron la contaminación presente por mineralización y materia orgánica, principalmente en el primer punto de muestreo del sistema de tratamiento de la empresa, mostrando así la importancia de estos para reconocer el estado de cuerpo de agua ya que estos toman las variables, las integran entre si mostrando su correlación y explicando de mejor forma los diversos problemas ambientales presentes.

El análisis de la calidad del agua mediante indicadores biológicos (macroinvertebrados), apoyaron los resultados fisicoquímicos obtenidos, presentando los puntos 1 y 2 mala calidad y poca diversidad en el canal de drenaje; el punto 3 presento la menor grado de contaminación en la quebrada agualasal y los resultados del índice BMWP/Col sirvieron como respaldo de los índices de contaminación y calidad del agua

Los resultados obtenidos demuestran que un reactor de tipo UASB es eficiente para tratar los efluentes provenientes del proceso de extracción de aceite de palma al lograr un porcentaje de remoción del 72%, para un TRH de 9 horas y una carga orgánica COV de $13,31 \frac{Kg}{m^3 día}$ hasta llegar a una COV de $16,64 \frac{Kg}{m^3 día}$.

Durante el tiempo de arranque del reactor este presento un comportamiento satisfactorio en las diferentes cargas trabajadas, lo que confirma que el biotratamiento es una alternativa viable para el tratamiento anaerobio de las aguas residuales provenientes de la extracción de aceite de palma.

Con el diseño del biosistema con *Eichhornia crassipes* demostró que es una alternativa que puede usarse la remoción de materia orgánica. Además que es de fácil implementación y uso. Estas realizan remociones significativas de la materia orgánica presentes en las aguas residuales procedentes de la extracción de aceite de palma con lo cual puede llegar a cumplirse lo requerido con la norma 631 de 2015, complementándolo con otro tratamiento.

RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir investigando los procesos de tratamiento de aguas residuales procedentes del proceso de extracción de aceite de palma, utilizando reactores de tipo UASB, para determinar con exactitud la temperatura incidencia de la temperatura en el proceso de biodegradación. Además se recomienda tener en cuenta para el estudio y seguimiento tener en cuenta otros parámetros para el monitoreo como la BDO₅, SSV, SST, alcalinidad y acidez con lo cual se pueda mejorar la evaluación del sistema.

Se recomienda a la planta extractora de aceite de palma, COOPAR,Ltda implementar a su sistema de tratamiento el uso de *Eichhornia Crassipes* a grande escala para mejorar la condiciones fisicoquímicas de los residuos finales.

ANEXOS

Anexo A. Matriz de coeficientes de correlación lineal entre las variables fisicoquímicas

Variables	DQO	DBO5	pH	Cond	Tur	Col	Dur	Alca	Cloru	Nit	Sul	Fos	Fe	Mn	SST	SSV	Col T	Col F
DQO	1	1,000	-0,974	-0,137	0,826	0,933	0,959	-0,270	0,995	0,997	0,849	0,994	-0,543	0,993	0,987	0,993	-0,742	-0,810
DBO5	1,000	1	-0,975	-0,137	0,826	0,932	0,960	-0,270	0,995	0,996	0,848	0,994	-0,544	0,994	0,986	0,993	-0,742	-0,810
pH	-0,974	-0,975	1	0,105	-0,798	-0,872	-0,993	0,299	-0,986	-0,953	-0,818	-0,985	0,552	-0,984	-0,928	-0,984	0,715	0,782
Cond	-0,137	-0,137	0,105	1	-0,533	0,152	-0,138	0,878	-0,134	-0,112	-0,460	-0,173	-0,646	-0,184	-0,140	-0,188	0,663	0,566
Tur	0,826	0,826	-0,798	-0,533	1	0,686	0,826	-0,723	0,843	0,812	0,996	0,857	0,013	0,861	0,821	0,862	-0,986	-0,999
Col	0,933	0,932	-0,872	0,152	0,686	1	0,846	0,003	0,919	0,952	0,735	0,905	-0,665	0,901	0,949	0,900	-0,563	-0,659
Dur	0,959	0,960	-0,993	-0,138	0,826	0,846	1	-0,365	0,981	0,935	0,844	0,981	-0,494	0,981	0,914	0,981	-0,749	-0,812
Alca	-0,270	-0,270	0,299	0,878	-0,723	0,003	-0,365	1	-0,309	-0,228	-0,669	-0,342	-0,616	-0,351	-0,243	-0,354	0,820	0,747
Cloru	0,995	0,995	-0,986	-0,134	0,843	0,919	0,981	-0,309	1	0,986	0,865	0,999	-0,522	0,999	0,974	0,998	-0,759	-0,826
Nit	0,997	0,996	-0,953	-0,112	0,812	0,952	0,935	-0,228	0,986	1	0,838	0,984	-0,558	0,983	0,995	0,982	-0,724	-0,795
Sul	0,849	0,848	-0,818	-0,460	0,996	0,735	0,844	-0,669	0,865	0,838	1	0,877	-0,042	0,879	0,845	0,880	-0,969	-0,992
Fos	0,994	0,994	-0,985	-0,173	0,857	0,905	0,981	-0,342	0,999	0,984	0,877	1	-0,495	1,000	0,973	1,000	-0,779	-0,843
Fe	-0,543	-0,544	0,552	-0,646	0,013	-0,665	-0,494	-0,616	-0,522	-0,558	-0,042	-0,495	1	-0,487	-0,526	-0,484	-0,157	-0,045
Mn	0,993	0,994	-0,984	-0,184	0,861	0,901	0,981	-0,351	0,999	0,983	0,879	1,000	-0,487	1	0,973	1,000	-0,785	-0,847
SST	0,987	0,986	-0,928	-0,140	0,821	0,949	0,914	-0,243	0,974	0,995	0,845	0,973	-0,526	0,973	1	0,972	-0,737	-0,805
SSV	0,993	0,993	-0,984	-0,188	0,862	0,900	0,981	-0,354	0,998	0,982	0,880	1,000	-0,484	1,000	0,972	1	-0,787	-0,848
Col T	-0,742	-0,742	0,715	0,663	-0,986	-0,563	-0,749	0,820	-0,759	-0,724	-0,969	-0,779	-0,157	-0,785	-0,737	-0,787	1	0,992
Col F	-0,810	-0,810	0,782	0,566	-0,999	-0,659	-0,812	0,747	-0,826	-0,795	-0,992	-0,843	-0,045	-0,847	-0,805	-0,848	0,992	1

Fuente: Autor

Anexo B. Sistema de tratamiento anaeróbico



Fuente: autor

Anexo C. Sistema de tratamiento con *E. crassipes*



Fuente: autor

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, Ángel. (2000). Proceso de extracción de aceite de palma africana mediante el desgranado del fruto fresco. Industrias Acuña LTDA. INAL .Extraído de: <http://palmaceite.tripod.com/desgranadofrio.pdf>.Consulta: 12/08/10
- APHA (2012) Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. 22nd Edition, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation
- Armendariz, J. J. (2016). *Diseño de un sistema de tratamiento para los efluentes de la extracción de aceite de palma, a nivel de laboratorio, basado en la metodología mbbt*. Trabajo de grado. Universidad internacional sek, Quito.
- Barrios, E. (2012). *Id-tax. Catálogo y claves de identificación de organismos invertebrados utilizados como elementos de calidad en las redes de control del estado ecológico*. España.
- Balch, W.E., Fox, G.E., Magrum, L.J., Woese, C.R. y Woese, C.R y Wolfe, R.S. (1979). Methanogens: Reevaluation of a unique group. *Microbiological Reviews* 43 (2), 260-296.
- Balch, WE., Schoberth, S., Tanner, R.E. y Wolfe, R.5. (1977). "Acetobacterium a new genus 01 hydrogen- oxidizing, carbon dioxide- reducing anaerobic bacteria". *Inst. Journal System Bacteriology*, 27: 355-386.
- Bernal, F. (2005). *El cultivo de la palma de aceite y su beneficio - Guía general para el nuevo palmicultor* (F. y. Cenipalma Ed.). Bogotá D.C., Colombia.
- Bitton, G. (2005). *Wastewater Microbiology*.
- Bonomie, M., & Reyes, M. (2012). Estrategia ambiental en el manejo de efluentes en la extracción de aceite de palma.
- Borja, R., Banks, C.J. and Sánchez, E. (1996a). Anaerobic treatment of palm oil mill effluent in a two-stage up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Journal of Biotechnology* 45, 125–135.
- Borja, R., & Banks, C. J. (1995). Comparison of an Anaerobic Filter and an Anaerobic Fluidized Bed Reactor Treating Palm Oil Mill Effluent. *Process Biochem.*, 511–521.
- Brix., H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water*

- Carvajal, L., & De Francesco, H. (2012). *Medio ambiente, recursos hídricos, y calentamiento global: significados y alcances en política exterior colombiana. En: ¿Colombia una potencia en desarrollo? Escenarios y desafíos para su política exterior, Konrad Adenauer Stiftung. Stefan Jost, pp. 469 -518.*
- Cali, A. de S. de. (2012). *Plan integral de seguridad y convivencia ciudadana 2012-2015.* Retrieved from <http://www.cali.gov.co/descargar.php?id=33598>
- Del, A., Producido, B., El, E. N., & Efluentes, T. D. E. (2006). *No Title. Resolución 0631 de 2015-Calidad vertimientos.pdf.* (n.d.).
- Camargo, K. (2017). *Biotratamiento de agua orgánica sintética mediante un filtro anaerobio de flujo ascendente en tres fases a escala laboratorio.* Trabajo de grado. Universidad de pamplona. Pamplona, Norte de Santander.
- CELIS, J. e. (2005). *Recientes Aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas.* Chile.
- Cely, S. R. (2006). *Estudio de factibilidad tecnico- economica para el aprovechamiento del biogas producido en el tratamiento de efluentes de las plantas extractoras de aceite de palma de la zona de puerto wilches.* Trabajo de grado. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga.
- Cendales Ladino, Edwin Darío (2011) *Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable.* Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, DC, COLOMBIA.
- Cenipalma. (1996). *Manejo de efluentes de plantas extractoras.* Bogotá D.C: Centro de investigación en palma de aceite.
- Congreso de la Republica Decreto - Ley 2811 "Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente". Diario Oficial No. 34243. [Decreto - Ley]. Bogotá, Colombia, s.n., 18 Diciembre 1974
- Congreso de la Republica Ley 23 "Por el cual se reglamentan parcialmente los Títulos VIII y XII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales". Diario Oficial No. 34.001. [Ley] .Bogotá, Colombia, s.n., 12 Diciembre 1973.
- Cote, C, Daniel, I. M, & Quessy, S. (2006). *Reduction of indicator and pathogenic microorganisms by psychrophilic anaerobic digestion in swine slurries.* Bioresource

Tech- nology, 97, 686-691

Decreto 1594 de 1984 " por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos". Diario Oficial 36700. [Decreto]. Bogotá Colombia, Julio 23 de 1984

Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (2012). Tecnologías de la información y las comunicaciones. Recuperado de: <http://www.dane.gov.co>

Díaz, M. c., Espitia, S., & Molina, F. (2002). *Digestion anaerobia una aproximacion a la tecnología*. Bogotá.

DIRECCIÓN GENERAL DE COMPETITIVIDAD AGRARIA. 2012. Cadena agroproductiva de la Palma Aceitera. [En línea]: Palma aceitera, (<http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/agroeconomia/corregidopalma.pdf>, 15 Jul. 2016).

EPA. (1988). Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. 225, 226, 229, 230, 231, 232, 235.

EPA. (2002). *DESIGN MANUAL: CONSTRUCTED WETLANDS AND AQUATIC PLANT SYSTEMS FOR MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT*. U.S.

FAO. (11 de 10 de 2015). FAOSTAT. Obtenido de FAOSTAT: <http://faostat3.fao.org/>

Fernández, J. (2000). *Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación*. Obtenido de [http://www. macrophytes.info/documentacion](http://www.macrophytes.info/documentacion)

Fernandez, J. (2001). Filtro autoflotante de macrofitas para la depuración de aguas residuales. 171–180.

Fernández, M., & Abalos, A., & Crombet, S., & Caballero, H. (2010). Ensayos de biodegradabilidad anaerobia de aguas residuales generadas en una planta refinadora de aceite de soja. *Interciencia*, 35 (8), 600-604

Fuhs, C. (1975). Bases Microbiológicas de Remoción de Fosfatos en Fangos Activados. Proceso para el Tratamiento de Aguas Residuales. Microbiología Ecológica. Minnessota.

G. Henry-Silva, A. C. (June 2008.). rowth of free-floating aquatic macrophytes in different concentrations of nutrients. *Hydrobiologia*.

García et al. (2013). Caracterización de la fase UPSTREAM de la cadena de valor y abastecimiento de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. 79-89.

GONZÁLEZ, M., & COBO, F. (2006). *MACROINVERTEBRADOS DE LAS AGUAS DULCES DE GALICIA*. Galicia- España: Hercules.

- Grupo empresarial Hacienda las flores. (2009, Febrero 5). Hacienda las Flores. Retrieved agosto 30, 2011, from Hacienda las Flores: www.haciendalasflores.com
- Guerra, R. González, S. Trupiano, A. Figueroa, M. Seghezzi, L. y Cuevas, C.M. (2000). Perfiles de actividad metanogénica específica en un reactor UASB (reactor anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos) utilizado para el tratamiento de líquidos cloacales presedimentados.
- Hamdi, M, & Garcia, J. L. (1991). Comparison between anaerobic filter and anaerobic *contact* process for fermented olive mill wastewaters. *Bioresource Technology*: , 38, 23-29.<http://web.fedepalma.org>
- Hwang, T. K., Ong, S. M., Seow, C. C., & Tan, H. K. (1978). Chemical Composition of Palm Oil Mill Effluents. *Planter*, 749-755.
- I.C. Garcés, M. S. (1997). Products derived from the palm oil industry. *Uses Palmas*, 18(1), 33-48.
- Ibrahim, A, Yeoh, B. G, Cheah, S. C, Ma, A. N, Ahmad, S, Chew, T. Y, Raj, R, & Wa- hid, M. J. A. (1984). Thermophilic anaerobic contact digestion of palm oil mill efflu- ent. *Water Science and Technology* , 17, 155-165.
- IDEAM. (19 de 03 de 2016). Laboratorio de calidad ambiental. Obtenido de www.ideam.gov.co/web/agua/Métodos-analiticos
- Lasso, J. y Ramírez, J. (2011). Perspectivas generales del efecto de las aguas residuales para el riego en los cultivos para la producción de biocombustibles en Colombia. *El Hombre y la Máquina* , 36: 95-105.
- León, & Lucero. (2009). *Estudio de Eichhornia crassipes, Lemna gibba y Azolla filiculoides en el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas en sistemas comunitarios y unifamiliares del cantón Cotacachi*. Ibarra-Ecuador.
- Levenspiel O. El omnilibro de los reactores químicos, Ed, Rerté, S.A, (1985)
- Ma, A.N. (1999). Treatment of palm oil mill effluent. In: G. Singh, K.H. Lim, T. Leng and L.K. David, (eds) *Oil palm and the environment: a Malaysian perspective*. Malaysian

- Oil Palm Growers' Council Kuala Lumpur, pp, 113-126
- Madaki, Y. S., & Seng, L. (2013). Palm Oil Mill Effluent (Pome) From Malaysia Palm Oil Mills: Waste Or Resource., 2(6), 1138–1155.
- Martelo, L. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia, ing. cienc. I*.
- Metcalf & Eddy. (1995). Ingeniería de aguas Residuales. Tercera Edición. Mc Graw Hill. Volumen 1. España.
- Minambiente. (1996). MANUAL DE PROCEDIMIENTOS ANALITICOS PARA AGUAS Y EFLUENTES. Bogotá: Ministerio de vivienda, ordenamiento territorial y medio ambiente.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, V. Y. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000 . Bogotá D.C.
- Ministro De Ambiente Y Desarrollo Sostenible - DECRETO 2667 DE 2012 “por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones” Diario Oficial 45357. Bogotá, Colombia octubre 31 de 2003
- Ministro De Ambiente Y Desarrollo Sostenible- DECRETO 1076 DE 2015 “Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”. Diario Oficial. [Decreto - Ley]. Bogotá, Colombia, 26 de mayo 2015
- Ministro De Ambiente Y Desarrollo Sostenible- DECRETO 3930 DE 2010 “Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones” Diario Oficial No. 47.837. Bogotá, Colombia, 25 de octubre de 2010
- Ministro De Ambiente Y Desarrollo Sostenible- RESOLUCIÓN 631 DE 2015 “ Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones” Diario Oficial No. 49.486. Bogotá, Colombia, 18 de abril de 2015
- Natalia sarmiento, P. V. (2017). *Propuesta de un sistema de tratamiento para la recirculación de agua residual de la planta extractora de aceite de palma africana para riego en cultivo por aspersión*. Trabajo de grado. Universidad de la Salle. Bogotá D.C
- N. Saenz, M. T. (2008). Evaluación de dos parámetros bioquímicos en tres macrófitas acuáticas expuestas a cobre. *Polibotanica*, 224.

- N.H. Abdurahman, Y. R. (2013). The Performance Evaluation of Anaerobic Methods for Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment: A Review. *International Perspectives on Water Quality Management and Pollutant Control*, 20.
- Orozco, C. A., Peña, D. A., Romero, J. A., & Toncon, M. S. (2017). Apoyo durante el ciclo improductivo en plantaciones de palma de aceite.
- Pastrana, M. E. (2015). *Evaluación del desempeño de una membrana dinámica acoplada a un reactor anaerobio para el tratamiento de agua residual municipal*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Mexico
- Penna, J. (1994). Estudo da metodologia do teste de atividade metanogênica específica. Tesedoutorado. Escola de Engenharia, USP-São Carlos
- Perez, M., Romero, L.I. and Sales, D. (2001). Organic matter degradation kinetics in an anaerobic thermophilic fluidized bed bioreactor. *Anaerobe* 7, 25– 35.
- ProCycla*. (2018). Obtenido de <https://www.procycla.com/servicios/plantasdebiogas/digestion-anaerobia/>
- Poh, P. E. (2010). Palm Oil Mill Effluent (POME) Characteristic in High Crop Season and the Applicability of High-Rate Anaerobic Bioreactors for the Treatment of POME. *Industrial & Engineering Chemistry*, 11732–11740.
- Polanco, D. F., & Seghezzo, D. L. (2015). Diseño de reactores upflow anaerobic sludge blanket (UASB).
- Rafael Díaz, M. J. (2013). efecto de la variación de la carga orgánica en el desempeño de un reactor uasb (upflow anaerobic sludge blanket) tratando efluentes de una planta extractora de aceite de palma. *Revista ambiental agua, aire y suelo*, 10.
- Reddy, KR 1983. Destino del nitrógeno y el fósforo en un depósito de retención de aguas residuales que contiene macrófitos acuáticos1. *J. Environ. Qual.* 12: 137-141. doi: 10.2134 / jeq1983.00472425001200010025x
- Romero Rojas, J. A. (2000). *Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño*. Bogotá, Colombia: escuela colombiana de ingeniería.
- ROJAS, J. R. (2005). *LAGUNAS DE ESTABILIZACION* . BOGOTÁ: E. Colombiana de Ingeniería.
- Roldán, G. (2003). Bioindicación de la calidad del agua en Colombia.
- Roldán, G. (2003). *Bioindicación de la Calidad del Agua en Colombia. Uso del Método BMWP/Col*. Medellín, Colombia.: Ed Universidad de Antioquia.

- Roldán, G. (2012). Guía para el estudio de macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Medellín, Antioquia.
- Roldán, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica.
- Romero, R. (2008). *Tratamiento de Aguas Residuales - Teoría y principios de diseño*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. A. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Principios de diseño* (3 edición ed.). Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Schierup, H. B. (1989). The use of aquatic macrophytes in water-pollution. *volume 18*, 100–107.
- Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: realidad y potencial. (2000 - 2002).
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th Edition. Washington, APHA, AWWA, WWC, 1992. pp 2-56.
- Superintendencia de Industria y Comercio. (2010). *Estudio de la agroindustria de la palma africana en Colombia*. Obtenido de http://www.sic.gov.co/%20recursos_user/documentos/%20publicaciones/pdf/PalmaAfricana2012.pdf
- Systems, A. (2017). Obtenido de <https://www.adisystemsinc.com/es/tecnologias/tratamiento-anaerobio/adi-cstr>
- Valipour, A., Raman, V.K., & Ahn, Y. (2015). Effectiveness of Domestic Wastewater Treatment Using a Bio-Hedge Water Hyacinth Wetland System.
- Vlissidis, A., & Zouboulis, A. I. (1993). Thermophilic anaerobic digestion of alcohol distillery wastewaters. *Bioresource Technology*, 43, 131-140.
- Won-Ho Choi, C.-H. S.-M.-J.-Y. (2013). Anaerobic treatment of palm oil mill effluent using combined high-rate anaerobic reactors.
- Zarela, M., & Garcia, T. (2012). Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Zhang Yejian, Y. L. (2007). Integration of biological method and membrane technology in treating palm oil mill effluent.