

Informe de Avance del Proyecto de Investigación

Título

Propuesta de plan de mejora continua para el aumento de la eficiencia del sistema de tratamiento de agua residual industrial en empresa productora de aceite crudo de palma

Elaborado por:

María Camila Quintero Borja
Especialización en gerencia de procesos de calidad e innovación

Juan Felipe Segura Maldonado
Especialización en Inteligencia Comercial y de Mercadeo

Nixon Ortiz Guerrero
Especialización en Inteligencia Comercial y de Mercadeo

Universidad Ean

Escuela de Formación en Investigación

Seminario de Investigación programa plan E+

Modalidad virtual

01/09/2024

Tabla de Contenido

.....	1
Resumen	6
1. Planteamiento del Problema	7
1.1 Descripción del problema	7
2. Objetivos	9
2.1 Objetivo General	9
2.2 Objetivos Específicos	9
3. Justificación	10
4. Marco teórico	11
4.1 Contexto ambiental: sistema de tratamiento de agua de la extractora de la palma.. 11	
4.1.1 Características del sistema	11
4.1.2 Lagunas anaerobias	12
4.1.3 Lagunas facultativas	13
4.1.4 Modelos aplicados	14
4.2 Contexto empresarial	16
4.2.1 Desarrollo Sostenible	16
4.2.2 Responsabilidad Social Empresarial	17
4.2.3 Eficiencia	20
4.2.4 Ciclo de Deming	20
4.2.5 Lean Manufacturing	21
4.2.6 Six Sigma	21
4.2.7 Life Cycle Assessment (LCA)	21
4.3 Contexto Normativo	22
5. Marco Institucional	26
5.1 Introducción	26
5.2 Misión	27
5.3 Visión	27
5.4 Valores institucionales	27
5.5 Estructura organizativa	28
5.6 Objetivos institucionales	28
5.7 Operaciones y proyectos	29

5.8 Cumplimiento normativo y certificaciones.....	29
5.9 Relaciones con la comunidad	29
6. Metodología	30
6.1 Enfoque, alcance y diseño de la investigación	30
6.2 Selección de métodos para la recolección de información y técnicas de análisis de datos	30
7. Análisis y discusión de los resultados	32
7.1 Evaluación de tecnologías	32
7.2 Análisis y control operacional de los sistemas de tratamiento de efluentes.....	39
7.2.1 Resultados operativos del sistema lagunas abiertas	39
7.2.2 Propuesta de mejora operativo.....	41
8 Conclusiones	41
9 Referencias.....	43

Listado de figuras

Figura 1. Diagrama de bloque de las etapas del sistema. Elaboración propia.	12
Figura 2. La pirámide de la responsabilidad social empresarial.	19
Figura 3. DQO y DBO del marco normativo requerido para vertimiento en cuerpo de agua	24

Listado de tablas

Tabla 1. Documentos utilizados para la recolección de datos y descripción del modelo estadístico elegido para su análisis y posteriores conclusiones. Elaboración propia.....	31
Tabla 2. Documentos utilizados para la recolección de datos y descripción de la técnica de análisis escogida. Elaboración propia.	31
Tabla 3. Comparativo de resultados de las seis tecnologías propuestas en términos de DBO. Elaboración propia.	36
Tabla 4. Comparativo de resultados de las seis tecnologías propuestas en términos de DBO. Elaboración propia.	37
Tabla 5. Comparativo de resultados de las seis tecnologías propuestas en términos de DBO. Elaboración propia.	38

Resumen

El sistema de tratamiento de aguas residuales en la empresa productora de aceite de palma, no cumple con los límites de Demanda Química de Oxígeno (DQO) establecidos por la Resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). El efluente es tratado en lagunas anaerobias y facultativas, pero presenta dificultades para reducir la DQO de manera efectiva (Henze, Loosdrecht, Ekama & Mulder, 2008).

El objetivo general de esta investigación es proponer mejoras para aumentar la eficiencia del sistema para cumplir con los parámetros normativos. Para lograrlo, se han evaluado diversas tecnologías de tratamiento, entre ellas, sistemas multietapas que combinan reactores de mezcla continua (CSTR) y reactores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), los cuales han demostrado ser más eficientes en la reducción de la DQO y la producción de biogás, en comparación con métodos tradicionales (Althausen, 2016; Pérez, 2019).

Además de lo anterior, se propone la implementación de sensores para el monitoreo continuo de parámetros críticos como pH y temperatura, así como sistemas automatizados para la purga de lodos. Esto mejoraría la operación del sistema y garantizaría el cumplimiento normativo. (Metcalf & Eddy, 2014; Tchobanoglous, Stensel & Tsuchihashi, 2014).

En conclusión, la mejora del sistema permitirá cumplir con las regulaciones legales, también reducirá el impacto ambiental y fortalecerá la responsabilidad social de la empresa. (World Commission on Environment and Development, 1987).

Palabras clave: DQO, tratamiento de aguas residuales, sistema anaerobio, lagunas facultativas, enfriamiento de efluentes, normativa ambiental.

1. Planteamiento del Problema

1.1 Descripción del problema

En la empresa productora de aceite de palma en Puerto Wilches, Santander, se enfrenta un problema significativo en su sistema de tratamiento de aguas residuales. Durante el último periodo, se ha observado que el sistema de tratamiento no cumple con los estándares establecidos en la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), que regula los vertimientos de aguas residuales a cuerpos de agua. En particular, el parámetro de Demanda Química de Oxígeno (DQO) excede los límites permitidos, lo cual indica una alta concentración de materia orgánica en el agua tratada que se vierte en el cuerpo de agua.

Este incumplimiento tiene varias implicaciones, el no cumplimiento de los límites de DQO en las aguas residuales vertidas a cuerpos de agua tiene varias implicaciones negativas como:

- Consecuencias legales y regulatorias: La Resolución 0631 de 2015 establece que los efluentes deben cumplir con parámetros específicos antes de ser vertidos a cuerpos de agua. El incumplimiento de esta regulación puede acarrear sanciones económicas, restricciones operativas e incluso acciones legales contra la empresa. Además, la empresa corre el riesgo de dañar su reputación y credibilidad frente a los clientes, socios y la comunidad local. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)
- Impacto ambiental: La DQO es una medida de la cantidad de materia orgánica presente en el agua. Altos niveles de DQO indican una alta carga de materia orgánica, lo que

puede provocar un aumento de la demanda de oxígeno en el agua receptora. Esto puede llevar a la eutrofización del cuerpo de agua, disminuyendo los niveles de oxígeno disponibles para los organismos acuáticos y alterando significativamente el equilibrio ecológico del ecosistema. La biodiversidad de la región puede verse gravemente afectada, y las especies locales podrían sufrir disminuciones en sus poblaciones o incluso desaparecer.

- Eficiencia operacional y costos: Un sistema de tratamiento de aguas residuales ineficiente implica un uso excesivo de recursos y mayores costos operativos. La empresa debe hacer frente a gastos adicionales como de energía y mantenimiento, sin obtener el resultado deseado de reducir adecuadamente la DQO. la ineficiencia del sistema puede reflejarse en una menor productividad de la planta, ya que los recursos humanos y técnicos se dedican a la gestión de problemas de tratamiento de aguas residuales en lugar de enfocarse en mejorar otros aspectos de la operación.

Ante este escenario, se hace evidente la necesidad de mejorar la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa. Esto no solo permitirá cumplir con la normativa legal vigente, sino que también contribuirá a reducir el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad de la operación. La mejora del sistema podría involucrar la implementación de nuevas tecnologías de tratamiento, optimización de los procesos actuales, capacitación del personal, y un monitoreo más riguroso de los parámetros de calidad del agua.

En conclusión, la empresa se encuentra en un punto crítico en el que necesita tomar medidas efectivas para abordar el problema de la alta DQO en sus aguas residuales. El éxito en la resolución de este problema no solo garantizará el cumplimiento de la ley, sino que también

reforzará el compromiso de la empresa con la protección del medio ambiente y la sostenibilidad de sus operaciones.

¿Cómo se puede aumentar la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa productora de aceite de palma en Puerto Wilches, Santander, para cumplir con la normativa de vertimiento del parámetro DQO establecida por la Resolución 0631 de 2015?

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Proponer alternativas de mejora en el sistema de tratamiento de aguas residuales en la empresa productora de aceite de palma en Puerto Wilches, Santander, que garantice eficiencia y cumpla con los parámetros de Demanda Química de Oxígeno (DQO) establecidos por la Resolución 0631 de 2015.

2.2 Objetivos Específicos

- Exponer el estado actual del sistema de tratamiento de aguas residuales y su capacidad para reducir la DQO en la empresa productora de aceite de palma en Puerto Wilches.
- Desarrollar un marco teórico y un enfoque metodológico mixto para analizar las variables que afectan la eficiencia del tratamiento de aguas residuales y la reducción de la DQO en la empresa productora de aceite de palma en Puerto Wilches.

- Identificar evaluar y comparar tecnologías y/o metodologías innovadoras para el tratamiento de aguas residuales, que puedan integrarse al sistema existente para mejorar la reducción de DQO en las aguas residuales tratadas.
- Proponer alternativas de mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa y evaluar su alineación con el cumplimiento de la normativa de vertimiento según la Resolución 0631 de 2015.

3. Justificación

La presente propuesta de investigación se centra en la mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales en la empresa productora de aceite de palma, con el objetivo de cumplir con los parámetros de DQO establecidos por la resolución 0631 de 2015. Este estudio es crucial por varias razones que destacan su relevancia en distintos contextos.

- **Cumplimiento Normativo:** la resolución 0631 de 2015 impone normas estrictas sobre la calidad del agua residual, exigiendo que las empresas adopten métodos efectivos para reducir los niveles de DQO.
- **Impacto Ambiental:** El tratamiento adecuado de las aguas residuales es fundamental para minimizar el impacto ambiental de las actividades industriales. Las aguas residuales generadas si no se tratan de manera eficiente, pueden causar contaminación significativa en los cuerpos de agua circundantes.
- **Eficiencia Operativa:** La implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales más eficiente puede llevar a una reducción de costos operativos asociados con el manejo y tratamiento de estos efluentes. Una mejora en la eficiencia del sistema puede traducirse en ahorro de recursos, optimización de procesos y un uso más racional de los insumos necesarios para el tratamiento.

- **Responsabilidad Social Corporativa:** Las empresas que adoptan prácticas sostenibles y responsables en el manejo de sus desechos demuestran un compromiso con la responsabilidad social corporativa. Este proyecto no solo responde a las exigencias normativas y ambientales, sino que también fortalece la imagen de la empresa como un actor comprometido con la sostenibilidad y el bienestar de la comunidad.

4. Marco teórico

4.1 Contexto ambiental: sistema de tratamiento de agua de la extractora de la palma

Las aguas residuales generadas en la planta extractora de palma presentan elevados niveles de materia orgánica, de nutrientes y de otros compuestos, los cuales si no son tratados adecuadamente pueden llevar a un fuerte impacto ambiental. La depuración en la planta extractora del aceite de palma suele tener varias etapas en las que se utilizarán los procesos denominados de carácter físico, químico y biológico, diseñados para reducir los contaminantes.

4.1.1 Características del sistema

El sistema de tratamiento en la empresa extractora de palma aceitera consta de las fases que se detallan a continuación:

- **Fase de enfriamiento:** previamente a la fase de lagunas anaerobias, es necesario que el vertido se refrigere para conseguir que la temperatura sea inferior a 40 °C antes de llegar a dichas lagunas. Por temperaturas superiores, la actividad biológica de las lagunas anaerobias se inhibe (Rodríguez y Gómez, 2019).

- **Lagunas anaerobias:** las lagunas anaerobias están diseñadas para trabajar con bajas concentraciones de oxígeno, lo que favorece la actividad de las bacterias anaeróbicas, encargadas de la descomposición de la materia orgánica, resultando en una disminución de la DQO. Además, en este proceso se produce biogás que puede ser utilizado posteriormente como energía (Vásquez, 2022).
- **Lagunas facultativas:** una vez el vertido ha sido tratado en la fase anaerobia, pasa a las lagunas facultativas, en las que se da un tratamiento adicional de tipo tanto aeróbico como anaeróbico. Este tratamiento permite una mayor disminución de la DQO y de los contaminantes, garantizando que el vertido cumpla con todas las normativas en relación con los vertidos a cauces naturales (López, 2021).
- **Proceso de postratamiento y vertido:** por último, el vertido tratado pasa por una fase de postratamiento que suele consistir a menudo en, por ejemplo, la adición de algún producto químico o en una filtración con el fin de garantizar que el vertido cumpla con los parámetros de calidad del agua establecidos por las diferentes normativas (cenipalma, 2021).

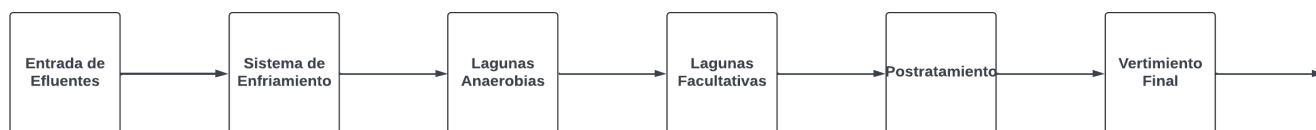


Figura 1. Diagrama de bloque de las etapas del sistema. Elaboración propia.

4.1.2 Lagunas anaerobias

Las lagunas anaerobias son grandes balsas de gran profundidad que trabajan en ausencia de oxígeno. Permiten la descomposición de la materia orgánica a través de procesos anaerobios,

donde hay unas bacterias en concreto que se encargan de degradar los compuestos orgánicos, obteniendo como productos finales metano y dióxido de carbono (metcalf & eddy, 2014).

- Estructura y diseño: están diseñadas para que no haya prácticamente entrada de oxígeno y, de este modo, se favorece la acumulación de lodos en el fondo (tchobanoglous, stensel, & tsuchibashi, 2014).
- Proceso de tratamiento: a través de la degradación anaerobia de la materia orgánica. dará lugar a metano, dióxido de carbono y a una gran cantidad de productos intermedios (apha, awwa, & wef, 2017).
- Eficiencia: efectivas en la reducción de DQO, aunque la eliminación de nutrientes es limitada (szczepanowski, 2020).

4.1.2.1 Operación y mantenimiento

- Control de carga: importante para evitar sobrecarga (henze, van loosdrecht, ekama, & mulder, 2008).
- Mantenimiento de lodo: monitoreo y retiro periódico del lodo acumulado (metcalf & eddy, 2014).
- Temperatura y pH: temperatura óptima entre 20°C y 35°C; pH entre 6.8 y 7.4 (apha, awwa, & wef, 2017).

4.1.3 Lagunas facultativas

Las lagunas facultativas operan con una capa superior aeróbica y una capa inferior anaeróbica (tchobanoglous et al., 2014).

- Capa superior (aeróbica): soporta la actividad de bacterias aeróbicas que descomponen la materia orgánica en presencia de oxígeno (metcalf & eddy, 2014).

- Capa inferior (anaeróbica): facilita la descomposición de los compuestos restantes por bacterias anaeróbicas (apha, awwa, & wef, 2017).
- Proceso de tratamiento: la materia orgánica es degradada en la capa superior y los productos de desecho se trasladan a la capa inferior para mayor descomposición (henze et al., 2008).

4.1.3.1 Operación y mantenimiento

- Control de estratificación: evitar la mezcla de capas para mantener eficiencia (tchobanoglous et al., 2014).
- Mantenimiento del lodo: manejo adecuado del lodo acumulado (metcalf & eddy, 2014).
- Monitoreo de parámetros: controlar la calidad del agua, el pH y la temperatura (apha, awwa, & wef, 2017).

4.1.4 Modelos aplicados

4.1.4.1 Modelo de monod para el crecimiento bacteriano

El proceso de tratamiento de aguas residuales se basa en modelos biológicos y químicos bien establecidos. El modelo de monod es utilizado para describir la cinética de crecimiento bacteriano, el cual describe la tasa de crecimiento de bacterias en función de la concentración del sustrato:

$$\mu = \mu_{max} * \frac{S}{K_s + S}$$

Donde:

μ : es la tasa específica de crecimiento de las bacterias.

μ_{max} :es la tasa máxima de crecimiento.

S: es la concentración del sustrato (materia orgánica).

K_s : es la concentración de sustrato a la cual la tasa de crecimiento es la mitad de μ_{max} (monod, 1949).

4.1.4.1.1 Aplicación del modelo en lagunas anaerobias y facultativas

- Lagunas anaerobias: el modelo ayuda a entender la relación entre la concentración de sustrato y la actividad bacteriana en sistemas sin oxígeno (szczepanowski, 2020).
- Lagunas facultativas: el modelo es aplicable en ambas capas para predecir cómo la disponibilidad de oxígeno y nutrientes influye en la eficiencia del tratamiento (metcalf & eddy, 2014).

4.4.1.2 Ciclo PHVA

De igual manera, se implementa el ciclo phva (planificar-hacer-verificar-actuar) que es esencial para optimizar el rendimiento del sistema de tratamiento, asegurando el cumplimiento de las normativas ambientales (iso 14001, 2015; garcía et al., 2020).

El ciclo phva es una metodología de gestión continua que se aplica para garantizar la mejora continua del sistema de tratamiento de aguas residuales. Este ciclo permite ajustar los procesos y mantener la eficiencia operativa dentro de los estándares ambientales establecidos (iso 14001, 2015). La aplicación de este ciclo es crucial para mantener la conformidad con las normativas y para implementar mejoras basadas en los resultados del monitoreo y evaluación continua del sistema de tratamiento.

- Planificar: definir objetivos y procesos necesarios para entregar resultados de acuerdo con los requisitos legales y ambientales.
- Hacer: implementar los procesos definidos en la fase de planificación.
- Verificar: monitorear y medir los procesos y resultados para asegurar que se cumplan los objetivos establecidos.
- Actuar: tomar acciones para mejorar continuamente el sistema basado en los datos y la retroalimentación obtenida en la fase de verificación.

4.2 Contexto empresarial

Parte de los efectos adversos del modelo actual que maneja la empresa productora en lo relacionado al tratamiento de aguas residuales es comprometer su reputación ante los diversos grupos de interés, así como parte crucial del plan de mejora se enfoca en la eficiencia; por lo cual se hace necesario explorar, desde la perspectiva empresarial, cómo se llega a dicho estado de eficiencia manteniendo un enfoque de sostenibilidad. Por consiguiente, los conceptos de Desarrollo Sostenible, Responsabilidad Social Empresarial, Responsabilidad Ambiental y Eficiencia se hacen necesarios en búsqueda de un contexto adecuado para implementar una propuesta con el propósito deseado.

4.2.1 Desarrollo Sostenible

Este es un concepto bastante escuchado hoy en día, que fácilmente se puede relacionar con un enfoque meramente ambiental. Sin embargo, llega a tener una connotación mucho mayor. Una definición de desarrollo sostenible que marca el rumbo, y que se compartió en el Informe Brundtland de las Naciones Unidas es “un desarrollo que cumple las necesidades del presente sin

comprometer la habilidad de las futuras generaciones de cumplir las suyas” (World Commission on Environment and Development, 1987). Con base en esta definición, se puede llegar a plantear que el desarrollo sostenible es parte de las responsabilidades de las empresas como entes generadores de valor.

Esta relación se plantea bajo el concepto del “Triple Bottom Line”, planteado por John Elkington, que “representa una estrategia que involucra la consideración simultánea de los resultados económicos, sociales y ambientales, para crear valor en todas estas áreas” (Elkington, 1994). Y hoy en día es más que común identificar iniciativas, empresas o incluso gobiernos que se denominen como “comprometidos” con el desarrollo sostenible y estén teniendo estos tres pilares en consideración.

En Colombia, el trabajo por la sostenibilidad es una realidad al menos para el 83% de las empresas, según KPMG, en su encuesta de reporte de sostenibilidad (2022). Se entiende entonces que, para el caso de la empresa productora, se requiere buscar una propuesta que mantenga un orden y una optimización en el ámbito operativo (económico), pero también que mantenga las dimensiones sociales y ambientales como una parte igual de importante.

Con base en los criterios antes mencionados, se relaciona también un concepto bastante popular en la administración empresarial, que busca cubrir las acciones de cada empresa que derivan en su efecto social y ambiental. Este concepto se denomina Responsabilidad Social Empresarial (RSE).

4.2.2 Responsabilidad Social Empresarial

Este concepto se podría definir como una manifestación práctica de los principios de desarrollo sostenible. Desde la década de 1950, se empezó a hablar de una responsabilidad social para las

compañías, más allá de la generación de ganancias o beneficio económico, como lo planteaba Howard Bowen (1953). Sin embargo, posiciones como la de Milton Friedman manifestaban que acciones de tipo filantrópico podrían desviar a la empresa de sus principales objetivos. En su artículo *The Social Responsibility of Business is to Increase its Profits* manifiesta que “solo hay una única responsabilidad social de las empresas: usar sus recursos y participar en actividades diseñadas para aumentar sus beneficios, mientras se mantengan dentro de las reglas de juego, que son entrar en una competición libre y abierta sin decepción o fraude” (Friedman, 1973).

Sin embargo, el desarrollo de una consciencia enfocada en la sostenibilidad y en una responsabilidad por parte de empresas para generación de valor en este sentido han logrado que incluso se desarrollen modelos que apoyan a las gerencias a definir sus obligaciones y llevarlas a la práctica. Ejemplo de esto es el modelo desarrollado por Archie Carroll en su artículo *The Pyramid of Corporate Social Responsibility: Toward the Moral Management of Organizational Stakeholders* (1991). En este modelo, Carroll desarrolla 4 niveles de responsabilidad:

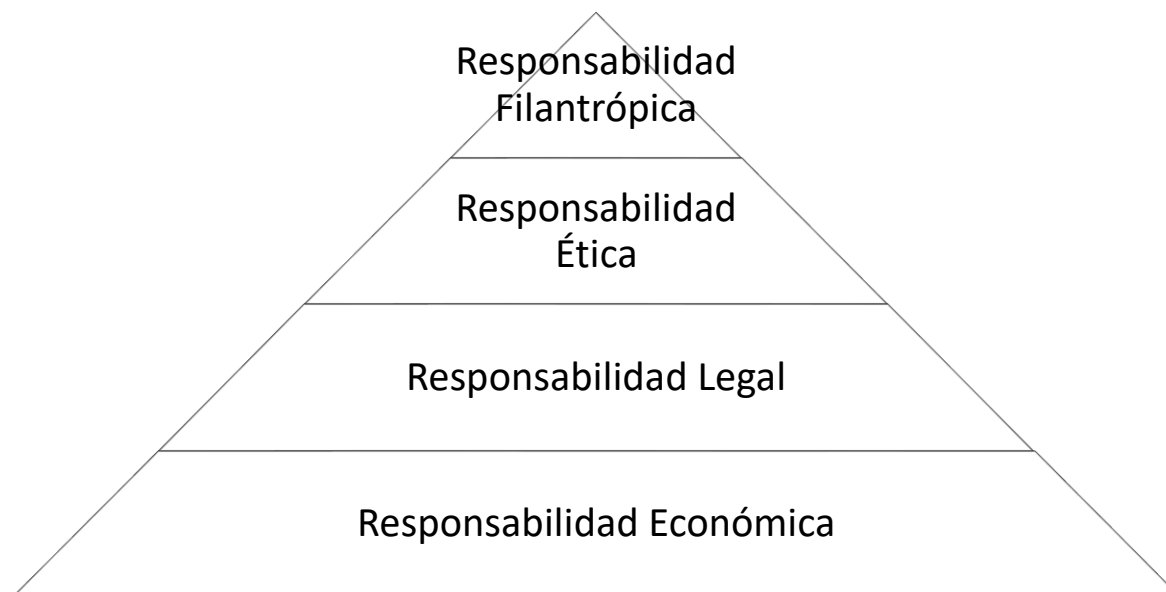


Figura 2. La pirámide de la responsabilidad social empresarial. Adaptado de: The Pyramid of Corporate Social Responsibility Source: A. B. Carroll. The Pyramid of Corporate Social Responsibility: Toward the Moral Management of Organizational Stakeholders [J]. Business Horizons, July/August: 39-48 (1991).

De igual manera, los elementos clave para una estrategia de RSE se pueden resumir en los siguientes:

- **Ética empresarial y transparencia:** Según Carroll (1991), “Las empresas deben operar no solo para ser rentables, sino también para cumplir con las expectativas éticas de la sociedad”.
- **Impacto social positivo:** Las prácticas de RSE deben contribuir a mejorar condiciones laborales y garantizar el respeto por los derechos humanos, lo cual mejora el bienestar social y crea un impacto positivo en las comunidades locales (KPMG, 2020).
- **Protección medioambiental:** La gestión sostenible de recursos y reducción de emisiones son tareas cruciales de las empresas. Estas, además, deben alinearse con los objetivos de desarrollo sostenible (European Commission, 2021)
- **Relación con grupos de interés:** Comunidad en general, proveedores, clientes y colaboradores.

Como se ha planteado en los objetivos de esta investigación, se busca generar una propuesta que aumente la eficiencia del sistema de manejo de aguas actual. Conociendo los lineamientos referentes al desarrollo sostenible, y los aspectos relacionados a la práctica a través de la RSE, ahora se requiere profundizar en el concepto de la eficiencia, y qué aspectos se deben tener en cuenta para mejorarla.

4.2.3 Eficiencia

Este concepto se viene desarrollando desde el planteamiento de las primeras teorías administrativas. Frederick Taylor, considerado el padre de la gestión científica, introdujo este concepto en su obra *The Principles of Scientific Management* (1911), donde sus ideas principales se centran en establecer estándares de trabajo óptimos a través del uso de métodos científicos, y la eliminación de cualquier desperdicio, siempre en búsqueda de la máxima prosperidad, tanto del empleador como del empleado. Por su parte, otro de los grandes exponentes de la administración como es Peter Drucker, amplió el concepto más allá de la producción, y además, lo combina con el concepto de la eficacia. En pocas palabras, la eficiencia consiste en hacer las cosas correctamente, mientras que la efectividad es hacer las cosas correctas; ambas son esenciales para el éxito empresarial (Drucker, 1967).

Por definición, este es un concepto que va alineado con los objetivos de sostenibilidad vistos, ya que se busca generar el máximo valor minimizando desperdicios y huella negativa. Ejemplo es lo mencionado por la Comisión Europea (2020), donde se menciona que la eficiencia en gestión de recursos, como agua y energía en sectores donde actualmente hay un gran consumo, es fundamental para lograr el desarrollo sostenible y reducir el impacto ambiental.

En la búsqueda de un plan para el mejoramiento del tratamiento de aguas residuales, existen varios modelos que sirven de base para diseñar medidas que aumenten la eficiencia del sistema actual. A continuación, se exponen algunos de ellos.

4.2.4 Ciclo de Deming

También conocido como PDCA (Plan-Do-Check-Act) es un modelo de tipo cíclico, que permite a las empresas planificar mejoras, implementarlas, monitorear los resultados y actuar sobre las lecciones aprendidas para optimizar aún más el sistema. (Deming, 1986).

4.2.5 Lean Manufacturing

Es un modelo que se ha originado en la industria automotriz, y se centra en la identificación y posterior eliminación de ineficiencias (por ejemplo, el consumo de agua o energía), con el objetivo de simplificar procesos y enfocarse en la eficiencia y calidad del producto final (Womack & Jones, 1996)

4.2.6 Six Sigma

Principalmente diseñado para procesos de manufactura, el Six Sigma es un sistema de mejora de procesos que se basa en herramientas de estadística avanzada para reducir su variabilidad. A través de sus cinco etapas (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar), se puede medir el desempeño del sistema actual, analizar las causas de ineficiencias y diseñar una solución que finalmente reduzca esa variabilidad y concluya en una eficiencia mejorada (Pyzdek & Keller, 2009).

4.2.7 Life Cycle Assessment (LCA)

Qué mejor que un modelo centrado en impactos ambientales. El LCA, análisis del ciclo de vida, es un modelo diseñado para evaluar el proceso de un servicio o producto, desde el origen hasta el resultado final, identificando impactos ambientales acumulativos y puntuales de cada etapa. Más que diseñar una estrategia global para mejorar la eficiencia, se pueden diseñar estrategias puntuales para cada etapa del ciclo de vida (Curran, 2012)

4.3 Contexto Normativo

El estado colombiano desde la constitución política de 1991 en el artículo 49 establece su responsabilidad para el saneamiento ambiental, y en los artículos 79 y 80 su obligatoriedad para proteger y cuidar la diversidad e integridad del medio ambiente, fomentar la educación ambiental, prevenir y controlar todos los factores que generen el deterioro ambiental, así mismo tiene la competencia de imponer sanciones legales y decretar la subsanación de los daños generados (Colombia A. C., 1991).

Por medio de la ley 99 del año 1993 se crea el Ministerio de ambiente entidad encargada de orientar el diseño, planificación, y uso de los recursos naturales renovables de todo el territorio nacional, esto con el fin de regular y garantizar su adecuada explotación y un óptimo desarrollo sostenible, así mismo se establece que las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) son la máxima autoridad ambiental las cuales deben administrar los recursos naturales renovables, y entre sus funciones se encuentra garantizar que los modelos de ocupación, los cuales hacen parte de los planes de ordenamiento territorial de los municipios y/o distritos, deben incluir criterios de sostenibilidad ambiental (Colombia C. d., 1993) (Desarrollo, 1993).

Debido a la realidad urbana, industrial y ambiental por la cual atraviesa el país desde hace algunas décadas, el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible decreto la resolución 0631 de 2015, la cual reglamento y actualizo decretos relacionados con vertimientos, uso y disposición de aguas residuales, Decretos como 3930 de 2010 donde se delega al ministerio de ambiente la expedición de normas técnicas relacionadas con vertimientos (El Ministerio de Ambiente, Decreto 3930, 2010), Resolución 669 de 2021, establece límites máximos permisibles para realizar vertimientos de aguas residuales al suelo (Minambiente, Resolución 0699, 2021), Decreto 4728 establece parámetros y límites máximos permisibles para vertimientos a aguas

superficiales, y a los sistemas de alcantarillado público y al suelo (El Ministerio de Ambiente, Decreto 4728, 2010), Decreto 1584 el cual reglamenta el uso del agua y la disposición de los residuos líquidos (DNP, 1984), entre otros, algunos de ellos ya contaban con 30 años de antigüedad. Esta actualización establece entre otros los parámetros y valores máximos permisibles para los vertimientos en aguas residuales expresados en (Mg/L), y no como se tenía estipulado en normativas anteriores Kg/día como se definía por ejemplo en el decreto 1584 del año 1984, así mismo regula y controla que todas las sustancias que puedan ser vertidas a cuerpos de agua o alcantarillados desde cualquiera de los 8 sectores económicos identificados y de los cuales se despliegan 73 actividades productivas. (Minambiente, Vertimientos y Reúso de Aguas Residuales, 2024) (Minambiente, Resolución 0631, 2017)

Una vez contextualizada la normatividad colombiana y con respecto a la propuesta de generar plan de mejora continua para el aumento de la eficiencia del sistema de tratamiento de agua residual industrial de la empresa productora de aceite crudo de palma, estas actividades relacionadas con el vertimiento de aguas residuales a cuerpos de agua y/o alcantarillados están reguladas por la resolución 0631 de 2015, donde puntualmente se especifica lo siguiente:

Capítulo VI Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas - ARnD a (Aguas Residuales no Domésticas - procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios) a cuerpos de agua superficiales para el sector de la agroindustria y ganadería, para esto se establecen valores de referencia como el parámetro de Demanda Química de Oxígeno (DQO), medida para determinar la contaminación orgánica en el agua, y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Indicador que indica la contaminación Orgánica en el Agua, parámetros de referencia para el sistema de tratamiento de aguas residuales derivado de la extracción de aceites de origen vegetal,

los cuales se reseñan en la siguiente imagen (Minambiente, Resolución 0631, 2017), (Icontec, NTC 3629, 2021) (Icontec, NTC 3630, 2021).

PARÁMETRO	UNIDADES	PROCESOS POSTCOSECHA DE PLÁTANO Y BANANO	PRODUCCIÓN DE AZÚCAR Y DERIVADOS A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR	EXTRACCIÓN DE ACEITES DE ORIGEN VEGETAL
Generales				
pH	Unidades de pH.	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	200,00	900,00	1.500,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L Oz	50,00	500,00	600,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100,00	200,00	400,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	2,00	2,00
Grasas y Aceites	mg/L	10,00	20,00	20,00
Compuestos Semivolátiles Fenólicos	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos				
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L		10,00	10,00
Compuestos de Fósforo				
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno				
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Iones				
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L		600,00	500,00

Figura 3. DQO y DBO del marco normativo requerido para vertimiento en cuerpo de agua. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2015). Resolución 0631. Capítulo VI Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos... Página 8. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=70346>

El parámetro de Demanda Química de Oxígeno (DQO), define la cantidad de una sustancia orgánica susceptible a ser oxidada, la cantidad de oxidante consumido se expresa en términos de equivalencia de oxígeno, por tal motivo el DQO se expresa en Mg/L/O₂, con este contexto en la Res 0631 de 2017 uno de sus métodos de medición es el DQO donde se especifica la cantidad de contaminantes en cuerpos de agua y/o en nuestro caso los vertimientos resultantes de la planta de tratamiento de aguas residuales de la planta productora de aceite de palma (Instruments, 1978) (Minambiente, Resolución 0631, 2017).

En Colombia el Icontec en el año 2021 expide la NTC 3629 - Calidad del agua. Demanda química de oxígeno (DQO). Norma técnica colombiana que establece parámetros que garantizan la precisión y confiabilidad de los resultados de las pruebas para determinar la contaminación orgánica en el agua, las pruebas aplicadas pueden ser por medio de métodos de reflujo abierto y de reflujo cerrado (Icontec, NTC 3629, 2021).

La NTC 3630 Calidad del agua. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO), parámetro para medir la cantidad de oxígeno disuelto, el cual es consumido por microorganismos, para descomponer la materia orgánica presente en una muestra de agua, esto durante un período de tiempo y temperatura específica. Un resultado elevado de una prueba DBO indica la presencia de una gran cantidad de materia orgánica la cual es fácilmente degradada por los microorganismos. Con este resultado se puede determinar un alto nivel de contaminación en el agua (Icontec, NTC 3630, 2021).

Cuando se habla de DBO en un tratamiento de aguas residuales se deben tener en cuenta los siguientes pasos para poder obtener que calidad tiene el agua. (agua, 2021)

- Primero preparación de la muestra: donde la muestra es tomada y conservada adecuadamente. (agua, 2021)
- Segunda medición inicial: se realiza la primera medición de oxígeno disuelto en la muestra. (agua, 2021)
- Tercera incubación: la muestra se deja en una incubadora por un periodo determinado de tiempo. (agua, 2021)
- Medición final: posterior al proceso de incubación se realiza la segunda medición del oxígeno disuelto en la muestra. (agua, 2021)
- Medición del DBO: se mide con los resultados del DBO inicial – DBO final y este resultado se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mg/L) (agua, 2021)

Unos resultados bajos en la muestra de la DBO pueden indicar que la muestra de agua está libre de materia inorgánica, si el resultado es alto de materia inorgánica biodegradable puede indicar contaminación. (agua, 2021)

5. Marco Institucional

5.1 Introducción

La empresa se dedica a la extracción y procesamiento de aceite de palma, desempeñando un papel esencial en la industria agroindustrial. Ubicada en una región clave para la producción de palma, la empresa está comprometida con la excelencia operativa, la sostenibilidad y el cumplimiento de las normativas ambientales.

5.2 Misión

La misión de la empresa es producir aceite de palma de alta calidad a través de procesos eficientes y sostenibles. Se enfoca en utilizar tecnología avanzada y prácticas operativas responsables para satisfacer las demandas del mercado, mientras minimiza su impacto ambiental y contribuye al desarrollo económico y social de la región.

5.3 Visión

La visión es ser reconocida como una líder en la industria del aceite de palma, destacándose por su compromiso con la sostenibilidad, la innovación y la excelencia en todas sus operaciones. La empresa aspira a establecer estándares en la industria para prácticas responsables y sostenibles, promoviendo el desarrollo continuo y la eficiencia en todos los aspectos de su actividad.

5.4 Valores institucionales

- **Sostenibilidad:** compromiso con la protección del medio ambiente y el uso responsable de los recursos naturales.
- **Innovación:** fomento de la adopción de tecnologías avanzadas y métodos innovadores para mejorar la calidad y eficiencia.
- **Responsabilidad social:** desarrollo de iniciativas que beneficien a las comunidades locales y mejoren las condiciones de vida de los empleados.
- **Excelencia:** enfoque en la mejora continua de procesos, productos y servicios para alcanzar los más altos estándares de calidad.

5.5 Estructura organizativa

La empresa está organizada en diversas áreas clave para asegurar una operación eficiente y efectiva:

- **Dirección general:** encargada de la toma de decisiones estratégicas y la supervisión general de todas las actividades de la empresa.
- **Producción:** responsable de la extracción y procesamiento del aceite de palma, asegurando la eficiencia y calidad del producto.
- **Calidad:** se encarga de implementar y monitorear los estándares de calidad, garantizando el cumplimiento de las normativas y certificaciones.
- **Medio ambiente:** administra las prácticas ambientales, incluyendo la gestión de sistemas de tratamiento de efluentes y el cumplimiento de las normativas ambientales.
- **Recursos humanos:** maneja la gestión del talento, el desarrollo profesional y el bienestar de los empleados.
- **Finanzas:** administra la contabilidad, los recursos económicos y la planificación financiera.

5.6 Objetivos institucionales

- **Eficiencia operativa:** mejorar continuamente los procesos productivos para reducir costos y maximizar la calidad del aceite de palma.
- **Sostenibilidad ambiental:** implementar y mantener prácticas que reduzcan el impacto ambiental y cumplan con los estándares legales.

- **Responsabilidad social:** desarrollar y apoyar iniciativas que favorezcan a las comunidades locales y contribuyan al desarrollo social.
- **Innovación tecnológica:** invertir en tecnologías avanzadas y en la formación del personal para mantener la competitividad en la industria.

5.7 Operaciones y proyectos

Las operaciones incluyen:

- **Producción de aceite de palma:** proceso de extracción y refinamiento del aceite, con énfasis en la calidad y eficiencia.
- **Gestión ambiental:** implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales para cumplir con la normativa ambiental y reducir el impacto en los cuerpos de agua.
- **Sostenibilidad:** proyectos y prácticas destinadas a minimizar el impacto ambiental y promover la responsabilidad social.

5.8 Cumplimiento normativo y certificaciones

La empresa se adhiere a las normativas nacionales e internacionales relacionadas con la producción de aceite de palma y la gestión ambiental. La obtención de certificaciones relevantes, como las de sostenibilidad y responsabilidad social, es fundamental para asegurar prácticas operativas responsables y transparentes.

5.9 Relaciones con la comunidad

La empresa mantiene una relación activa con la comunidad a través de:

- **Programas de desarrollo comunitario:** iniciativas para mejorar la calidad de vida de los residentes y apoyar el desarrollo económico local.

- **Colaboración con instituciones educativas:** proyectos educativos y de formación para jóvenes interesados en la agroindustria y áreas relacionadas.

6. Metodología

6.1 Enfoque, alcance y diseño de la investigación

Esta investigación contempla un enfoque desde la perspectiva cualitativa y un diseño de investigación no experimental. Se realizará un estudio descriptivo, en el cual se utilizarán fuentes secundarias para un proceso de recolección de datos, y posteriormente se realizará el análisis de estos.

6.2 Selección de métodos para la recolección de información y técnicas de análisis de datos

Para el análisis de datos y tecnologías que permitan al cumplimiento de los objetivos planteados para la investigación, se toman en cuenta tres documentos, y las propuestas que estos exponen. Adicionalmente, con base en los resultados que estos muestran, se toma en cuenta la metodología estadística conocida como PROMETHEE para efectuar un análisis comparativo que permita dar con la conclusión de qué tecnología es más adecuada, teniendo en cuenta criterios de cumplimiento normativo, ambiental y sus resultados.

Documento	Técnica de Análisis	Descripción
<i>Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio- Convertir un residuo en un recurso (Althausen, 2016)</i>	Metodología PROMETHEE	Es un enfoque de toma de decisiones multicriterio que se utiliza para clasificar y priorizar alternativas en función de múltiples criterios. permite evaluar y comparar
<i>Evaluación del tratamiento del efluente de la palma de</i>		

<i>aceite (POME) en el proceso de extracción en la planta extractora Vizcaya S.A.S. (P. Castillo & Q. Lara, 2022)</i>	(Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations).	alternativas mediante la construcción de una matriz de preferencias, en la que se establece una relación de preferencia entre cada par de alternativas en función de cada criterio (Brans & Mareschal, 1994)
<i>Caracterización de las aguas residuales del proceso de extracción de aceite en la industria papsa (Perez, 2019)</i>		

Tabla 1. Documentos utilizados para la recolección de datos y descripción del modelo estadístico elegido para su análisis y posteriores conclusiones. Elaboración propia.

Con respecto al análisis y control operacional de los sistemas de tratamiento de efluentes, se propone el uso de la técnica de análisis de contenido con el fin de identificar y comparar las prácticas operativas relacionadas con la gestión de lagunas de tratamiento.

Documento	Técnica de Análisis	Descripción y Aplicación
<i>Evaluación del tratamiento del efluente de la palma de aceite (POME) en el proceso de extracción en la planta extractora Vizcaya S.A.S. (P. Castillo & Q. Lara, 2022)</i>	Análisis de Contenido	El Análisis de Contenido es una técnica cualitativa que se utiliza para examinar documentos de manera sistemática. Esta técnica permite identificar y categorizar temas, patrones, y conceptos recurrentes dentro de un texto. El uso del análisis de contenido en los tres documentos permitirá identificar y comparar las prácticas operativas relacionadas con la gestión de lagunas de tratamiento, el manejo de variables claves y para generar recomendaciones basadas en patrones identificados en los documentos revisados.
<i>Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio-Convertir un residuo en un recurso (Althausen, 2016)</i>	Análisis de Contenido	
<i>Diseños planteados de tipo no experimental (2018)</i>	Análisis de Contenido	

Tabla 2. Documentos utilizados para la recolección de datos y descripción de la técnica de análisis escogida. Elaboración propia.

7. Análisis y discusión de los resultados

7.1 Evaluación de tecnologías

Los tres documentos analizados presentan un total de seis tecnologías que pueden apoyar al cumplimiento de los objetivos planteados. A continuación, se detallarán las tecnologías propuestas por cada autor:

7.1.1 Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio (ClimeCo International Corp) (Althausen, 2016)

A. Lagunas abiertas

Descripción:

Sistema biológico que utiliza lagunas anaeróbicas, facultativas y aeróbicas para la digestión de la materia orgánica en el efluente (POME).

- **Laguna Anaeróbica:** Aquí se lleva a cabo la digestión anaeróbica inicial donde la materia orgánica es degradada por bacterias en ausencia de oxígeno. Esta etapa produce gases como el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2).
- **Laguna Facultativa:** Mezcla de condiciones anaeróbicas y aeróbicas donde la materia orgánica restante se sigue degradando.
- **Laguna Aeróbica:** El último paso en el que el oxígeno es introducido para oxidar los residuos orgánicos restantes, clarificando así el agua.

Eficiencia:

DBO: Reducción de aproximadamente 25,000 mg/L a 1,500 mg/L.

DQO: Reducción de aproximadamente 55,000 mg/L a 1,500 mg/L.

Ventajas:

Bajo costo de implementación y operación.
Simplicidad en el diseño y mantenimiento.

Desventajas:

Requiere grandes extensiones de terreno.
Largos tiempos de retención (más de 35 días).
Emisiones de gases de efecto invernadero y malos olores.

B. Reactores de Mezcla Continua (CSTR)

Descripción:

Biorreactores avanzados que operan en condiciones controladas de mezcla continua, temperatura y remoción de lodos, optimizando la digestión anaeróbica de la materia orgánica.

Eficiencia:

DBO: Reducción significativa, pero no especificada en detalle.

DQO: Reducción de aproximadamente 120,000 mg/L a 15,000 mg/L.

Ventajas:

Alta eficiencia en la reducción de contaminantes.

Producción estable de biogás como subproducto.

Desventajas:

Requiere una alta inversión inicial.

Necesita personal especializado para operación y mantenimiento.

C. Sistemas Multietapas (CSTR + UASB)

Descripción:

Combinación de CSTR y UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) para maximizar la eficiencia en la digestión del POME, con varias etapas para tratar el efluente.

Eficiencia:

DBO: Reducción a menos de 2,000 mg/L.

DQO: Reducción de 120,000 mg/L a menos de 2,000 mg/L.

Ventajas:

Alta eficiencia en la reducción de contaminantes.

Mayor recuperación de biogás.

Adaptabilidad a diferentes cargas de efluente.

Desventajas:

Costo elevado y complejidad operativa.

Requiere pretratamiento para evitar obstrucciones en el UASB.

7.1.2 Evaluación del Tratamiento en Extractora Vizcaya S.A.S. (Monografía de Universidad de Antioquia) (P. Castillo & Q. Lara, 2022)

D. Lagunas Abiertas

Descripción:

Similar al sistema descrito en el primer documento, utilizado como la opción más común en la industria del aceite de palma en Colombia.

Eficiencia:

DBO: Reducción a aproximadamente 1,500 mg/L.

DQO: Reducción a aproximadamente 1,500 mg/L.

Ventajas:

Económico y fácil de operar.

Desventajas:

Eficiencia limitada y dependiente de factores ambientales.

Problemas de emisiones y olores.

E. Coagulación-Floculación con Quitosano

Descripción:

Utiliza el Quitosano, un biopolímero natural, como coagulante para mejorar la calidad del POME antes del tratamiento biológico o físico.

Eficiencia:

DBO: No especificado.

DQO: Reducción del 92.5% de la DQO.

SST: Reducción del 99.7% de sólidos suspendidos totales.

Ventajas:

Alta eficiencia en la remoción de sólidos, grasas y aceites.

Mejora la eficiencia de los tratamientos biológicos posteriores.

Desventajas:

Costoso en grandes volúmenes.
Requiere pretratamiento adecuado para maximizar su eficacia.

7.1.3 Caracterización de las Aguas Residuales del Proceso de Extracción de Aceite en la Industria PAPSA (Perez, 2019)

F. Decantador

Descripción:

Proceso físico que permite la sedimentación de sólidos y la reducción parcial de la carga orgánica del POME.

Eficiencia:

DBO: Reducción a 9,888.56 mg/L.
DQO: No especificado.

Ventajas:

Bajo costo inicial.
Proceso simple y directo.

Desventajas:

Reducción insuficiente de contaminantes.
Requiere tratamiento adicional para cumplir con normativas.

G. Lagunas de Oxidación

Descripción:

Sistema que combina procesos biológicos y físicos para reducir la carga contaminante del POME.

Eficiencia:

DBO: Reducción a 7,586.2 mg/L.
DQO: No especificado.

Ventajas:

Mayor eficiencia que el decantador.
Mejora en la calidad del efluente respecto a métodos más simples.

Desventajas:

Aún insuficiente para cumplir con normativas ambientales.
Requiere grandes áreas y tiempos prolongados.

7.1.4 Consolidado de Resultados

Resumen Comparativo de DBO			
Metodología	DBO Inicial	DBO Final	Comentarios
Lagunas Abiertas	25.000 mg/L	1.500 mg/L	La metodología es eficiente, pero depende de condiciones óptimas; requiere gran espacio y tiempo, y puede tener dificultades para cumplir con normas estrictas.
Reactores de Mezcla Continua (CSTR)	25.000 mg/L	No especificado (~medio)	La metodología tiene alta eficiencia, no se especifica la DBO final exacta; pero se referencia un % mejor que lagunas abiertas, pero menor reducción que sistemas multietapas.
Sistemas Multietapas (CSTR + UASB)	25.000 mg/L	<2.000 mg/L	La Metodología más eficiente, combina varias etapas para reducir significativamente la DBO en menos tiempo y espacio, cumpliendo con normativas más estrictas.
Coagulación-Floculación con Quitosano	25.000 mg/L	No especificado	La metodología enfocada en la reducción de sólidos y aceites; no es un método primario para la reducción de DBO, se usa principalmente como pretratamiento.
Decantador (PAPSA)	No especificado	9.888.56 mg/L	Metodología que realiza una reducción parcial de DBO, pero insuficiente para cumplir con normativas más estrictas; valores finales de DBO aún son altos.
Lagunas de Oxidación (PAPSA)	No especificado	7.586.2 mg/L	Metodología que presenta mejora en la reducción de DBO respecto al decantador, pero los valores siguen siendo altos y por encima de los límites permisibles.

Tabla 3. Comparativo de resultados de las seis tecnologías propuestas en términos de DBO. Elaboración propia.

7.1.5 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico comparativo que deriva en la elección de la mejor alternativa de tecnología, se elige el método Promethee. Se compone de las siguientes etapas:

1. Definición de Alternativas y Criterios
2. Asignación de pesos a los Criterios
3. Evaluación de las Alternativas bajo Cada Criterio

4. Cálculo de Preferencias
5. Clasificación Final

Una vez realizado el análisis Promethee, para las seis metodologías definidas en el cual se evalúan 5 criterios por cada metodología.

Metodología	Eficiencia en la Reducción de DBO	Cumplimiento Normativo	Costo de Implementación y Operación	Impacto Ambiental	Producción de Biogás	
Lagunas Abiertas	25%	40%	15%	15%	5%	100%
Reactores de Mezcla Continua (CSTR)	25%	40%	15%	15%	5%	100%
Sistemas Multietapas (CSTR + UASB)	25%	40%	15%	15%	5%	100%
Coagulación-Floculación con Quitosano	25%	40%	15%	15%	5%	100%
Decantador (PAPSA)	25%	40%	15%	15%	5%	100%
Lagunas de Oxidación (PAPSA)	25%	40%	15%	15%	5%	100%

Tabla 4. Comparativo de resultados de las seis tecnologías propuestas en términos de DBO. Elaboración propia.

Posterior a esto se realiza la evaluación cuantitativa y/o cualitativa a las 5 metodologías obteniendo los siguientes resultados.

Metodología	Eficiencia en la Reducción de DBO	Cumplimiento Normativo	Costo de Implementación y Operación	Impacto Ambiental	Producción de Biogás
Lagunas Abiertas	60 (1,500 mg/L)	20 (no cumple)	85 (bajo costo)	30 (alto impacto por uso de espacio y emisiones)	N/A
Reactores de Mezcla Continua (CSTR)	75 (estimación media)	30 (probable incumplimiento)	85 (bajo costo)	60 (impacto moderado, controlado)	70 (significativa producción de biogás)
Sistemas Multietapas (CSTR + UASB)	85 (<2,000 mg/L)	35 (mejora respecto a otros, pero aún no cumple)	40 (muy alto costo)	70 (bajo impacto)	85 (muy alta producción de biogás)
Coagulación-Floculación con Quitosano	50 (en combinación, mejora otras metodologías)	40 (mejora el cumplimiento cuando se usa en combinación)	60 (medio costo)	80 (bajo impacto, biodegradable)	N/A
Decantador (PAPSA)	30 (9,888.56 mg/L)	10 (muy lejos de cumplir)	90 (muy bajo costo)	20 (impacto alto,	N/A

				insuficiente tratamiento)	
Lagunas de Oxidación (PAPSA)	40 (7,586.2 mg/L)	15 (ligera mejora, pero no cumple)	85 (bajo costo)	30 (impacto alto)	N/A

Tabla 5. Comparativo de resultados de las seis tecnologías propuestas en términos de DBO. Elaboración propia.

Posterior a esto se realiza el cálculo de preferencias, el cual se calcula por medio de las diferencias de cada criterio.

Sistemas Multietapas vs. Lagunas Abiertas

- **Eficiencia en DBO:** Sistemas Multietapas tiene 85 y Lagunas Abiertas 60.
✓ Preferencia = $25 \times 0.25 = 6.25$.
- **Cumplimiento Normativo:** Sistemas Multietapas tiene 35 y Lagunas Abiertas 20.
✓ Preferencia = $15 \times 0.40 = 6$.
- **Costo:** Lagunas Abiertas tiene 85 y Sistemas Multietapas 40.
✓ Preferencia = $45 \times 0.15 = 6.75$ (pero a favor de Lagunas Abiertas).
- **Impacto Ambiental:** Sistemas Multietapas tiene 70 y Lagunas Abiertas 30.
✓ Preferencia = $40 \times 0.15 = 6$.
- **Producción de Biogás:** Sistemas Multietapas tiene 85 y Lagunas Abiertas 0.
✓ Preferencia = $85 \times 0.05 = 4.25$.

Total, Preferencia de Sistemas Multietapas sobre Lagunas Abiertas: $6.25 + 6 + 6 - 6.75 + 6 + 4.25 = 21.75$.

Posterior a esto se obtienen los siguientes resultados.

1. **Sistemas Multietapas (CSTR + UASB): PRO:** La opción más preferida. **CONTRA:** pero aún requiere ajustes para cumplir plenamente con la normativa.
2. **CSTR: PRO:** Segunda opción, buen rendimiento. **CONTRA:** pero menos eficiente y más costosa que los sistemas multietapas.
3. **Coagulación-Floculación con Quitosano: PRO:** Mejora otros sistemas. **CONTRA:** pero no es suficiente por sí sola.
4. **Lagunas Abiertas: PRO:** Económica. **CONTRA:** pero con un rendimiento bajo en eficiencia y cumplimiento normativo.

5. **Lagunas de Oxidación (PAPSA): PRO:** Rendimiento ligeramente mejor que el Decantador. **CONTRA:** pero insuficiente.
6. **Decantador (PAPSA): PRO:** La opción menos preferida. **CONTRA:** no cumple con los requisitos básicos.

Al momento que se definió tomar el criterio de cumplimiento normativo como criterio central (mayor peso 40%) donde la mejor opción es Sistemas Multietapas (CSTR+UASB), esto con relación a tecnologías más simples como lagunas abiertas, sistemas PAPSA.

7.2 Análisis y control operacional de los sistemas de tratamiento de efluentes

Con respecto, a la revisión documental de alternativas de mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales para implementar en la empresa, teniendo en cuenta la metodología de análisis de contenido, se da un enfoque en la operación y control de variables como pH, temperatura y gestión de purgas/lodos.

7.2.1 Resultados operativos del sistema lagunas abiertas

a. Control del pH

El pH es una variable crítica en el tratamiento del POME. La Resolución 0631 de 2015 establece que el pH de los vertimientos debe estar entre 6 y 9. Sin embargo, los sistemas de tratamiento tradicionales, como las lagunas abiertas, enfrentan dificultades para mantener el pH dentro de estos límites.

- **Documento 1 (Peña y Lara, 2022):** En la Extractora Vizcaya S.A.S., el pH del POME tratado tiende a estar en un rango ácido (entre 4 y 5), lo cual está fuera de los límites permitidos. Este documento señala que el ajuste manual del pH es ineficiente y depende de intervenciones humanas periódicas.
- **Documento 2 (Althausen, 2015):** El texto destaca que los sistemas tradicionales, como las lagunas abiertas, carecen de mecanismos automáticos para controlar el pH, lo que reduce la eficiencia de la digestión anaeróbica. Esto afecta negativamente el cumplimiento normativo.
- **Documento 3 (Diseños planteados de tipo no experimental, 2018):** Aquí se menciona que en los estudios no experimentales y descriptivos, los sistemas de tratamiento de aguas residuales, como las lagunas abiertas, carecen de monitoreo adecuado del pH, lo que resulta en variaciones significativas que complican el control de este parámetro.

Resultado: En los tres documentos se identifica la misma problemática: la falta de un sistema automatizado para controlar el pH en las lagunas abiertas. Esto afecta la eficiencia operativa y dificulta el cumplimiento de la normativa de vertimiento.

b. Gestión de la temperatura

El control de la temperatura es esencial para mantener una actividad microbiana eficiente durante la digestión anaeróbica del POME, pero los sistemas de lagunas abiertas están expuestos a fluctuaciones climáticas que pueden afectar su funcionamiento.

- **Documento 1 (Peña y Lara, 2022):** La temperatura del POME en las lagunas abiertas fluctúa dependiendo de las condiciones ambientales. Durante el análisis, se observa que las temperaturas inadecuadas disminuyen la eficiencia de la digestión microbiana.
- **Documento 2 (Althausen, 2015):** Este documento subraya que las lagunas abiertas no permiten controlar la temperatura de manera precisa. Las fluctuaciones extremas, ya sea por calor o frío, pueden reducir la actividad biológica, afectando la capacidad del sistema para tratar los efluentes.
- **Documento 3 (Diseños planteados de tipo no experimental, 2018):** Se señala que los estudios descriptivos han mostrado una baja capacidad de control de temperatura en las lagunas abiertas, lo cual afecta directamente la tasa de reducción de DQO y la producción de biogás.

Resultado: Los tres documentos coinciden en que el control de la temperatura en las lagunas abiertas es limitado, lo que afecta la eficiencia operativa del sistema y, en consecuencia, el cumplimiento de las normativas ambientales.

c. Gestión de purgas y remoción de lodos

La gestión de lodos es fundamental para evitar la sobrecarga de sólidos suspendidos en el sistema y asegurar la capacidad de tratamiento continuo en las lagunas.

- **Documento 1 (Peña y Lara, 2022):** El documento menciona que la acumulación de lodos es un problema persistente en la Extractora Vizcaya S.A.S., ya que las purgas se realizan manualmente y de forma esporádica, lo que reduce la capacidad efectiva de tratamiento.
- **Documento 2 (Althausen, 2015):** Se describe que la acumulación de lodos es un desafío constante en las lagunas abiertas, donde los sólidos suspendidos se sedimentan en el fondo, reduciendo la eficiencia del tratamiento y requiriendo costosas intervenciones manuales para la remoción de lodos.
- **Documento 3 (Diseños planteados de tipo no experimental, 2018):** Los estudios descriptivos también señalan que la falta de un sistema automatizado para la remoción de lodos en las lagunas abiertas afecta la eficiencia a largo plazo, ya que los lodos se acumulan rápidamente y reducen la capacidad de tratamiento del sistema.

Resultado: La gestión ineficiente de lodos en las lagunas abiertas es una limitación identificada en los tres documentos. La acumulación de lodos reduce la capacidad de tratamiento, afecta la calidad del efluente y genera dificultades para cumplir con los límites de sólidos suspendidos establecidos por la normativa.

7.2.2 Propuesta de mejora operativo

Dado que el análisis de contenido revela problemas relacionados con el control de pH, la temperatura y la gestión de lodos en los sistemas de lagunas abiertas, se proponen las siguientes mejoras operativas para optimizar el sistema y asegurar su alineación con la Resolución 0631 de 2015.

a. Instalación de Sensores de pH y Sistemas de Ajuste Automático

- **Propuesta:** Implementar sensores de pH que monitoreen continuamente este parámetro y sistemas de ajuste automático que añadan alcalinizantes o acidificantes según sea necesario para mantener el pH dentro del rango normativo (6-9).

Automatizar el control del pH garantizará que el efluente cumpla con los requisitos normativos sin necesidad de ajustes manuales periódicos.

b. Control de temperatura mediante cubiertas parciales o flotantes

- **Propuesta:** Utilizar cubiertas parciales o flotantes para aislar las lagunas del clima exterior y reducir las fluctuaciones de temperatura.

Lo anterior con el fin de mantener una temperatura más estable que aumente la eficiencia de la digestión anaeróbica, mejorando la reducción de DQO y sólidos suspendidos totales.

c. Implementación de sistemas de purgas automatizadas

- **Propuesta:** Implementar un sistema de purga automatizado que elimine los lodos de manera continua o en intervalos regulares.

La remoción continua de lodos evitará su acumulación, mejorando la capacidad de tratamiento de las lagunas y reduciendo la concentración de sólidos suspendidos en el efluente.

8 Conclusiones

La investigación ha permitido identificar que el sistema actual de tratamiento de aguas residuales presenta deficiencias, principalmente en el cumplimiento de los límites establecidos para la DQO. Se proponen soluciones tecnológicas como la implementación de sistemas multietapas (CSTR + UASB) que han demostrado ser las más eficientes en la reducción de contaminantes y el cumplimiento normativo, a pesar de sus costos elevados.

El incumplimiento de los parámetros de DQO establecidos en la Resolución 0631 de 2015 pone en riesgo tanto la sostenibilidad de las operaciones de la empresa como su relación con la comunidad. Las mejoras propuestas no solo buscan alinear la empresa con la normativa, sino también reducir su impacto ambiental y mejorar su responsabilidad social corporativa.

Las alternativas propuestas, como el uso de sensores para monitoreo continuo de parámetros críticos como pH y temperatura, así como la automatización de procesos como la purga de lodos, optimizan la operación del sistema, mejorando la eficiencia sin comprometer la calidad del efluente. Estas mejoras permitirán a la empresa optimizar recursos y reducir costos operativos a largo plazo.

9 Referencias

- (ISO), O. I. (2015). *Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso*.
- Althausen, M. (2016). Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio Convertir un residuo en un recurso. *Palmas*, 37 (Especial Tomo II), 31-37.
- American Public Health Association (APHA), A. W. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23 ed.).
- Bowen, H. (1953). *Social Responsibilities of the Businessman*. Harper & Brothers.
- Brans, J.-P., & Mareschal, B. (1994). *PROMETHEE methods*. In *Multicriteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Berlin: Springer.
- Carroll, A. (1991). The pyramid of corporate social responsibility: Toward the moral management of organizational stakeholders. *Business Horizons*, 39-48.
- Cenipalma. (2020). *Guía técnica para el tratamiento de aguas residuales en la industria de aceite de palma*.
- Cenipalma. (2021). Manual de operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en extractoras de palma.
- Colombia, A. C. (4 de Julio de 1991). *Función Pública*. Obtenido de Función Pública: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4125>
- Colombia, C. d. (22 de 12 de 1993). *Ley 99 de 1993*. Obtenido de Ley 99 de 1993: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>
- Curran, M. A. (2012). *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products*. Wiley.
- Deming, W. (1986). *Out of the Crisis*. MIT Press.
- Desarrollo, O. R. (22 de 12 de 1993). *Observatorio Regional de Planificación para el Desarrollo*. Obtenido de <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/marcos-regulatorios/ley-general-ambiental-de-colombia-ley-99-de-1993#:~:text=La%20Ley%2099%20de%201993,la%20Naci%C3%B3n%2C%20a%20fin%20de>
- DNP, M. A. (26 de 6 de 1984). *Decreto 1594*. Obtenido de Decreto 1594: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18617>
- Drucker, P. (1967). *The Effective Executive*. New York City: HarperCollins Publishers.
- El Ministerio de Ambiente, V. y. (25 de 10 de 2010). *Decreto 3930*. Obtenido de Decreto 3930: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=40620>
- El Ministerio de Ambiente, V. y. (23 de 12 de 2010). *Decreto 4728*. Obtenido de Decreto 4728: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=41009>
- Elkington, J. (1994). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. Oxford: Capstone Publishing Limited.
- European Commission. (2021). *The European Green Deal*. European Commission.
- Fernandez, L., & Martinez, R. (2019). Eficacia de nuevos procesos de depuración. *Revista Digital de Medio Ambiente*, 50-67.
- Friedman, M. (13 de Septiembre de 1973). A Friedman doctrine-- The Social Responsibility of Business Is to Increase Its Profits. *The New York Times*, pág. 17.
- García, A. (2021). *Eficiencia en el tratamiento de aguas residuales en la industria aceitera (Tesis de Maestría)*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- García, A. R. (2020). Aplicación del modelo de Monod en sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 123-136.
- Henze, M. v. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*.

- Icontec. (15 de 9 de 2021). *NTC 3629*. Obtenido de Calidad del agua. Demanda química de oxígeno (DQO): [https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-agua-demanda-quimica-de-oxigeno-dqo-ntc3629-2021.html#:~:text=NTC%203629%3A2021,Demanda%20qu%C3%ADmica%20de%20oxigeno%20\(DQO\)](https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-agua-demanda-quimica-de-oxigeno-dqo-ntc3629-2021.html#:~:text=NTC%203629%3A2021,Demanda%20qu%C3%ADmica%20de%20oxigeno%20(DQO))
- Icontec. (19 de 5 de 2021). *NTC 3630*. Obtenido de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): <https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-agua-demanda-bioquimica-de-oxigeno-dbo-ntc3630-2021.html>
- Instruments, H. (1978). *DQO*. Obtenido de DQO: <https://www.hannainst.es/blog/81/demanda-quimica-de-oxigeno#:~:text=La%20Demanda%20Qu%C3%ADmica%20de%20Ox%C3%ADgeno,e xpresa%20en%20mg%2F1%20O2.>
- KPMG. (2020). *The Time Has Come: The KPMG Survey of Sustainability Reporting 2020*. KPMG.
- KPMG. (2022). *Big shifts, small steps. Survey of Sustainability Reporting 2022*. KPMG.
- López, J. (2021). Optimización de lagunas facultativas en el tratamiento de efluentes industriales. *Journal of Environmental Engineering*, 40(1), 78-85.
- Metcalf, & E. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5 ed.).
- Minambiente. (17 de 3 de 2017). *Resolución 0631*. Obtenido de Resolución 0631: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>
- Minambiente. (6 de 7 de 2021). *Resolución 0699*. Obtenido de Resolución 0699: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0699-de-2021/>
- Minambiente. (1 de 1 de 2024). *Vertimientos y Reúso de Aguas Residuales*. Obtenido de Vertimientos y Reúso de Aguas Residuales: <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales/#tabs-1>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (17 de Marzo de 2015). *Resolución 631 de 2015*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>
- Monod, J. (1949). The Growth of Bacterial Cultures. *Annual Review of Microbiology*, 3, 371-394.
- P. Castillo, C., & Q. Lara, L. Z. (2022). *Evaluación del tratamiento del efluente de la palma de aceite (POME) en el proceso de extracción en la planta Extractora Vizcaya S.A.S*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Perez, B. (2019). *CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE EN LA INDUSTRIA PAPSA*. Chiapas: UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS.
- Pyzdek, T., & Keller, P. (2009). *The Six Sigma Handbook*. McGraw-Hill.
- Ríos, M., & Pérez, J. (2020). Mejoras en la eficiencia de tratamiento de aguas residuales. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 100-115.
- Rodríguez, P. &. (2019). Eficiencia de sistemas de enfriamiento en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Ingeniería Química*, 35(4), 45-52.
- Vásquez, R. (2022). Producción de biogás a partir de aguas residuales en la industria del aceite de palma. *Energía Renovable y Medio Ambiente*, 18(3), 102-115.
- Womack, J., & Jones, D. (1996). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. Simon & Schuster.

World Commission on Environment and Development. (1987). Our Common Future. *Report of the World Commission on Environment and Development*. United Nations.