



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**“DESARROLLO DE UN PROCESO SUSTENIBLE A NIVEL INDUSTRIAL DE
TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE PROVENIENTE DE LA MANUFACTURA
DE ADITIVOS ALIMENTARIOS PARA RECUPERAR AGUA”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTORA
EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

M en CA IVETTE MONTERO GUADARRAMA

No. CONTROL:

22281236

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. CLAUDIA ROSARIO MURO URISTA

CODIRECTORA:

DRA. GABRIELA ROA MORALES



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, 20/Mayo/2026
DEPI-3200-337/2026

IVETTE MONTERO GUADARRAMA
CANDIDATA AL GRADO DE DOCTORA
EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTE

De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México y las disposiciones en este Instituto, habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis Titulado: **"DESARROLLO DE UN PROCESO SUSTENTABLE A NIVEL INDUSTRIAL DE TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE PROVENIENTE DE LA MANUFACTURA DE ADITIVOS ALIMENTARIOS PARA RECUPERAR AGUA"**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este Instituto, concede la Autorización para que proceda al envío del trabajo final vía correo Institucional.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica

"Educación, integridad y ciencia"


JORGE SÁNCHEZ JAIME
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Archivo
JSJ/mcc



2026
año de
Margarita
Maza



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México, C.P. 52149,
Tels. Dirección: 7222087205, Conmut.: 7222087200, e-mail: info@toluca.tecnm.mx
toluca.tecnm.mx



Educación
Secretaría de Educación Pública



TRIBUNAL
ELECTORAL DEL PODER JUDICIAL DE LA FEDERACIÓN



Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, 18/Mayo/2026
DEPI-3200-323/2026

DR. JORGE SÁNCHEZ JAIME
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

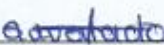
PRESENTE

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la Tesis denominada "DESARROLLO DE UN PROCESO SUSTENTABLE A NIVEL INDUSTRIAL DE TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE PROVENIENTE DE LA MANUFACTURA DE ADITIVOS ALIMENTARIOS PARA RECUPERAR AGUA", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Doctor en Ciencias Ambientales presenta el **C. IVETTE MONTERO GUADARRAMA** con número de control **D22281236** para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

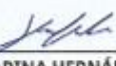

DRA. CLAUDIA ROSARIO MURO URISTA
DIRECTORA DE TESIS


DRA. GABRIELA ROA MORALES
CODIRECTORA DE TESIS


DRA. YOLANDA ALVARADO PÉREZ
REVISORA DE TESIS




DRA. EDITH ERIELIA GUTIÉRREZ SEGURA
REVISORA DE TESIS


DRA. KARINA HERNÁNDEZ GÓMEZ
REVISORA DE TESIS


DRA. VIANNEY DÍAZ BLANCAS
REVISORA DE TESIS

ccp. Archivo
JSJ/mcd



2026
año de
Margarita
Maza



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México, C.P. 52149,
Tels. Dirección: 7222087205, Conmut.: 7222087200, e-mail: info@toluca.tecnm.mx
toluca.tecnm.mx

AGRADECIMIENTOS O RECONOCIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento al Instituto Tecnológico de Toluca (ITTOL) por brindarme la formación académica, el acompañamiento institucional y el espacio para desarrollar el presente trabajo de investigación.

Asimismo, agradezco al Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS) el apoyo académico, técnico y científico proporcionado durante la realización de esta investigación, así como por facilitar las condiciones necesarias para el desarrollo experimental y analítico del presente estudio.

De manera especial reconozco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada en la duración del doctorado, número de registro 852212, cuyo respaldo fue fundamental para la realización y conclusión de mis estudios de posgrado.

Esta investigación fue realizada bajo la supervisión de la Dra. Claudia R. Muro Urista en el Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental (LIIA) en el área de membranas, con número de registro DCA. A la cual se le da un atento agradecimiento.

A mis compañeros y amigos de doctorado y de laboratorio les doy un atento agradecimiento.

A los doctores, técnicos y personas que ayudaron a la realización de este proyecto.

DEDICATORIA

A Dios principalmente, por darme la vida, fortaleza, salud y la sabiduría necesaria para llegar hasta este momento.

A mis padres, hermanos y sobrinas (Melannie y Abby), por su amor, por su apoyo y sus enseñanzas. Este logro también es gracias a ustedes.

Especialmente dedico este trabajo a Lorenzo González Báez por estar a mi lado con amor, paciencia y por su apoyo incondicional durante todo este proceso. Gracias por creer en mí, por acompañarme en los momentos difíciles, por darme fuerza y por compartir conmigo esta etapa de mi vida. Tu presencia ha sido un regalo invaluable.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de investigación fue determinar una propuesta sostenible de tratamiento de un efluente proveniente de una industria del sector alimenticio ubicada en el Estado de México para recuperar agua con calidad de agua potable, a fin de sugerir su implementación a escala industrial. El efluente en estudio se genera a razón de 7500 m³/mes proveniente del proceso de manufactura de aditivos, caracterizado por una alta salinidad y elevada carga orgánica, derivada de la presencia de colorantes, sólidos disueltos y sedimentables.

Actualmente, el efluente se envía a una planta externa para su tratamiento, lo que implica costos operativos elevados y limita la posibilidad de recuperar agua. Adicionalmente, el crecimiento de la empresa se ve restringido por su dependencia del suministro de agua potable para los diversos procesos productivos, lo que genera gastos adicionales significativos por el requerimiento de agua potable y a su vez agrava el problema de escasez hídrica en la región.

En atención al requerimiento planteado, previamente se han establecido 4 alternativas de tratamiento con capacidad para depurar el efluente. Cada alternativa está conformada por un sistema secuencial de tratamiento. La alternativa 1 comprende filtración, adsorción con carbón activado y ósmosis inversa; la alternativa 2 incluye filtración, oxidación con ozono y ósmosis inversa; la alternativa 3 incorpora filtración, oxidación catalítica con ozono y carbón activado (O₃–CA) y ósmosis inversa; mientras que la alternativa 4 considera la evaporación completa del efluente.

Dado que las alternativas depuran el efluente, estos sistemas se evaluaron como un proyecto de inversión para determinar su sostenibilidad y apoyar la decisión de su implementación mediante estudios de factibilidad técnica, económica, ambiental y análisis de ciclo de vida (ACV) basada en la ISO 14001 y la cuantificación de impactos ambientales utilizando la ISO 14040 e ISO14044, el software SimaPro® (v.9.10.2.0.0) y el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.09/World (2010).

Los resultados de la evaluación de factibilidad técnica demostraron que las cuatro alternativas son aptas para tratar el efluente industrial y recuperar agua de calidad

equivalente a agua potable; por tanto, no existe evidencia de toxicidad. No obstante, bajo el proceso de osmosis inversa establecido, las alternativas 1 y 2 recuperan 40 % de agua, la alternativa 3, 50 % y la alternativa 4, 98 %. En las alternativas 1-3 se genera un concentrado salino, 60-50%, el cual es apto para su reúso, por lo que no se generan residuos líquidos y se cumple con requisitos normativos de descarga y disposición. Sin embargo, la alternativa 4 genera un 2% de concentrado salino que no puede reutilizarse debido a la presencia de colorantes provenientes del efluente, por lo que requiere disposición final.

De acuerdo con el caudal requerido para el tratamiento del efluente y la recuperación de agua a nivel industrial, los equipos de proceso, los sistemas auxiliares y los materiales necesarios para las cuatro alternativas están disponibles comercialmente. Por lo que en este aspecto todas las alternativas tienen factibilidad técnica. Asimismo, las primeras tres alternativas pueden instalarse dentro del espacio de infraestructura planeado por la empresa; sin embargo, la alternativa 4 demanda un área significativamente mayor, lo cual representa un factor relevante para considerar en la toma de decisiones.

Con respecto a la factibilidad económica, las alternativas 1-3 generan un costo de \$27 a \$28 MXN/m³ de tratamiento del efluente con costo de inversión de \$12-18.6 millones de pesos y la recuperación de inversión de 2.4 y 3.8 años, mientras que la alternativa 4 presenta una inversión de \$37.6 millones y de \$50 MXN/m³ con tasa de recuperación incalculable.

En la evaluación de la factibilidad ambiental, todas las alternativas mostraron un impacto positivo derivado de la recuperación de agua, mientras que los impactos negativos asociados a la operatividad del proceso de tratamiento son derivados de la generación de residuos sólidos que incluyen materiales, lodos y módulos de reemplazo, resultando un índice de impacto ambiental (R) de 1, el cual se clasifica como bajo impacto. La alternativa 3 sobresale por presentar los menores efectos ambientales, generando menor cantidad de residuos sólidos. Por el contrario, la alternativa 4 se posiciona como la opción de mayor impacto ambiental debido a la elevada demanda energética requerida para su operación y el residuo salino generado.

En el análisis ACV se determinó que en el escenario base (vertido del efluente industrial sin tratamiento), la carga orgánica y salinidad del efluente impactan en eutrofización de cuerpos de agua, mientras que la operatividad del tratamiento de las alternativas propuestas generan un alto impacto en diferentes factores ambientales, debido al consumo eléctrico que requiere el proceso de ósmosis en las alternativas 1-3 y la evaporación en la alternativa 4, la cual se destaca por el mayor impacto energético. Por tanto, se sugiere incorporar fuentes alternativas de energía en los tratamientos para reducir el impacto negativo notablemente; sin embargo, esta medida implicaría un incremento en la inversión inicial y de operación, lo que podría afectar su factibilidad económica.

De acuerdo con los resultados obtenidos en dichos estudios, para implementar un proceso de tratamiento del efluente a nivel industrial y recuperación de agua se recomienda la alternativa 3 con sugerencia del uso de la incorporación de una fuente alterna de energía en la ósmosis inversa para obtener un proceso sustentable.

ABSTRACT

This research aimed to determine a sustainable treatment proposal for an effluent coming from a food industry located in the State of Mexico to recover water with drinking water quality, and to suggest its implementation on an industrial scale. The study is generated at a rate of 7,500 m³/month, coming from the additive manufacturing process, characterized by high salinity and a high organic load, derived from the presence of colorants, dissolved solids, and settleable solids.

Currently, the effluent is sent to an external plant for treatment, which involves high operational costs and limits the possibility of recovering water. Additionally, the company's growth is restricted by its dependence on the supply of drinking water for the various production processes, generating significant additional expenses due to the requirement of drinking water and, in turn, worsening the problem of water scarcity in the region.

In response to the request made, four treatment alternatives with the capacity to purify the effluent have previously been established. Each alternative consists of a sequential treatment system. Alternative 1 includes filtration, activated carbon adsorption, and reverse osmosis; alternative 2 includes filtration, ozone oxidation, and reverse osmosis; alternative 3 incorporates filtration, catalytic oxidation with ozone and activated carbon (O₃-AC), and reverse osmosis, while alternative 4 considers the complete evaporation of the effluent.

Since the alternatives purify the effluent, these systems were evaluated as an investment project to determine their sustainability and support the decision of their implementation through technical, economic, and environmental feasibility studies and life cycle analysis (LCA) based on ISO 14001 and the quantification of environmental impacts using ISO 14040 and ISO 14044, and SimaPro® software (v.9.10.2.0.0) and the ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.09/World (2010) method.

The results of the technical feasibility assessment demonstrated that all four alternatives are suitable for treating industrial effluent and recovering water of quality

equivalent to drinking water; therefore, there is no evidence of toxicity. However, under the established reverse osmosis process, alternatives 1 and 2 recover 40% of water, alternative 3 recovers 50%, and alternative 4 recovers 98%. Alternatives 1-3 generate a saline concentrate, 60-50%, which is suitable for reuse, so no liquid waste is generated, and regulatory discharge and disposal requirements are met. However, alternative 4 generates 2% saline concentrate that cannot be reused due to the presence of dyes from the effluent and therefore requires final disposal.

According to the flow required for effluent treatment and water recovery at an industrial level, the process equipment, auxiliary systems, and materials needed for the four alternatives are commercially available. Therefore, in this respect, all the alternatives have technical feasibility. Likewise, the first three alternatives can be installed within the infrastructure space planned by the company; however, alternative 4 requires a significantly larger area, which represents a relevant factor to consider in decision-making.

Regarding economic feasibility, alternatives 1-3 generated a cost of \$27 to \$28 MXN/m³ for effluent treatment with an investment cost of \$12-\$18.6 million and an investment recovery of 2.4 to 3.8 years, while alternative 4 presents an investment of \$37.6 million and \$50 MXN/m³ with an incalculable recovery rate.

In the environmental feasibility assessment, all alternatives showed a positive impact derived from water recovery, while the negative impacts associated with the operation of the treatment process stem from the generation of solid waste, including materials, sludge, and replacement modules, resulting in an environmental impact index (R) of 1, which is classified as low impact. Alternative 3 stands out for having the lowest environmental effects, generating a smaller amount of solid waste. In contrast, alternative 4 is positioned as the option with the highest environmental impact due to the high energy demand required for its operation and the saline waste generated.

In the LCA analysis, it was determined that in the base scenario (discharge of untreated industrial effluent), the organic load and salinity of the effluent impact the eutrophication of water bodies, while the operation of the treatment of the proposed

alternatives generates a high impact on different environmental factors, due to the electrical consumption required by the osmosis process in alternative 4, which stands out for the highest energy impact. Therefore, it is suggested to incorporate alternative energy sources into the treatments to notably reduce the negative impact; however, this measure would imply an increase in initial and operational investment, which could affect its economic feasibility.

According to the results obtained in these studies, to implement an effluent treatment process at an industrial level and water recovery, alternative 3 is recommended with the suggestion of using an alternate energy source in the reverse osmosis to achieve a sustainable process.

CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	iv
CONTENIDO	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS	1
1.1 Procesos de tratamiento para recuperación de agua a partir de tratamiento de efluentes industriales	1
1.1.1 Procesos de membranas convencionales	4
1.1.2 Procesos integrados de membranas	6
1.1.3 Desalinización de agua	7
1.2 Procesos de oxidación avanzada POA's	9
1.2.1 Ozono (O ₃)	10
1.2.2 Carbón Activado como catalizador en la ozonación	11
1.3 Procesos sostenibles de tratamiento de efluentes	12
1.4 Evaluación de la factibilidad del proyecto de inversión	14
1.4.1 Factibilidad técnica	15
1.4.2 Factibilidad económica financiera	16
1.4.2.1 Escalamiento de procesos de membranas	20
1.4.3 Factibilidad ambiental	22
1.4.3.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	29
1.4.3.1.1 Metodología del Análisis del ciclo de Vida	30
2 METODOLOGÍA	34

2.1	Caracterización del efluente	35
2.1.1	Alternativas propuestas para la recuperación de agua	35
2.2	Evaluación técnica, económica y ambiental de las alternativas de tratamiento	36
2.2.1	Factibilidad técnica	36
2.2.1.1	Determinación de la calidad y toxicidad del agua recuperada	36
2.2.1.2	Determinación de los equipos requeridos y su dimensionamiento	40
2.2.2	Factibilidad económica	41
2.2.3	Factibilidad ambiental	42
2.2.3.1	Evaluación ambiental mediante la metodología de causa-efecto (Ihobe)	42
2.2.3.2	Evaluación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las alternativas de tratamiento del efluente	42
3	RESULTADOS	45
3.1	Factibilidad técnica de las alternativas de tratamiento del efluente industrial para recuperar agua	45
3.1.1	Calidad del agua recuperada	45
3.1.2	Características técnicas y dimensionamiento de los equipos requeridos	48
3.1.3	Diagramas de flujo de los sistemas de tratamiento	51
3.2	Factibilidad económica de las alternativas de tratamiento del efluente industrial para recuperar agua	54
3.3	Factibilidad ambiental de la operatividad de las alternativas de tratamiento del efluente industrial para recuperar agua	60
3.4	Análisis de ciclo de vida (ACV) de las alternativas de tratamiento del efluente industrial para recupera agua	67

3.4.1	Límites e inventario de los sistemas de estudio (alternativas de tratamiento)	67
3.4.2	Inventario del Ciclo de Vida (ICV)	70
3.4.3	Impactos ambientales de la operatividad de las alternativas de tratamiento	73
3.4.3.1	Impactos de punto medio (midpoint)	73
3.4.4	Impactos ambientales de punto final (Endpoint)	77
3.4.5	Análisis de sensibilidad de la operatividad de las alternativas de tratamiento.....	78
3.5	Gestión de residuos. Monitoreo y Mitigación	82
3.6	Obtención de una propuesta sostenible de tratamiento del efluente industrial para recuperar agua	84
4.	CONCLUSIONES	89
5.	REFERENCIAS	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Aplicaciones de tratamientos de membranas en la recuperación de agua en efluentes industriales	2
Tabla 1.2 Procesos para desalinizar agua.....	7
Tabla 1.3 POA's usados en tratamientos de efluentes	9
Tabla 1.4 Datos de escalamiento para el diseño de un proceso de ultrafiltración .	22
Tabla 1.5 Clasificación de impactos ambientales	23
Tabla 1.6 Criterios de magnitud del impacto ambiental	25
Tabla 1.7 Criterios de magnitud del impacto ambiental	25
Tabla 1.8 Calificación de criterios del impacto ambiental	26
Tabla 1.9 Calificación de criterios de límites de referencia en condiciones normales	26
Tabla 1.10 Calificación de criterios de extensión en condiciones de emergencia .	26
Tabla 1.11 Calificación de los criterios de sensibilidad al medio en condiciones normales.....	27
Tabla 1.12 Calificación de criterios de probabilidad/frecuencia en condiciones de emergencia.....	27
Tabla 1.13 Calificación de criterios de peligrosidad en condiciones de emergencia	28
Tabla 1.14 Calificación de criterios de sensibilidad al medio en situaciones de emergencia.....	28
Tabla 1.15 Impacto ambiental de acuerdo con índice R.....	29
Tabla 1.16 Investigaciones sobre Análisis de Ciclo de Vida para la recuperación de agua reportadas en la literatura.....	32
Tabla 2.1 Características fisicoquímicas del efluente industrial (Hernández et al., 2022)	35
Tabla 2.2 Procedimiento de las pruebas del bioensayo de toxicidad con semillas de lechuga (<i>Lactuca Sativa</i>)	37
Tabla 3.1 Características del agua recuperada por cada alternativa del tratamiento del efluente industrial.....	46

Tabla 3.2 Alternativas de tratamiento propuestas para recuperar agua a partir del tratamiento de un efluente industrial.....	47
Tabla 3.3 Escalamiento de equipos a nivel industrial para los procesos de las alternativas propuestas	48
Tabla 3.4 Características técnicas de los equipos requeridos para el proceso de recuperación de agua.....	49
Tabla 3.5 Superficie requerida para la instalación y operación de los procesos para recuperar agua de cada alternativa	49
Tabla 3.6 Evaluación de la factibilidad técnica por alternativa.....	50
Tabla 3.7 Precios de las unidades requeridas para el proceso de recuperación de agua para cada alternativa	54
Tabla 3.8 Costos anuales que gasta la industria por consumo de agua potable y generación de 250 m ³ /día.....	55
Tabla 3.9 Factibilidad económica de las alternativas de tratamiento.....	60
Tabla 3.10 Matriz causa-efecto y magnitudes de los posibles efectos esperados durante la operación del tratamiento para recuperar agua del efluente industrial	62
Tabla 3.11 Matriz causa-efecto y magnitudes de los efectos esperados durante la operación del tratamiento para recuperar agua del efluente industrial. Alternativa 2	63
Tabla 3.12 Matriz causa-efecto y magnitudes de los efectos esperados durante la operación del tratamiento para recuperar agua del efluente industrial. Alternativa 3	64
Tabla 3.13 Matriz causa-efecto y magnitudes de los efectos esperados durante la operación del tratamiento para recuperar agua por evaporación del efluente industrial. Alternativa 4.....	65
Tabla 3.14 Evaluación de la factibilidad ambiental en las cuatro alternativas para la recuperación de agua (metodología lhobe).....	66
Tabla 3.15 Límites del sistema. Entradas y salidas por alternativa propuesta	68
Tabla 3.16 Inventario del Ciclo de Vida para los procesos de cada alternativa para recuperar agua. UF 1m ³ de efluente tratado.....	71

Tabla 3.17 Categorías de impacto (midpoint) por alternativas basado en la unidad funcional (1 m ³)	75
Tabla 3.18 Impactos ambientales en la categoría de daño (endpoint) para las alternativas propuestas, con base a la unidad funcional	77
Tabla 3.19 Impactos ambientales en la categoría de daño (endpoint) para las alternativas propuestas asociados a los insumos.....	78
Tabla 3.20 Categorías de impacto midpoint para las alternativas actuales que incluyan consumo de electricidad proveniente de energía renovable fotovoltaica.	79
Tabla 3.21 Evaluación de sostenibilidad de acuerdo con la factibilidad técnica, ambiental y económica de las cuatro alternativas	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Partes que componen el estudio de factibilidad técnico	15
Figura 1.2 Estructura del análisis económico	17
Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología de investigación	34
Figura 2.2 Morfología de la semilla y plántula de lechuga Lactuca Sativa.	38
Figura 2.3 Procedimiento general de prueba de toxicidad con semillas de lechuga Lactuca Sativa.	39
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la distribución de los equipos utilizados en el tratamiento para recuperar agua de un efluente industrial	51
Figura 3.2 Diagrama de flujo de la distribución de los equipos requeridos en el tratamiento de recuperación de agua del efluente industrial. Alternativa 2	52
Figura 3.3 Diagrama de flujo de la distribución de los equipos requeridos en el tratamiento de recuperación de agua del efluente industrial. Alternativa 3.	52
Figura 3.4 Diagrama de flujo de la distribución del equipo de evaporación de triple efecto para la recuperación de agua del efluente industrial. Alternativa 4.	53
Figura 3.5 Límites del sistema de las 4 alternativas de los tratamientos propuestos para recuperar agua del efluente industrial alimentario	69
Figura 3.6. Distribución porcentual de la contribución ambiental de las categorías de impacto (midpoint) para las alternativas propuestas	74
Figura 3.7 Análisis de sensibilidad, efecto de energía fotovoltaica en la categoría de impactos ambientales en las cuatro alternativas propuestas.	79

INTRODUCCIÓN

La escasez de agua es uno de los problemas actuales con mayor interés en el mundo; dado que el crecimiento poblacional continúa y el uso del agua es cada vez más demandado, se sobreexplota el recurso hídrico agudizando este problema, por lo que en pocos años ya no se tendrá agua potable disponible.

Dentro de las alternativas para mitigar la escasez de agua en la industria se encuentra el tratamiento de sus efluentes, no solo con el fin de cumplir cierta normativa para su descarga en alcantarillado, sino para recuperar agua con calidad de agua potable y asegurar su reúso en actividades de mayor consumo. Sin embargo, el éxito del sistema de tratamiento para obtener agua potable depende de factores, como las especies contaminantes, espacio disponible para la colocación del proceso de tratamiento y la demanda del reúso del agua, por lo que es necesario un estudio amplio del problema para diseñar adecuadamente el sistema.

La presente investigación tiene como objetivo determinar una propuesta sostenible de tratamiento de un efluente proveniente de una industria de manufactura de aditivos alimenticios localizada en el Estado de México para recuperar agua de reúso como agua potable. Actualmente se han estudiado 4 sistemas de tratamiento que cumplen con dicho propósito; sin embargo, se requiere valorar la sostenibilidad de cada uno para seleccionar el más adecuado para su implementación a nivel industrial.

El enfoque de la sostenibilidad se basa en estudios de factibilidad de los 4 sistemas de tratamiento, incluyendo: a) Técnica, involucra el diseño de ingeniería y funcionamiento del sistema de tratamiento, integración, obtención de calidad del agua, normatividad aplicable y área requerida para implementación y operación del sistema. b) Económica, determinando costos de implementación y operación de los sistemas de tratamiento. c) Ambiental. Evaluando los impactos ambientales mediante una matriz que incluye diferentes factores de incidencia y un análisis de ciclo de vida ACV.

El presente trabajo consta de cuatro capítulos. El capítulo 1 presenta los fundamentos sobre efluentes industriales generados por el sector alimentario, los

procesos utilizados para tratarlos y los estudios de factibilidad para la recuperación de agua. El capítulo 2 muestra la metodología de los procesos utilizados para la recuperación de agua, asimismo, el análisis de la factibilidad de cada alternativa estudiada. En el capítulo 3 se muestran los resultados y discusión de resultados obtenidos en cada uno de los tratamientos utilizados en la recuperación de agua comparando los resultados de cada alternativa comparando la sostenibilidad de cada una, así como su análisis de ciclo de vida para la toma de decisiones. Finalmente, el capítulo 4 describe las conclusiones a las que se llegó después de la realización de la presente investigación, describiendo cuál alternativa estudiada resultó ser la más sostenible.

1. FUNDAMENTOS

1.1 Efluentes industriales del sector alimentario

El grado de contaminación de los efluentes industriales del sector alimentario varía dependiendo de la actividad. Sin embargo, se caracterizan porque contienen en menor o mayor grado compuestos orgánicos como proteínas, sales, grasas y colorantes e inorgánicos compuestos principalmente por sales (UN-Water, 2017).

Por esta razón, los efluentes son tratados generalmente en conjunto con el agua residual doméstica en plantas convencionales que incluyen procesos físicos, y biológicos. Sin embargo, la mayoría de las plantas convencionales fueron diseñadas para verter el agua tratada al alcantarillado; por tanto, se pierde el recurso. Actualmente, en estudios de recuperación de agua se recomienda no mezclar los efluentes, a fin de no añadir más contaminantes y aplicar tratamientos dirigidos para descontaminar el agua y obtener las características de agua potable para su recuperación y reúso (Hernández et al. 2022).

1.1 Procesos de tratamiento para recuperación de agua a partir de tratamiento de efluentes industriales

Los avances tecnológicos en el tratamiento de efluentes industriales han ido en aumento con el tiempo, y el enfoque de tratamiento ha cambiado en los últimos años, pasando del tratamiento y vertido a recuperarlas, reutilizarlas, reciclarlas y recuperar recursos.

En la actualidad, la industria y las plantas tratadoras de agua residual presentan un desafío que les permita producir agua de alta calidad para ser reutilizada en diversos fines y la recuperación de productos, lo cual, desde el punto de vista económico,

permite una relación costo-beneficio, además de que sean autosuficientes con el consumo de energía (UN-Water, 2017).

Existen varias técnicas o procesos para tratar efluentes provenientes de la industria, los cuales son clasificados en tratamientos físicos, químicos y biológicos. La elección del proceso y la inclusión de las operaciones unitarias dependen de las características que presenta el efluente, el grado de recuperación de agua y su calidad para reúso.

Varias investigaciones reportadas en la literatura han demostrado que el uso de tecnología de membranas de separación ha sido muy eficiente para recuperar agua de alta calidad de efluentes contaminados; la tabla 1.1 muestra algunas aplicaciones de tratamiento de efluentes con membranas para recuperar agua.

Tabla 1.1 Aplicaciones de tratamientos de membranas en la recuperación de agua en efluentes industriales

Proceso	Efluente	Características del efluente	Resultados	Referencia
Primer tratamiento Filtro biológico-MF-OI-IR Na ⁺ OI (4m ³ /h, 15 bar, 37 m ² , 18 L/m ² h) Segundo tratamiento (Recuperación de agua del rechazo de la OI) Cristalización-O ₃ (250 mgO ₃ /L) .Filtro biológico-Ozonación catalítica (H ₂ O ₂ 30%)- Filtro biológico-UF (3 bar, 65 L/m ² h)	Efluente proveniente de un parque industrial químico	Efluente con alto contenido de dureza y salinidad (CaSO ₄ , MgSO ₄ , CaCO ₃ y MgCO ₃), SDT y contaminantes orgánicos no degradables como surfactantes y halógenos	De los tratamientos se recuperó agua que cumple parcialmente con los requerimientos normativos (GB3838-2002, China), el uso del cristalizador ahorra un 57.04% de los costos de operación comparado con un proceso suavizador, recuperando CaSO ₄ •2H ₂ O Este proyecto le permite al parque industrial crear un camino sustentable ambientalmente	(Liu et al., 2023)
OI (membrana comercial TG-138)-Ozonación catalítica (concentración de 5 mgO ₃ /L, dosis de catalizador 0.5g/L de Cu/Fe/Ce-CAC, 10 mg/L de H ₂ O ₂ al 30%)	Efluente pretratado proveniente de una tratadora de agua residual de un parque industrial	Efluente con colorantes de impresión y textil, con alto contenido de materia orgánica refractaria	Con la aplicación del tratamiento combinado, se logró tratar el agua para su descarga en cuerpos de agua con un bajo riesgo ecológico	(Cui et al., 2023)

Proceso	Efluente	Características del efluente	Resultados	Referencia
Dos esquemas con inversa (OI) Osmosis directa (OD) Concentrador de sólidos (DS) 1er esquema OI-OD-DS 2do esquema el efluente se divide y pasa por OI y OD-DS Flujo promedio de 28.5 L/m ² h y 23.5 L/m ² h	Efluente salino sintético con KCl y diferentes concentraciones de MgCl ₂ •6H ₂ O (0.5, 1, 1.5 y 2 M)	Efluente con 9200 ppm de SDT	1er esquema 45%, 10 m ³ /día y 450 ppm de SDT de recuperación de agua y 97 %, 12m ³ /día y 16500 ppm 2do esquema 75%, 10 m ³ /día y 244 ppm de SDT de recuperación de agua y 98 %, 3.3 m ³ /día y 16000 ppm	(Sewilam & Al Bazedl, 2023)
Esquema continuo AnMBR Coagulación-floculación (Al ₂ (SO ₄) ₃ y semillas de moringa oleífera) NF-OI	Agua proveniente de una planta de producción de caña de azúcar	Agua proveniente de AnMBR contiene alta carga de sales, color y metales pesados (Cd, Cr, Cu y Zn)	CF con Al ₂ (SO ₄) ₃ eliminó 88% de color y 90% de turbidez con Moringa oleífera eliminó hasta el 71% de color y 77% de turbidez y 60% de retención de metales pesados. NF, removi6 más del 90% de metales pesados y color especialmente Cr, Cu, Zn y Cd. OI, eliminó más del 95% de todos los parámetros analizados, incluyendo iones monovalentes, metales pesados, color y materia orgánica. El agua tratada cumple con normas internacionales para descarga y reúso.	(Sawadogo et al., 2024)

La tecnología de las membranas de separación está basada en la permeabilidad selectiva, la cual es determinada por la diferencia en la tasa de flujo y sus componentes que pasan a través de la membrana. La tasa de permeación es determinada por la estructura de la membrana, el tamaño del componente permeable, la naturaleza química y la carga eléctrica del material de la membrana y la fuerza motriz debida al gradiente de potencial químico o electroquímico (Ranade & Bhandari, 2014).

Los diferentes tipos de estructuras y la fuerza motriz de las membranas se dividen en dos grupos:

- Convencionales: Osmosis inversa, Nanofiltración, Ultrafiltración y Microfiltración

- Desarrollos recientes: Pervaporación, Destilación de membrana, Diálisis / electrodialisis, Membranas líquidas de emulsión, MBR, Sistemas de membranas híbridas

Algunas de las ventajas que presenta el uso de membranas en el tratamiento de aguas residuales son: los procesos son más eficientes energéticamente, son simples de reparar, se obtienen productos de alta calidad, durante el proceso no se utilizan químicos dañinos que requieran un paso adicional para quitarlos y no se genera calor.

Sin embargo, el uso de membranas también presenta algunas limitaciones tales como; la fiabilidad a largo plazo no ha sido probada, a veces requiere pretratamiento excesivo debido a la sensibilidad de la concentración de polarización, la interacción química con los componentes del agua y las membranas mecánicamente no son muy robustas y pueden fácilmente ser destruidas por un malfuncionamiento en los procesos de operación.

1.1.1 Procesos de membranas convencionales

La osmosis es un proceso químico en el cual dos soluciones a diferentes concentraciones se equilibran cuando el flujo de agua pasa a través de la membrana desde la más diluida hasta la más concentrada, y su movimiento se rige por la presión osmótica, si en el proceso se hace pasar agua a través de la membrana desde la parte más concentrada hacia la más diluida con una presión mayor que la presión osmótica, entonces se produce la operación de osmosis inversa (OI).

El uso de esta tecnología en el tratamiento de agua ayuda a eliminar bacterias, protozoos, algas, virus, materia orgánica disuelta, iones divalentes y monovalentes. Las membranas de osmosis inversa usualmente están hechas con materiales derivados de celulosa y poliamida (Grueso-Domínguez et al., 2019).

La nanofiltración (NF) es una tecnología de membrana que separa moléculas del tamaño de 200 a 2000 Da; la diferencia entre la membrana de ósmosis inversa (OI) y la nanofiltración es que esta última no retiene especies monovalentes como el sodio y cloro. La presión de trabajo de esta membrana es intermedia entre 5 y 40 bar y su funcionamiento se da en dos formas de separación: 1) rechazo estérico, es decir, depende del tamaño y forma de los poros y de lo que se requiere eliminar del agua, y 2) rechazo electrostático; es decir, por la carga negativa de la superficie de la membrana con un pH neutro (Calderón-Mólgora et al., 2012).

Los materiales para la fabricación de las membranas de nanofiltración son comúnmente derivados de celulosa y poliamida, su configuración es una forma de espiral enrollada o en fibra hueca, y son ampliamente utilizadas en el tratamiento de aguas subterráneas o fuentes superficiales (Grueso-Domínguez et al., 2019).

La ultrafiltración es una tecnología de separación por membrana, la cual separa, purifica y concentra soluciones entre micro y nanofiltración. Esta tecnología intercepta moléculas de pesos moleculares entre 2000 y 500000 Da, con un diámetro de poro aproximado de 0.001 a 0.1 μm , opera a una presión diferencial de 0.1 a 0.8 MPa y el diámetro de separación de componentes es aproximadamente de 0.005 a 10 μm .

El proceso funciona con la diferencia de presiones en los dos lados de la membrana. Usando la membrana de filtración como medio filtrante y bajo el impulso de la presión estática, el agua fluye a través de la superficie de la membrana, el cual permite pasar agua, sales inorgánicas y sustancias de peso molecular pequeño, mientras que las moléculas con peso molecular más grande, tales como sólidos suspendidos, coloides, proteínas y microorganismos, se quedan atrapados en el lado de alta presión, alcanzando de esta forma la purificación, separación y concentración de la solución (Xiangmin et al., 2018).

La aplicación y uso de la tecnología de ultrafiltración en la industria es variada, utilizando las membranas en el tratamiento de agua se pueden separar moléculas

que no se removieron en tratamientos previos, obteniendo de esta forma agua purificada de alta calidad para ser reutilizada.

1.1.2 Procesos integrados de membranas

Los procesos integrados de membrana son sistemas híbridos que contienen varias operaciones de separación convencionales o no convencionales y que incluyen al menos un proceso de membrana, o se integran por procesos que incluyen varias membranas selectivas para llevar a cabo separaciones consecutivas. Entre las operaciones convencionales que integran los procesos de membrana se encuentran la floculación/coagulación, sedimentación, filtración, adsorción e intercambio iónico; una o más de estas operaciones se utilizan como etapas previas a la tecnología de ósmosis inversa, la cual se utiliza como última etapa para recuperar el agua y es generalmente considerada etapa de desalación.

Las operaciones previas se diseñan para incrementar la eficiencia de la ósmosis inversa, mitigando el ensuciamiento (fouling) y la calidad del agua recuperada. También, como etapas previas a la ósmosis inversa, se pueden integrar tecnologías de membrana como la microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración para el mismo fin.

Las ventajas que ofrece este tipo de procesos son la alta productividad en términos de flujos permeados, ausencia de una fase de transición, condiciones fáciles de operar y alta selectividad para macro y microsolutos. Sin embargo, las operaciones previas a las membranas son muy importantes para que un proceso de membrana sea eficiente porque se debe mitigar el ensuciamiento de las membranas (fouling). Entre los compuestos recuperados utilizando procesos integrados de membranas se encuentran los polifenoles, carbohidratos (azúcares), antocianinas, proteínas y pectinas (Castro-Muñoz et al., 2017).

1.1.3 Desalinización de agua

Uno de los problemas actuales que presenta la población es el abastecimiento de agua, ya que el agua dulce que se encuentra disponible se tiene que dividir en diferentes actividades como lo son: actividades humanas, procesos industriales, producción agrícola, ganadera, entre otras, lo que origina desabasto del vital líquido.

Debido a esta problemática, se han buscado alternativas que ayuden a mitigar la escasez de agua; una de las alternativas importantes es la desalinización de agua. Esta tecnología consiste en un proceso de separación de sales disueltas de agua salobre o de mar para convertirlas en agua adecuada para consumo humano, industrial o de riego (Dévora Isidora et al., 2012).

La tecnología desarrollada para separar sales o contaminantes de agua se basa principalmente en separar sales del agua y separar agua de las sales dependiendo del proceso utilizado. La tabla 1.3, muestra la clasificación de los procesos de desalinización de agua.

Tabla 1.2 Procesos para desalinizar agua

Tipo de separación	Energía utilizada	Fase	Proceso
Separación de agua de sales	Vapor	Evaporación	Destilación solar Destilación súbita simple Destilación en tubos sumergidos Destilación súbita multietapa Destilación multiefecto de tubos horizontales Destilación multiefecto de tubos verticales Compresión mecánica de vapor
	Frío	Cristalización	Formación de hidratos Congelación
Separación de sales del agua	Presión	Membrana	Ósmosis inversa
	Carga eléctrica	Membrana selectiva	Electrodialisis
	Atracción química	Resina	Intercambio iónico

Entre los procesos más comunes para desalinizar agua se encuentran los procesos de membranas y los procesos térmicos. Los procesos térmicos involucran la transformación física de las moléculas de agua de líquido a vapor (evaporación) y a su vez condensando el vapor usando calor (Dévora-Isiordia et al., 2016; Elsaie et al., 2022).

Destilación Flash multietapas (MFS). En este proceso el agua de mar es bombeada y calentada en múltiples etapas a través de tubos intercambiadores de calor. El punto de ebullición es directamente proporcional a la presión aplicada. En este método la evaporación y condensación ocurren a través de la ebullición de agua de mar y la condensación del vapor generando agua destilada. En este proceso se produce agua de alta calidad con menos de 30 ppm de sólidos disueltos totales.

Destilación multiefectos (MED). Este proceso es una de las tecnologías más exitosas en la desalinización de agua, el proceso consiste en una serie de evaporadores que producen agua destilada, con calor administrado de una corriente externa, la energía utilizada para la desalinización (MED) es de 6.5 – 11 kWh/m³ menos que la requerida en la MSF.

Destilación por compresión mecánica de vapor (MVC). Estos sistemas funcionan comprimiendo vapor de agua provocando la condensación sobre una superficie de transferencia de calor, permitiendo que el calor de la condensación sea transferido a la salmuera al otro lado de la superficie resultando la evaporación del agua.

Dentro de los procesos de desalinización de agua con sistemas de membrana de separación se encuentran la ósmosis inversa y la electrodiálisis, estos procesos involucran la separación de agua fresca de sales u otros contaminantes aplicando altas presiones sin presentar cambios físicos en el agua (Isah et al., 2022). Separa el agua salina en dos corrientes, una corriente de agua potable con baja concentración de sales y una corriente de salmuera concentrada.

Electrodiálisis (ED). Es un proceso de separación electroquímico en donde los iones son transferidos a través de membranas de intercambio iónico a través de un campo

de corriente continua, las sales disueltas ionizadas pasan por la membrana eliminando las partículas cargadas eléctricamente (Rashidi et al., 2022; Dévora-Isiordia et al., 2016; Isah et al., 2022).

1.2 Procesos de oxidación avanzada POA's

Los procesos de oxidación avanzada (POAs) son procesos que involucran la generación de especies con alto poder oxidante, principalmente el radical hidróxilo ($\text{OH}\cdot$) con 2.80 V de potencial redox que ayudan a degradar contaminantes, incluyendo sustancias tóxicas, compuestos orgánicos, inorgánicos, metales y patógenos.

Los POAs se utilizan cuando los efluentes están formados por una alta estabilidad química o una baja biodegradabilidad (López Ramírez et al., 2021). Los radicales hidroxilos son generados in situ por la aplicación de los agentes oxidantes; por su combinación entre ellos, son especies no selectivas actuando directamente con el contaminante orgánico hasta su completa mineralización (H_2O , CO_2 e inorgánicos). Los POAs se dividen en químicos, fotoquímicos y electroquímicos; en la tabla 1.3 se muestran algunos ejemplos de POAs usados en el tratamiento de efluentes (Titchou et al., 2021).

Tabla 1.3 POA's usados en tratamientos de efluentes

Proceso	POA's
Químico	Ozonación, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$)
Fotoquímico	Ultravioleta (UV), O_3/UV Fotoperoxidación ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$) $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3/\text{UV}$, Fenton/UV Electro Fenton /UV
Electroquímico	Oxidación anódica Electro Fenton Perox-coagulación Fenton-Anódico

1.2.1 Ozono (O_3)

El ozono es un gas incoloro y de olor fuerte, es ampliamente usado en tratamiento de efluentes por su alto poder oxidante (2.08 V), es implementado para tratamientos de contaminantes en agua residual sin generar residuos, el ozono es más soluble que el oxígeno en agua y es usado para degradar compuestos orgánicos que causan olor, sabor, color, para fines de desinfección y para degradar compuestos persistentes.

Debido al corto tiempo de vida, el ozono no puede ser almacenado, por lo que se tiene que generar in situ en un generador de ozono. Se produce a partir de oxígeno por diferentes métodos: a) descarga eléctrica (proceso de descarga de corona), b) fotoquímico por UV, c) químico y d) métodos electroquímicos (Collin et al., 2021).

El ozono es eficiente al reaccionar con un gran número de compuestos orgánicos e inorgánicos, dicha reactividad se da por dos mecanismos, la vía molecular el cual es un proceso lento y selectivo donde el ozono reacciona directamente con los compuestos orgánicos e inorgánicos y la vía indirecta en el cual el ozono molecular se descompone en el agua generando radicales hidroxilos (Cruz-González et al., 2017).

Oxidación directa de los compuestos con ozono molecular. El ozono molecular reacciona directamente con los contaminantes de acuerdo con 4 categorías metálicas (Rekhate & Sirvastava, 2020):

1. Oxidación: provocando una reacción de reducción entre el O_3 y HO_2^- o O_2^- , a través de transferencia de electrones.
2. Reacción de cicloadición: formando un anillo en la estructura del ozono con cinco miembros.
3. Agente electrofílico: puede atacar la posición nucleofílica de las sustancias orgánicas y el grupo de compuestos aromáticos.

4. Propiedades nucleofílicas: las reacciones nucleofílicas ocurren especialmente con moléculas cuando los compuestos contienen carbonilos o enlaces dobles o triples con nitrógeno.

1.2.2 Carbón Activado como catalizador en la ozonación

Recientemente, el carbón activado se ha convertido en un material clave en la catálisis heterogénea, como soporte para catálisis o como catalizador, modificando la actividad y selectividad de la reacción catalítica.

La ozonación catalítica se clasifica tanto en catálisis homogénea como en catálisis heterogénea de acuerdo con la solubilidad del agua o del catalizador. La catálisis heterogénea tiene ventajas sobre la homogénea ya que el material usado como catalizadores (óxidos metálicos o materiales basados en carbón) es más estable y eficiente. La eficiencia de la catálisis heterogénea depende de la solución del pH, la estructura química de la solución y las características del catalizador como el área superficial, volumen del poro, porosidad, entre otros (Joseph et al., 2021).

De los materiales más estudiados como catalizadores heterogéneos están el óxido de manganeso (MnO_2), óxidos de aluminio (Al_2O_3), óxidos de titanio (TiO_2), óxidos de zinc (ZnO), óxidos de hierro (Fe_2O_3) y algunos materiales porosos. El carbón activado ha sido estudiado recientemente como catalizador mostrando más tiempo de actividad catalítica, siendo un material con aplicaciones en tratamiento de aguas residuales para degradar compuestos persistentes, contaminantes orgánicos como fenoles, pesticidas, colorantes, farmacéuticos, etc.

Los mecanismos que se lleva a cabo en la ozonación catalítica con carbón activado para la degradación de contaminantes son los siguientes:

- 1) Mecanismo de $\text{HO}\cdot$. El ozono se adsorbe en la superficie del catalizador descomponiéndose en radicales hidroxilos

- 2) Mecanismo de reacción interfacial. Las moléculas orgánicas son adsorbidas en la superficie del catalizador y son atacadas por moléculas de ozono para llevar a cabo la oxidación.
- 3) Ozono y moléculas orgánicas son adsorbidas en la superficie del catalizador y reaccionan al mismo tiempo.

Por otro lado, la investigación de materiales porosos (como carbón activado) como catalizadores ha sido desarrollada como soporte para mejorar la fuerza mecánica y la estabilidad en la transición de los óxidos metálicos (Rekhate & Sirvastava, 2020).

El uso de catalizadores presenta varias ventajas, como la disminución de la temperatura de operación y reducción de costos, además de ser aptos para tratar contaminantes más diluidos. Dentro de las desventajas en la implementación de la catálisis heterogénea está que el catalizador debe ser estable bajo largos tiempos de operación, además de que el catalizador no presente desprendimiento de los componentes activos. El carbón activado presenta varias ventajas, es barato y estable, ha sido usado como soporte en catalizadores de metales nobles.

1.3 Procesos sostenibles de tratamiento de efluentes

Los procesos químicos industriales sostenibles son el conjunto de etapas que a su vez son actividades unitarias que hacen posible la transformación de la materia prima e insumos en productos, subproductos, residuos y desechos; usando racionalmente la energía y teniendo en cuenta en cada etapa las condiciones de operación que hagan posibles procesos eficientes.

Los procesos industriales contribuyen al desarrollo sostenible, el cual está orientado a garantizar la satisfacción de las necesidades fundamentales de la población y elevar su calidad de vida, a través del manejo racional de los recursos naturales, propiciando su conversión, recuperación, mejoramiento y uso adecuado, de tal manera que esta generación y la futura tengan la posibilidad de utilizarlos y

disfrutarlos, sobre bases éticas y de equidad, garantizando la vida en todas sus manifestaciones (Loayza Pérez & Silva Meza, 2013).

Los principios del diseño de procesos industriales sostenibles tienen que conjugar aspectos relacionados al diseño de procesos, minimizando el impacto ambiental. El diseño sostenible se basa en el diseño tradicional de la ingeniería química apoyándose en disciplinas como la química y la ingeniería verde, el diseño integrado de la cuna a la cuna, la ecología industrial y la biomimética, los cuales permiten crear un marco de referencia para el desarrollo de productos, procesos y sistemas de producción donde los componentes no sean peligrosos, generen un estado de bienestar, respeten los ciclos de vida de los productos e imiten a los sistemas naturales.

La química verde tuvo sus orígenes en la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos de América a principios de 1990 y fue propuesta por Paul T. Anastas y John C. Warner, como un enfoque y una herramienta conceptual para la protección del medio ambiente ante la contaminación originada por la industria química y se refiere al diseño de productos y procesos químicos que reducen o eliminan el uso y generación de sustancias peligrosas (Mestres, 2013).

La ingeniería verde, a su vez, se desarrolló como una extensión de la química verde con un alcance mayor. David Allen y David Shonnard la definen como el diseño, comercialización y uso de procesos y productos, los cuales son técnica y económicamente viables a la vez que minimizan la generación de contaminación, así como el riesgo a la salud y el ambiente. Por otro lado, la ecología industrial plantea una analogía entre los sistemas ecológicos naturales y la comunidad de plantas industriales, la biomimética consiste en la aplicación de diseños naturales para resolver problemas de ingeniería, ciencia de materiales, medicina y otros campos.

La producción más limpia (PML) tiene la finalidad de contribuir al desarrollo sostenible, se define como una estrategia ambiental preventiva e integrada, enfocada hacia procesos productivos, productos y servicios con la finalidad de

reducir costos, incentivar innovaciones y disminuir los riesgos relevantes al ser humano y al ambiente.

El objetivo principal de los procesos industriales sostenibles es minimizar el flujo de productos químicos que se vierten en el medio ambiente, incluidos los gases de efecto invernadero en todo tipo de actividad industrial basada en conversiones químicas sin generar residuos peligrosos.

1.4 Evaluación de la factibilidad del proyecto de inversión

Para que un proyecto sea viable, se deben evaluar aspectos que demuestren la necesidad de llevar a cabo el proyecto y el grado de aceptación que se tiene entre todos los actores involucrados y garantizar la disponibilidad de todos los recursos físicos, humanos y económicos necesarios para obtener un proyecto de calidad cumpliendo con los objetivos planteados.

La factibilidad del proyecto de inversión se cumple analizando los siguientes aspectos:

- a) Factibilidad técnica
- b) Factibilidad ambiental
- c) Factibilidad económico-financiera

En la factibilidad técnica es necesario asegurarse de que los recursos humanos, materiales y de maquinaria estén disponibles para llevar a cabo el proyecto y se combinen siguiendo procedimientos que, al aplicarlos al contexto específico en el que operará el proyecto, den como resultado el producto deseado.

La factibilidad ambiental se refiere a la posibilidad de desarrollar un proyecto de modo que el daño ambiental sea el mínimo proponiendo medidas que minimicen o compensen los perjuicios causados.

La factibilidad económico-financiera se refiere a la consecución, recuperación, administración e inversión de los recursos monetarios y su análisis varía dependiendo de si es un proyecto público o privado. La factibilidad económica verifica el rendimiento del proyecto desde el punto de vista económico y social, mientras que la factibilidad financiera se encarga de evaluar la disponibilidad de los recursos monetarios y la forma de conseguirlos (Agudelo Ospinosa, 2021).

1.4.1 Factibilidad técnica

El estudio de factibilidad trata de resolver las preguntas dónde, cuánto, cuándo, cómo y con qué producir lo que se desea. El aspecto técnico-operativo de un proyecto comprende todo aquello que tenga relación con el funcionamiento y la operatividad de este. La figura 1.1 muestra las partes que componen el estudio técnico (Urbina Baca, 2010) .

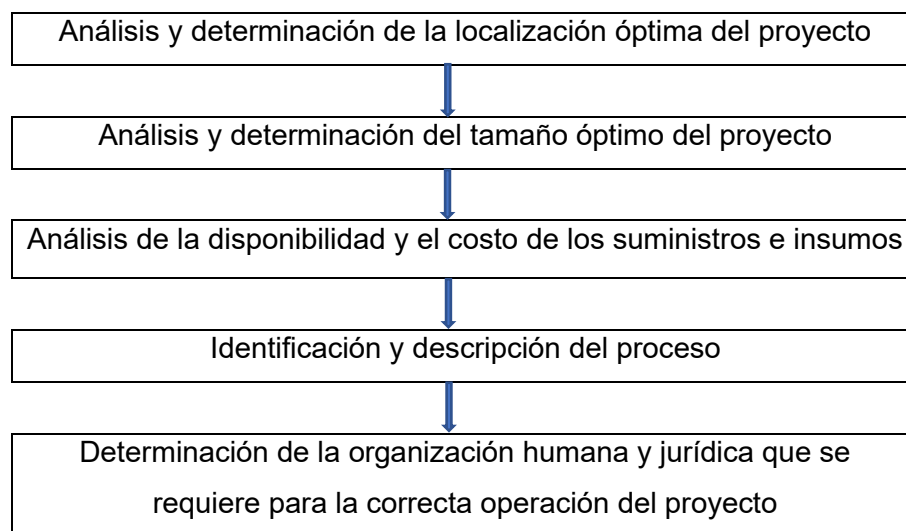


Figura 1.1 Partes que componen el estudio de factibilidad técnico

Para determinar el tamaño óptimo de la planta, es necesario conocer con mayor precisión tiempos y movimientos del proceso; además, existen diferentes

indicadores indirectos, como el monto de la inversión, mano de obra o cualquier otro aspecto económico.

El objetivo general de la localización óptima del proyecto es llegar a determinar el sitio donde se instalará la planta, entre los factores que se pueden considerar para realizar la evaluación del sitio se encuentran los siguientes: factores geográficos, factores institucionales, factores sociales que se relacionan con la adaptación del proyecto al ambiente y a la comunidad.

La determinación del tamaño óptimo del proyecto tiene como objetivo resolver todo lo concerniente a la instalación y al funcionamiento de la planta, desde la descripción del proceso, adquisición de equipos y maquinaria hasta definir la estructura jurídica y de organización que tendrá la planta. La administración del proceso implica definir cada uno de los procesos que suceden a lo largo de la cadena de suministro.

1.4.2 Factibilidad económica financiera

El estudio o análisis económico en la evaluación de proyectos, consiste en expresar en términos monetarios todas las determinaciones hechas en el estudio técnico en términos de cantidad de materia prima, desechos del proceso, mano de obra directa e indirecta, personal administrativo, número y capacidad de equipo y maquinaria necesaria para el proceso, que deben aparecer en forma de inversión y gastos (Urbina Baca, 2010). La figura 2, muestra la estructura general del análisis económico.

Para realizar la evaluación financiera se tienen que analizar varios aspectos para llegar a un balance general y tomar decisiones, dichos aspectos se muestran a continuación.

- a) Costos de producción. Son un reflejo de las determinaciones realizadas en el estudio técnico. Los costos de producción se determinan con base en lo siguiente: costo de materia prima, costo de mano de obra, costo de energía

eléctrica, costos de agua, combustible, control de calidad, mantenimiento, costos de depreciación y amortización, costos de impacto ambiental y otros costos.

- b) Costos de administración. Son los costos que provienen de realizar la función administrativa en la empresa.
- c) Costos de ventas
- d) Costos financieros. Son los intereses que se deben pagar en relación con capitales obtenidos en préstamos.
- e) Inversión total inicial: fija y diferida. Comprende la adquisición de todos los activos fijos o tangibles y diferidos o intangibles.
- f) Depreciaciones y amortizaciones. La depreciación tiene la misma connotación que amortización, sólo que el primero se aplica al activo fijo, ya que con el uso los bienes valen menos, se deprecian, la amortización se aplica a los activos diferidos o intangibles, se hace un cargo anual para recuperar la inversión.
- g) Capital de trabajo. Se define como la diferencia aritmética entre el activo y el pasivo circulantes.

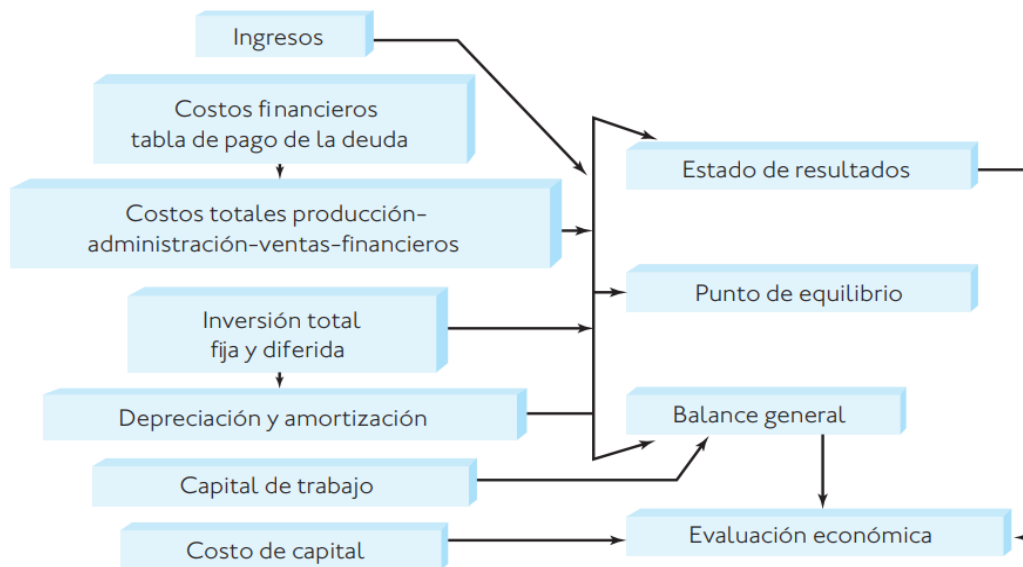


Figura 1.2 Estructura del análisis económico

Como parte de la metodología de proyectos, se debe calcular la rentabilidad de las inversiones en términos de indicadores, los indicadores financieros que se utilizan

para evaluar la calidad de las utilidades generadas en el proyecto de inversión son las siguientes: la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR), el valor presente neto (VPN), el periodo de recuperación de la inversión (PRI) y la tasa interna de rendimiento (TIR), es decir, todas las cifras monetarias que se obtuvieron en el análisis económico del proyecto se deben transformar en índices de rentabilidad económica. Las cifras necesarias para calcular estos índices son la inversión inicial, la depreciación, los flujos netos de efectivo y algunos datos del financiamiento.

Se deben tomar en cuenta tres elementos a la hora de realizar los cálculos, el cambio del valor del dinero a través del tiempo, la inflación y la tasa de interés de los financiamientos que la empresa haya solicitado.

La tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR) es la tasa que representa una medida de rentabilidad, la mínima que se le exigirá al proyecto de tal manera que permita cubrir la totalidad de la inversión, los egresos de operación, los intereses que deberán pagarse por aquella parte de la inversión financiada con capital ajeno a los inversionistas del proyecto, los impuestos y la rentabilidad que la inversión exige a su propio capital invertido.

Para calcular la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR) se necesita tomar en cuenta la inflación y el premio al riesgo calculándose de la siguiente manera:

$$TMAR = i + f + if \quad (2)$$

Donde;

i = premio al riesgo

f = inflación

El premio al riesgo se considera como la tasa de crecimiento real del dinero invertido habiendo compensado los efectos inflacionarios y debe estar entre 10 y 15 %. El índice inflacionario debe ser el promedio del índice inflacionario pronosticado; se puede tomar de varias fuentes, por ejemplo, el pronóstico del Banco de México (Urbina Baca, 2010).

El valor presente neto (VPN) es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados en el presente a la inversión inicial lo que equivale a comparar todas las ganancias esperadas contra todas las inversiones necesarias para producir ganancias en términos de su valor equivalente en el tiempo cero, el VPN permite obtener los flujos netos de efectivo (FNE) que sirven para realizar la evaluación económica.

El cálculo de VPN utiliza el costo de capital o la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR). La ecuación para calcular el VPN a un periodo de inversión a n años es la siguiente:

$$VPN = -P + \sum \frac{FNE_n}{(1+i)^n} \quad (3)$$

Donde:

P = Inversión inicial

FNE = Flujos netos de efectivo

i = tasa de interés

n = periodos capitalizables

En la fórmula 3, se observa que el VPN es inversamente proporcional al valor del interés aplicado (i), el cual es la TMAR. En caso de que se quiera un rendimiento alto, se tienen que considerar los siguientes razonamientos.

- a) Si $VPN > 0$, el proyecto es rentable y la inversión puede llevarse a cabo
- b) Si $VPN < 0$, el proyecto no es rentable y la inversión no se debe llevar a cabo
- c) Si $VPN = 0$, la inversión puede o no llevarse a cabo, no se modifica el patrimonio.

La tasa interna de rendimiento (TIR) es la tasa de descuento por la cual el VPN es igual a 0; es la tasa que iguala la suma de los flujos descontados a la inversión inicial. La ecuación para calcular la TIR se expresa a continuación.

$$TIR = -P + \sum \frac{FNE_n}{(1+i)^n} = 0 \quad (4)$$

La tasa interna de rendimiento (TIR) supone que el dinero que se gana año con año se reinvierte en su totalidad, es decir, es la tasa de rendimiento generada en su totalidad en el interior de la empresa por medio de la reinversión (Urbina Baca, 2010). El periodo de recuperación de la inversión (PRI) es la magnitud del tiempo en años durante el cual los beneficios o utilidades futuras del proyecto cubren el monto de la inversión; el criterio de evaluación indica que, en la medida en que el tiempo de recuperación sea menor, el proyecto de inversión disminuye (Araulo Arévalo, 2021).

Cuando los flujos de efectivo son iguales, el periodo de recuperación se calcula dividiendo el monto invertido entre el valor del flujo neto, como se observa en la fórmula 5.

$$\text{Periodo de recuperación (PRI)} = \frac{\text{Inversión (P)}}{\text{Flujo Neto de Efectivo (FNE)}} \quad (5)$$

Relación Costo-Beneficio (CB). También llamado índice de redituabilidad, es el cociente de los flujos descontados de los beneficios o ingresos del proyecto sobre los flujos descontados de los costos o egresos totales del proyecto.

1.4.2.1 Escalamiento de procesos de membranas

La semejanza geométrica se define como sigue: dos cuerpos son geométricamente semejantes cuando para cada punto en uno de ellos existe al menos un punto correspondiente con el otro, de acuerdo con la fórmula 6.

$$\frac{A_1}{B_1} = \frac{A_2}{B_2} \quad (6)$$

Donde:

A_1, A_2, B_1, B_2 cualquier dimensión que se requiera cambiar, manteniendo al menos un punto original.

La semejanza mecánica es considerada como una extensión de la semejanza geométrica a los sistemas estacionarios o en movimiento, bajo la influencia de fuerzas, las cuales pueden ser estática (cuerpos sólidos o estructuras sometidas a tensión constante), cinemática (se relaciona con sólidos o sistemas fluidos en movimiento) y dinámica (relaciona las fuerzas que aceleran o retardan masas en movimientos en sistemas dinámicos).

Por lo tanto, para el escalamiento de un proceso de membranas se debe tener un punto correspondiente con el escalado, es decir, se debe mantener el valor original. Por ejemplo, la PTM (presión transmembrana) cubre el aspecto dinámico del principio de similitud, una vez seleccionado el valor de este parámetro, se debe conservar en otra escala.

Para escalar tecnologías de separación por membranas, es necesario establecer los parámetros importantes para escalar el proceso, de acuerdo con Ball (Ball, 2000), los factores que se consideran para los procesos de tecnologías de separación por filtración son, flujo tangencial y flujo directo. Los factores que influyen en escalamiento de la membrana son la PTM, velocidad de flujo tangencial y la longitud, siendo importante mantener estos parámetros constantes tanto en escalas pequeñas como en escalas mayores.

El planteamiento fue probado tomando como base 80 L de volumen de la alimentación de una membrana de ultrafiltración para determinar su escalamiento descendente (scale-down) a 10 L y ascendente (scale-up) a 600 L, utilizando membranas con las mismas características, manteniendo constante la PTM y el flujo de alimentación con un área inicial de 1 m^2 , se reportó que para un volumen de 10 L se necesita una membrana de 0.1 m^2 y para un volumen de 600 L se necesita un área de 8 m^2 . Los resultados se muestran en la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Datos de escalamiento para el diseño de un proceso de ultrafiltración

Parámetros	Volumen de alimentación (L)		
Volumen de alimentación (L)	10	80	600
Área (m ²)	0.1	1	8
V _f (L/m ² min)	8	8	8
PTM (bar)	2.8	2.8	2.8
J _p (L/m ² h)	146	144	144

Con el ejemplo anterior, Ball demostró el escalamiento por semejanza mecánica, manteniendo constantes parámetros como el volumen de alimentación V_f y la PTM, cambia el área dependiendo del tamaño de escalamiento, conservando el flujo de permeado para cada caso (Ball, 2000).

1.4.3 Factibilidad ambiental

La gestión ambiental contempla de manera integrada todos los aspectos que componen el medio humano y el medio natural, su interacción con los proyectos de infraestructura, en cuanto a vectores que introducen modificaciones denominadas impactos ambientales para el contexto particular de cada obra y su identificación, evaluación, prevención, mitigación o compensación.

En los estudios ambientales, la evaluación ambiental tiene como objetivo identificar, caracterizar y evaluar la magnitud de los impactos de un proyecto sobre el ambiente. Los resultados de la evaluación constituyen la base para orientar la gestión tendiente a prevenir, mitigar o compensar los impactos de tal manera que se logre minimizar los efectos negativos del proyecto y potencializar aquellos que reviertan beneficios tangibles en el ámbito local, regional y nacional (S. et al., 2010).

En términos generales, los Estudios de Impacto Ambiental (EIA), se definen como los análisis interdisciplinarios destinados a predecir, identificar y valorar de manera

apropiada la relación establecida entre el medio ambiente y el proyecto de desarrollo, implicando los siguientes pasos:

- Identificar y evaluar los impactos que ocasiona el proyecto en diferentes fases.
- Diseñar las medidas preventivas, mitigatorias, compensatorias de control necesarias y su estructuración como Plan de Manejo Ambiental (PMA).
- Establecer los costos de gestión ambiental que se deben invertir para la ejecución del PMA con miras a su inclusión en el ciclo económico del proyecto.

La tabla 1.5 muestra la clasificación de los distintos tipos de impacto ambiental que se dan de manera más usual sobre el ambiente.

Tabla 1.5 Clasificación de impactos ambientales

Necesidad de MC	Recuperabilidad			Reversibilidad	Persistencia	
Compatible	Recuperable	Inmediato		Inmediato	Temporal	Fugaz
Moderado		Corto plazo		Reversible corto, medio y largo plazo		Momentáneo corto plazo
		Medio plazo				Temporal medio plazo
Severo		Largo plazo				Pertinaz Largo plazo
Severo	Irrecuperable	Mitigable			o en su caso Irreversible	Temporal si es reversible
Pseudo-Critico		Reemplazable	Reemplazable por otro elemento ambiental de igual valor			
			Sustituible por introducción de una acción con efecto			
		Compensable		Permanente si es irreversible		
Crítico		Totalmente irrecuperable				

Debido a lo anterior, es necesario conocer y medir el impacto ambiental que se está generando por la aplicación de un proyecto, con el fin de permitir a los responsables de las políticas ambientales establecer medidas de control y gestión de los recursos naturales que permitan un desarrollo sostenible.

Existen varios métodos para la evaluación del impacto ambiental, los cuales son aplicados a proyectos específicos, sin que sea un método general para todos los aspectos ambientales, la metodología de lhobe para la identificación y evaluación de aspectos ambientales constituye una herramienta estructurada alineada con los principios de la norma ISO 14001, como base para planificar el Sistema de Gestión Ambiental (SGA).

Esta metodología se fundamenta en el enfoque causa-efecto, donde un aspecto ambiental se entiende como cualquier elemento de las actividades, productos o servicios que puede generar un cambio en el medio, y un impacto ambiental como el efecto resultante de dicha interacción.

El procedimiento lhobe se ha desarrollado en cuatro etapas principales. Inicia con la identificación sistemática de los aspectos asociados a las actividades, productos y servicios de la organización considerando condiciones normales, anormales y de emergencia, así como sus entradas y salidas (consumo de agua, energía, materias primas, emisiones, vertidos, residuos, ruido y uso de recursos)

Posteriormente, se aplica una evaluación de criterios basada en parámetros que integra magnitud, frecuencia, peligrosidad, extensión del impacto, cumplimiento legal y sensibilidad social. A partir de estos criterios se elabora una matriz de significancia, herramienta central que permite identificar los aspectos ambientales significativos requeridos por la ISO 14001 para la planificación del sistema de gestión ambiental.

Finalmente, los aspectos significativos se utilizan para definir objetivos y metas ambientales, garantizando la coherencia con los principios de mejora continua y prevención de impactos ambientales promovidos por la norma. En conjunto, lhobe proporciona un método claro, reproducible y consistente con el marco de gestión ambiental internacional. La tabla 1.7 muestra los criterios de la magnitud del impacto ambiental, el cual establece la cantidad, la frecuencia y la extensión cualitativa del efecto (bajo, medio y alto) y cuantitativa (1-3) de acuerdo con su significancia, es decir la importancia condicionada por la intensidad, la extensión, el momento y la

reversibilidad de la acción y se establece como alta (A), media(M) y baja (B), con un nivel significativo (S) y no significativo (NS).

Tabla 1.6 Criterios de magnitud del impacto ambiental

Criterio de magnitud				
Cantidad	Frecuencia	Extensión	Calificación cualitativa	Calificación cuantitativa
Cantidad generada del aspecto > 100% del año de referencia.	Duración del aspecto entre el 75% y el 100% del tiempo de actividad.	Superficie contaminada > del 50% de la superficie total.	Alta (A)	3
Cantidad generada del aspecto entre el 85% y el 100% del año de referencia.	Duración del aspecto entre el 50% y el 75% del tiempo de actividad.	Superficie contaminada entre el 10% y el 50% de la superficie total.	Media (M)	2
Cantidad generada del aspecto < al 85% del año de referencia	Duración del aspecto entre el 50% y el 75% del tiempo de actividad	Superficie contaminada < del 10% de la superficie total	Baja (B)	1

En la magnitud también se puede considerar un signo positivo (+) o negativo (-) para indicar si es benéfico o perjudicial. La tabla 1.7 muestra los niveles de significancia que presenta la magnitud del impacto ambiental.

Tabla 1.7 Criterios de magnitud del impacto ambiental

Magnitud	Alta	Media	Baja
Alta	S	S	S/NS
Media	S	S/NS	NS
Baja	S/NS	NS	NS

Las tablas 1.8 a 1.14 muestran las calificaciones cuantitativas de los impactos ambientales bajo distintos criterios.

Tabla 1.8 Calificación de criterios del impacto ambiental

Criterio de peligrosidad o toxicidad			
Aspecto ambiental	Alta (A)-3	Media (M)-2	Baja (B)-1
Generación de Residuos.	Residuos peligrosos.	Residuos no peligrosos con destino final a vertedero.	Residuos no peligrosos que se destinen a valorización, reciclaje o reutilización.
Consumo Energético.	Carbón, Fuel, Gasóleo.	Gas Natural y Energía Eléctrica.	Energías renovables
Consumo de sustancias.	Inflamables, tóxicas, corrosivas.	Nocivas, irritantes.	Sin peligrosidad asignada.
Contaminación del suelo.	Todos los casos.		

Tabla 1.9 Calificación de criterios de límites de referencia en condiciones normales

Criterio de acercamiento a límites de referencia.		
	Calificación cualitativa	Calificación cuantitativa
Valor del parámetro entre el 80% y 100% del límite legal o de referencia.	Alta (A)	3
Valor del parámetro entre el 50 y 80% del límite legal o de referencia.	Media (M)	2
Valor del parámetro < del 50% del límite legal o de referencia.	Baja (B)	1

Tabla 1.10 Calificación de criterios de extensión en condiciones de emergencia

Criterio de extensión		
	Calificación cualitativa	Calificación cuantitativa
Extenso: área de influencia externa, superando los límites de la empresa.	Alta (A)	3
Local: área de influencia local o parcial, sin superar los límites de la empresa.	Media (M)	2
Aislado: área de influencia puntual.	Baja (B)	1

Tabla 1.11 Calificación de los criterios de sensibilidad al medio en condiciones normales

Criterio de sensibilidad del medio			
Aspecto ambiental	Alta (A)-3	Media (M)-2	Baja (B)-1
Residuos.	Entrega a gestor para su eliminación o deposición en vertedero.	Entrega gestor para su valorización o reciclado.	Reciclar o valorizar internamente en la empresa.
Consumo de Agua.	Subterránea, río.	Red Municipal en Zona no Excedentaria.	Red Municipal en Zona Excedentaria.
Vertido de Agua.	Cauce público o mar con fauna o interés ecológico.	Cauce público o mar sin fauna o interés ecológico.	Colector municipal o depuradora.
Emisiones atmosféricas de ruido, u olores.	Zona urbana residencial o de interés ecológico.	Zona industrial cercana a viviendas o zona residencial.	Zona industrial lejana a viviendas o núcleos urbanos.
Contaminación del suelo.	Zonas verdes, de tierra o grava.	Zonas asfaltadas u hormigonadas.	
Imagen.	Áreas verdes, naturales como bosques.	Área industrial o urbana sin degradar.	Área industrial o urbana y degradada.
Medio natural.	Zona con flora o fauna de alto valor ecológico.	Zona con flora o fauna sin valor ecológico y sin degradar.	Zona con flora o fauna degradada.

Tabla 1.12 Calificación de criterios de probabilidad/frecuencia en condiciones de emergencia

Criterio de probabilidad/frecuencia		
	Calificación cualitativa	Calificación cuantitativa
El incidente, accidente o situación de emergencia ocurrirá más de una vez al mes.	Alta (A)	3
El incidente, accidente o situación de emergencia ocurrirá menos de una vez al mes, pero más que una vez al año.	Media (M)	2
El incidente, accidente o situación de emergencia ocurrirá una vez al año o menos de una vez al año.	Baja (B)	1

Tabla 1.13 Calificación de criterios de peligrosidad en condiciones de emergencia

Criterio de peligrosidad		
	Calificación cualitativa	Calificación cuantitativa
Peligroso: sustancias calificadas como, inflamables, tóxicas, irritantes, peligrosas para el medio ambiente (incluidas los RP's) o restringidas por requisitos legales u otros.	Alta (A)	3
Peligrosidad menor: sustancias calificadas como nocivas, irritantes, residuos no peligrosos no valorizables y sustancias que van a restringirse en un futuro por requisitos legales u otros.	Media (M)	2
No peligroso: sustancias que no tienen peligrosidad asignada, así como residuos valorizables o reciclables que no tienen peligrosidad asignada, así como residuos valorizables o reciclables.	Baja (B)	1

Tabla 1.14 Calificación de criterios de sensibilidad al medio en situaciones de emergencia

Criterio de sensibilidad del medio		
	Calificación cualitativa	Calificación cuantitativa
Muy sensible, entorno natural con flora y fauna, zonas de tierra, cauces o regatas de agua, áreas donde la calidad del aire está catalogada como excelente, entorno urbano residencial, etc.	Alta (A)	3
Sensible, entorno asfaltado u hormigonado, colector municipal, áreas donde la calidad del aire está catalogada como normal, entorno industrial con viviendas cercanas.	Media (M)	2
No sensible, entorno con medidas preventivas de contención como cubetos de contención, depuradora de la propia organización, áreas donde la calidad del aire está catalogada como contaminada, entorno industrial con núcleos urbanos o viviendas muy lejanas.	Baja (B)	1

Una vez establecida la ponderación del proyecto, se puede determinar el impacto ambiental que podría generar la implementación y el funcionamiento del proyecto, dando una calificación cuantitativa de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$R = \frac{\sum Efectos}{\sum Magnitud\ del\ efecto} \quad (1)$$

Teniendo la calificación cuantitativa, se puede designar la calificación cualitativa de acuerdo con lo referido en la tabla 1.15 (Ihobe, 2009).

Tabla 1.15 Impacto ambiental de acuerdo con índice R

R= resultado	Efecto ambiental
$1 \leq R < 1.5$	Bajo
$1.5 \leq R < 2$	Bajo con tendencia a medio
$2 \leq R < 2.5$	Medio
$2.5 \leq R < 3$	Medio con tendencia a alto
$R = 3$	Alto

Una vez obtenido el índice del impacto ambiental, se debe determinar si el proyecto es factible ambientalmente para ser implementado, así como las medidas necesarias para mitigar los impactos que se puedan generar durante su implementación.

1.4.3.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta dentro de la gestión ambiental que es utilizada para evaluar los aspectos e impactos ambientales asociados a todas las etapas del ciclo de vida de un producto, proceso o actividad.

El ACV permite identificar y cuantificar el uso de recursos (materia y energía), así como las emisiones y residuos generados, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto. Esta metodología, normalizada por la Organización Internacional de Normalización a través de las normas ISO 14040 e ISO 14044, facilita la toma de decisiones orientadas hacia la sostenibilidad y mejora

continúa de los sistemas productivos. Además, ha sido ampliamente promovida y estructurada por organismos científicos como la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006).

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una técnica desarrollada para tratar aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o servicio desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final, es decir, de la cuna a la tumba (IMNC, 2009; ISO 14044, 2006; ISO 14040, 2006).

El ACV también puede ayudar a: identificar oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida; aportar información a quienes toman decisiones en la industria y en organizaciones gubernamentales o no gubernamentales; y a seleccionar los indicadores de desempeño ambiental pertinentes, incluyendo técnicas de medición y marketing.

1.4.3.1.1 Metodología del Análisis del ciclo de Vida

El ACV se estructura en cuatro fases metodológicas principales: (1) Definición de objetivo y alcance, (2) Análisis de inventario (LCI), (3) Evaluación de impactos y (4) Interpretación.

1. Definición de Objetivo y alcance

En esta etapa se establecen los propósitos del estudio y se definen los límites del sistema a evaluar. Esto incluye:

- **Función del sistema:** Se describen las funciones que cumple el producto o proceso.
- **Unidad Funcional:** Representa la base cuantitativa que permite realizar comparaciones entre diferentes sistemas.
- **Límites del sistema:** Abarca todas las fases del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, incluyendo los procesos de

transporte, fabricación y gestión de residuos. También se consideran las condiciones geográficas que pueden afectar los resultados.

2. Análisis de Inventario (LCI-Life Cycle Inventory)

Consiste en la recopilación sistemática de datos sobre entradas (materias primas, energía) y salidas (emisiones, residuos). Se incluyen parámetros complementarios como uso de suelo, ruido o pérdida de biodiversidad. El procedimiento típico incluye: elaboración de diagramas de flujo, definición de la calidad de datos, recolección de datos y realización de balances materia-energía (ecobalances) y posible redefinición de objetivos y alcance, si se detectan inconsistencias en esta fase.

3. Evaluación de impactos (LCIA-Life Cycle Impact Assessment)

En esta fase se evalúan las consecuencias ambientales del inventario mediante:

- Clasificación: Asignación de flujos a categorías de impacto ambiental.
- Caracterización: cuantificación de la contribución de cada flujo a cada categoría.
- Valoración: Ponderación de los impactos considerando criterios científicos, sociales o éticos.

Las principales categorías de impactos ambientales comúnmente empleadas en los estudios de ACV se encuentran: cambio climático (Global warming), acidificación terrestre y acuática, eutrofización (de agua dulce y marina), toxicidad humana (cáncer y no cáncer), toxicidad en ecosistemas acuáticos y terrestres, formación de ozono troposférico (smog fotoquímico), consumo de agua, radiación ionizante y uso de suelo. La selección de categorías depende del objetivo del estudio y del contexto geográfico o sectorial del sistema analizado.

4. Interpretación

Permite analizar los resultados globales, evaluar su coherencia con los objetivos y extraer recomendaciones para reducir impactos. Esta fase es clave para fundamentar decisiones estratégicas en ecodiseño, políticas públicas o evaluación comparativa de productos.

El desarrollo del ACV se apoya en software especializado que permite modelar sistemas complejos, gestionar bases de datos ambientales y realizar cálculos avanzados. Entre las herramientas más utilizadas a nivel internacional se destacan las siguientes:

- SimaPRo (PRé Sustainability, Países Bajos): una de las plataformas más completas, ampliamente utilizada en investigación y consultoría.
- GaBi (Sphera, Alemania): software robusto con gran aplicación en la industria, especialmente en sectores como automotriz y construcción.
- OpenLCA (GreenDelta, Alemania): Herramienta de código abierto que le permite realizar estudios profesionales y facilita el acceso a bases de datos externas.
- Umberto: utilizado para modelar procesos de producción complejos y flujos de materiales y energía.

Estas plataformas se integran con bases de datos como Ecoinvent Agri-footprint, USLCI, entre otras, que contienen información detallada sobre procesos industriales, transporte, energía y materiales a nivel mundial.

Investigaciones encontradas en la literatura mencionan el uso de software para realizar el análisis de ciclo de vida, entre las cuales se encuentran las mostradas en la tabla 1.16.

Tabla 1.16 Investigaciones sobre Análisis de Ciclo de Vida para la recuperación de agua reportadas en la literatura

Proceso	Objetivo	Límites del sistema	Metodología de ACV	Resultados	Referencias
Tratamiento de agua residual industrial textil Siete opciones: Individual EC(Fe) EC(Al) O ₃ Combinado EC(Fe)-O ₃ EC(Al)-O ₃ Secuencial EC(Fe) y O ₃ EC(Al) y O ₃	Comparar tratamientos individuales, combinados y secuenciales EC/O ₃	Desde la construcción hasta disposición de lodos	Unidad Funcional: 1L de agua residual tratada Software SimaPro 9.1.0.8, Ecoinvent v3.3	Los resultados muestran O ₃ presenta mayor impacto ambiental en los requerimientos de energía y sobre la salud humana, las emisiones de CO ₂ para O ₃ se espera de 81.4 g CO ₂ eq. y para EC de 1.4 CO ₂ eq., en el caso de los procesos combinados O ₃ -EC, los impactos ambientales disminuyen y se propone como una solución sustentable	(Ahangarnokolaei et al., 2021)

Proceso	Objetivo	Límites del sistema	Metodología de ACV	Resultados	Referencias
Tratamiento de efluente: primario, secundario (biológico), químico (coagulación-floculación) Tratamiento para recuperar agua: Filtración mecánica, arena, UF, CA, OI y UV	Definir los efectos ambientales del tratamiento del agua residual industrial Definir los efectos ambientales y los beneficios en la recuperación de agua con tratamientos avanzados	Esta aplicado desde la cuna hasta la tumba, incluyendo la producción de químicos, generación de electricidad, transporte de los químicos de los distribuidores hasta la planta, el tratamiento del agua y de los lodos	La metodología está aplicada para 1 m ³ de efluente tratado y para 1 m ³ de agua recuperada Usando CML-IA baseline (v.3.06), ReCiPe 2016 (V1.04 midpoint, Hierarchist (H)) SimaPro 9.1.0.1	El análisis de ACV arrojó que el consumo de electricidad domina el proceso del tratamiento con más del 90% de los impactos encontrados, a pesar de que la recuperación de agua tiene un 100 % de beneficio	(Capa et al., 2022)
Tratamiento secundario de un efluente urbano de una planta tratadora de agua residual con GO-TiO ₂ -Solar y TiO ₂ -Solar	Comparar los impactos ambientales de dos tratamientos solares usando fotocatalisis diferentes para analizar cual opción genera menos impactos potenciales para remover micro contaminantes de aguas residuales	Desde los materiales del composito, la construcción de los equipos, la generación de residuos y la descarga del efluente tratado	Unidad funcional: 1 m ³ de agua residual urbana Usando SimaPro 9.4.0.2, y ReCiPe	Los resultados muestran que el uso de GO-TiO ₂ genera mayores impactos ambientales, atribuidos al proceso de síntesis y al uso de reactivos agresivos como HF, TiO ₂ comercial fue la alternativa con menor impacto.	(Pesqueira et al., 2024)

2 METODOLOGÍA

Para la realización del presente proyecto se establece una metodología que consta de cuatro etapas, las cuales se describen en el diagrama de flujo de la figura 2.1.

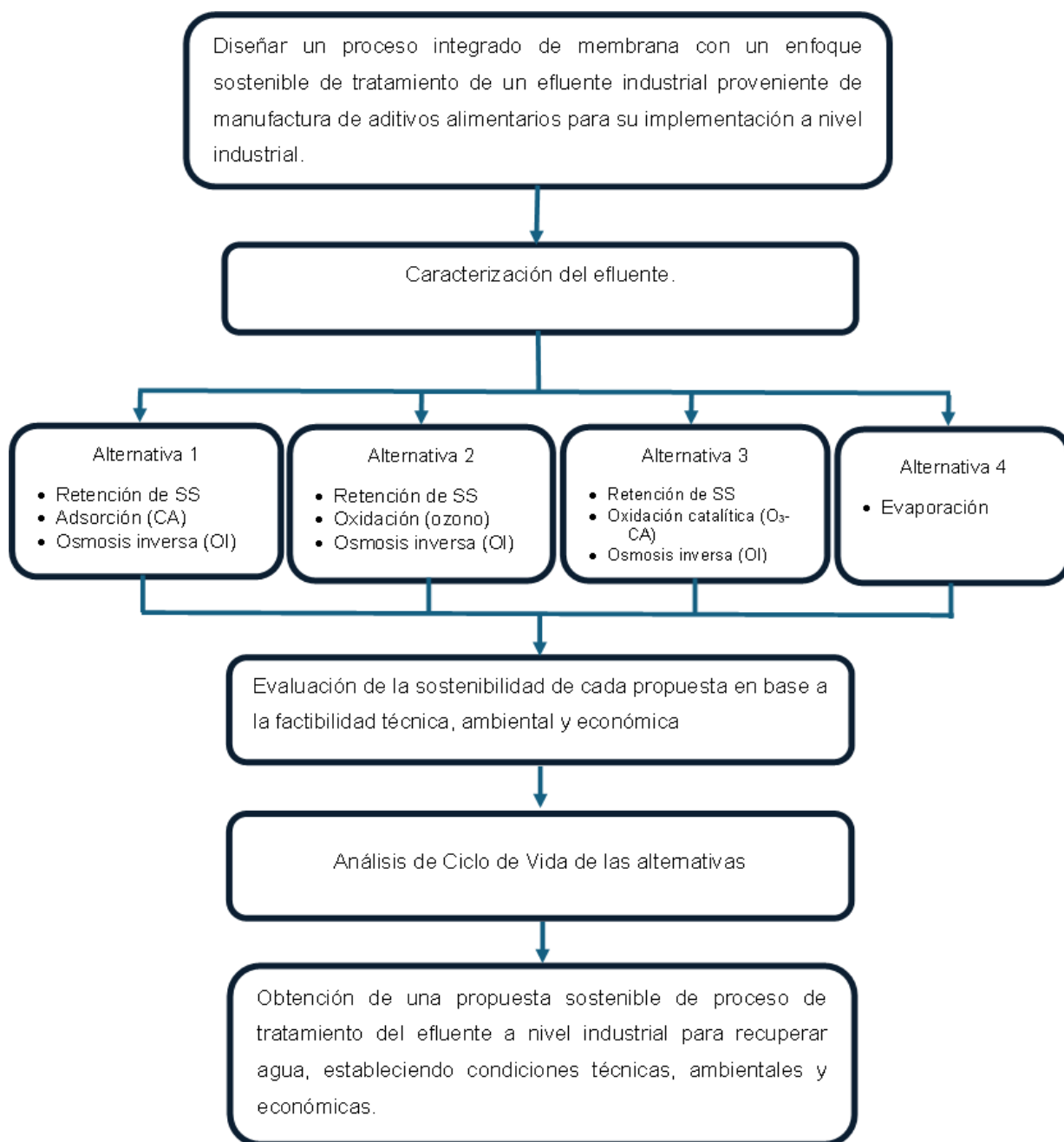


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología de investigación

2.1 Caracterización del efluente

Como antecedente, se sabe que una empresa genera un efluente proveniente del proceso de manufactura de aditivos con caudal de 250 m³/día.

Las características fisicoquímicas del efluente se muestran en la Tabla 2.1, destacando un pH básico, presencia de colorantes, alta DQO, conductividad (CE), cloro (Cl⁻), sólidos totales (ST), disueltos (SDT) y sedimentables (SS), por lo cual se refiere a un efluente altamente contaminado que requiere de un tratamiento para su depuración y obtención de agua potable.

Tabla 2.1 Características fisicoquímicas del efluente industrial (Hernández et al., 2022)

Parámetro	pH	DQO (mg/L)	CE (mS/cm)	Cl ⁻ (mg/L)	SDT (mg/L)	ST (mg/L)	SS (mg/L)	Colorantes
Valor	9 ± 0.1	4640 ± 100	87.5 ± 15	36,301 ± 125	66,100 ± 150	66,300 ± 550	190 ± 0.5	Rojo 40, rojo 2 y amarillo 5

2.1.1 Alternativas propuestas para la recuperación de agua

De acuerdo con las características del efluente proporcionadas en la tabla 2.1 se propusieron cuatro alternativas de tratamiento para la recuperación de agua del efluente industrial, las cuales consisten en un sistema que incluye una secuencia de procesos para depurar el efluente y obtener agua potable.

Alternativa 1: a) Filtración para la retención de sólidos suspendidos, b) Adsorción por carbón activado para remover el color, c) Osmosis inversa para remover sales, obtener agua potable y como subproducto un concentrado de sales.

Alternativa 2: a) Filtración para la retención de sólidos suspendidos, b) Oxidación con ozono para degradar el color, c) Osmosis inversa para remover sales, obtener agua potable y, como subproducto, un concentrado de sales.

Alternativa 3: a) Filtración para la retención de sólidos suspendidos, b) Oxidación catalítica con ozono y carbón activado para degradar el color, c) Osmosis inversa para remover sales, obtener agua potable y, como subproducto, un concentrado de sales.

Alternativa 4: a) Evaporación del efluente para obtener agua potable y un concentrado de sales con color y sólidos suspendidos.

2.2 Evaluación técnica, económica y ambiental de las alternativas de tratamiento

2.2.1 Factibilidad técnica

Se evaluó la factibilidad técnica de cada una de las alternativas, analizando las características fisicoquímicas del agua recuperada, toxicidad del agua, equipos necesarios para llevar a cabo el tratamiento, el escalamiento de los equipos a nivel industrial, la disponibilidad de equipos y materiales en el mercado, el espacio necesario para la implementación del proyecto y la operatividad del proceso. Finalmente, se evaluó el número de personas necesarias para operar los equipos del proceso una vez implementado el proyecto.

2.2.1.1 Determinación de la calidad y toxicidad del agua recuperada

Para determinar las características del agua recuperada se utilizaron los métodos indicados en la normatividad mexicana y dando seguimiento a las características del efluente industrial y a los parámetros indicados en la NOM 127 de agua potable.

Para evaluar la toxicidad del agua se realizó un bioensayo de toxicidad en semillas de lechuga (*Lactuca Sativa*) siguiendo la metodología de Sobrero y Ronco (2014), el cual se llevó a cabo de la siguiente forma.

En cajas Petri, con papel filtro Whatman grado 3 y 5 mL de muestra colocar 20 semillas de lechuga (*Lactuca Sativa*), ponerlas en una caja oscura hecha de cartón, y dejar en una incubadora a temperatura de 22 ± 2 °C por 120 h (5 días) para una adecuada germinación. Realizar los ensayos por triplicado. Muestra de agua de NaCl 0.1M y agua dura reconstituida (APHA, 2023) se usan como control negativo y positivo, en la tabla 2.5 se muestra el procedimiento, las características y condiciones para realizar el bioensayo de toxicidad con semillas de lechuga (*Lactuca Sativa*).

Tabla 2.2 Procedimiento de las pruebas del bioensayo de toxicidad con semillas de lechuga (*Lactuca Sativa*)

Parámetro	Condición
Prueba	Estática
Temperatura	22 ± 2 °C
Exposición a la luz	Oscuridad
Tiempo de incubación	120 h
Placas de cultivo	Cajas Petri con papel Whatman No. 3
Volumen de muestra	5 mL (por triplicado)
No de semillas	20 semillas por muestra
Control negativo	NaCl 0.1 M
Control positivo (testigo)	Agua dura reconstituida
Muestras evaluadas	Alternativa 1 (S-CA-OI) Alternativa 2 (S-Ox-OI) Alternativa 3 (S-Ox cat-OI) Alternativa 4 (Evaporación)

Una vez terminado el tiempo de incubación, se contabilizaron y midieron las semillas germinadas considerando aquellas con una longitud radical mayor a 5 mm. Evaluar

el crecimiento de las plántulas de *L. Sativa* en cada muestra midiendo la longitud del hipocótilo y la radícula de las plántulas (figura 2.2).

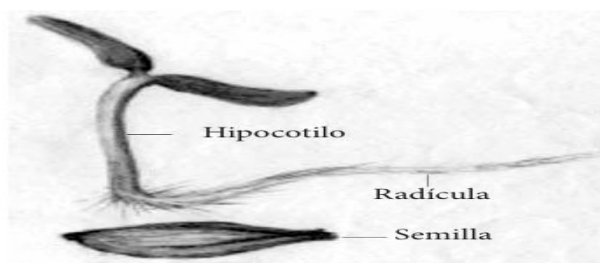


Figura 2.2 Morfología de la semilla y plántula de lechuga *Lactuca Sativa*.

Cada punto se evaluó comparando el efecto generado en los organismos expuestos a la muestra con respecto a la respuesta en los organismos del control negativo, sujetos a las mismas condiciones de ensayo. La cuantificación se realizará de acuerdo con el siguiente esquema (figura 2.3).

Una vez realizadas las mediciones, se calcularán los porcentajes de germinación relativa de la semilla (GRS), crecimiento relativo de la raíz (CRR) y el índice de germinación (IG) de acuerdo con las ecuaciones 7-9.

$$GRS(\%) = \frac{\text{número de semillas germinadas en la muestra}}{\text{número de semillas germinadas en agua dura}} \times 100 \quad (7)$$

$$CRR (\%) = \frac{\text{media de la longitud de la raíz en la muestra}}{\text{media de la longitud de la raíz en agua dura}} \times 100 \quad (8)$$

$$IG (\%) = \frac{GRS \times CRR}{100} \quad (9)$$

Así mismo, se calcularán los índices del porcentaje de germinación residual normalizado (IGN) y de elongación radical residual normalizado (IER) (Rodríguez et al., 2014).

$$IGN = \frac{Germ_x - Germ_{Adura}}{Germ_{Adura}} \quad (10)$$

$$IER = \frac{Elong_x - Elong_{Adura}}{Elong_{Adura}} \quad (11)$$

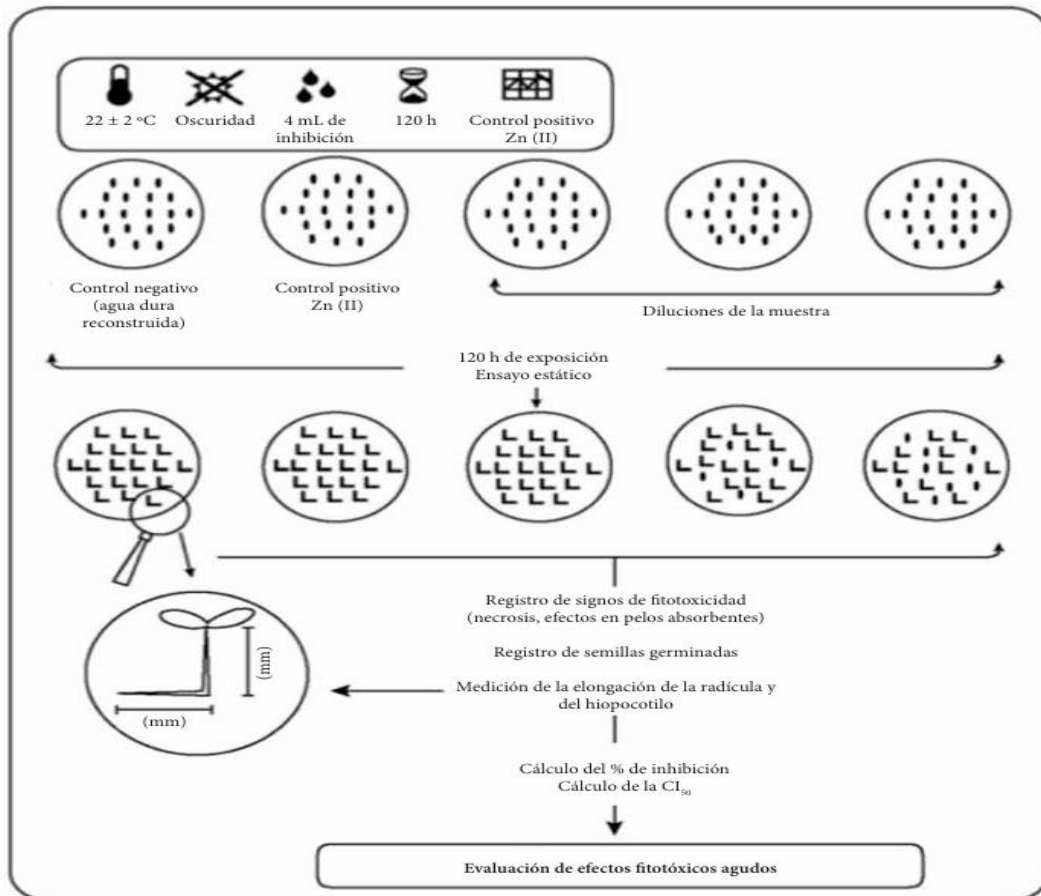


Figura 2.3 Procedimiento general de prueba de toxicidad con semillas de lechuga *Lactuca Sativa*.

Donde: $Germ_x$ y $Elong_x$ son el porcentaje promedio de semillas germinadas y la longitud promedio de la raíz de las semillas germinadas para cada muestra y $Germ_{Adura}$ y $Elong_{Adura}$ son el porcentaje de semillas germinadas y la longitud promedio de la raíz de semillas germinadas en el control positivo (agua dura).

El índice de IER establece valores de toxicidad desde -1 a > 0 de acuerdo con los siguientes criterios:

1. Índice de 0 a -0.25 baja toxicidad,
2. Índices de -0.25 a -0.5 toxicidad moderada,
3. Índices de -0.5 a -0.75 muy toxico y
4. Índices de -0.75 a -1.0 toxicidad muy alta.
5. Índices >0 indican crecimiento de la radícula u hormesis (Bagur-González et al., 2011).

2.2.1.2 Determinación de los equipos requeridos y su dimensionamiento

Una vez determinada la calidad del agua obtenida en los procesos de las alternativas propuestas, los resultados se deben conservar a escala industrial para tratar un caudal de $250 \text{ m}^3/\text{día}$, por lo que se analizaron los equipos utilizados a escala de laboratorio, esto es, dimensiones de los equipos: área, altura y volumen de lecho, para determinar el escalamiento por similitud (fórmula. 6).

En el caso del generador de ozono, se analizó la producción de ozono para el volumen de efluente tratado a nivel de laboratorio y se determinó la producción necesaria para tratar el efluente generado por la industria. Para el equipo de la membrana de ósmosis inversa, los factores que influyen en el escalamiento son; el flujo tangencial, la PTM y se determinó el escalamiento por semejanza mecánica de acuerdo con Ball.

Por otro lado, para el evaporador se consideraron la entrada de alimentación al equipo, el consumo energético y las dimensiones.

Con las dimensiones de los equipos a nivel industrial de cada alternativa, se analizaron las fichas técnicas de los equipos disponibles en el mercado, verificando que cumplieran con la demanda de efluente a tratar.

El escalamiento de cada uno de los equipos utilizados en cada alternativa se llevó a cabo de acuerdo con el modelo de escalamiento por semejanza propuesto por Ball y de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$\frac{A_1}{B_1} = \frac{A_2}{B_2} \quad (6)$$

Donde

A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , cualquier dimensión que se requiera cambiar, manteniendo al menos un punto original.

2.2.2 Factibilidad económica

En esta etapa se analizaron los costos de cada alternativa de tratamiento, incluyendo los equipos necesarios, costos de construcción, operación, materia prima, mano de obra, consumo de energía y agua, etc., para calcular la inversión necesaria en la implementación de cada alternativa. Así mismo, se evaluó el ahorro generado una vez que el proceso esté en funcionamiento.

Para evaluar la factibilidad de las alternativas de tratamiento se calculó el Valor Presente Neto (VPN), la tasa interna de rendimiento (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión.

La factibilidad económica se determinó de acuerdo con el resultado obtenido del VPN, de acuerdo con los siguientes razonamientos:

- a) Si $VPN > 0$, el proyecto es rentable y la inversión puede llevarse a cabo
- b) Si $VPN < 0$, el proyecto no es rentable y la inversión no se debe llevar a cabo
- c) Si $VPN = 0$, la inversión puede o no llevarse a cabo, no se modifica el patrimonio.

2.2.3 Factibilidad ambiental

2.2.3.1 Evaluación ambiental mediante la metodología de causa-efecto (lhobe)

Para la evaluación ambiental de cada una de las alternativas, se identificó los posibles impactos ambientales generados durante la operación de los tratamientos, evaluando la magnitud de cada uno de los efectos encontrados y caracterizándolos en una matriz causa-efecto, identificando la causa, las condiciones de funcionamiento (normal, anormal o de emergencia) y finalmente se evaluó su magnitud y peligrosidad, estableciendo un valor cuantitativo de acuerdo con su significancia.

Una vez establecida la ponderación de los efectos, así como su magnitud, se determinó el impacto ambiental que puede generar el proyecto, obteniendo el índice R, que de acuerdo con el resultado se puede determinar si el impacto es bajo, medio o alto. Al mismo tiempo se analizaron los impactos ambientales encontrados con la legislación vigente y se implementaron medidas de prevención y mitigación para minimizar los efectos negativos que se puedan dar durante la implementación del proyecto.

2.2.3.2 Evaluación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las alternativas de tratamiento del efluente

Para realizar el Análisis de Ciclo de Vida se recopilaron los datos de evaluación de cada una de las alternativas siguiendo la metodología de ACV descrita en las normas ISO 14040 e ISO 14044 determinando lo siguiente:

1. Definición del objetivo y alcance, así como la unidad funcional y los límites del sistema (alternativa de tratamiento).

2. Definición del Inventario del Ciclo de Vida, determinando las entradas y salidas de cada uno de los procesos desde la materia prima, energía consumida, así como las emisiones generadas hasta la recuperación de agua, salmuera y residuos obtenidos.
3. Caracterización de los impactos ambientales utilizando el software SimaPro ® 9.10.2.0.2 pH.D. Para los modelos de inventario de entradas se emplearon procesos unitarios de ecoinvent 3.10 y para la evaluación de los impactos potenciales en el punto medio se utilizó el método ReCiPe 2016 midpoint y endpoint (H) V1.09/World (2010) H. Las categorías por evaluar son las siguientes:
 - Calentamiento Global (GW) (KgCO_{2eq})
 - Agotamiento del ozono estratosférico (SOD) (Kg CFC11 eq)
 - Radiación ionizante (IR) (kBq Co-60 eq)
 - Formación de ozono, salud humana (OfHh) (kg Nox eq)
 - Formación de materia fina particulada (FPMf) (kg PM 2.5 eq)
 - Formación de ozono, ecosistema terrestre (OfTe) (kg Nox eq)
 - Acidificación terrestre (TA) (kg SO₂ eq)
 - Eutrofización de agua dulce (FE) (kg P eq)
 - Eutrofización marina (MA) (kg N eq)
 - Ecotoxicidad terrestre (Tec) (kg 1,4-DCB)
 - Ecotoxicidad de agua dulce (kg 1.4-DCB)
 - Ecotoxicidad marina (kg 1.4-DCB)
 - Toxicidad carcinogénica humana (HcT) (kg 1,4-MCB)
 - Toxicidad no carcinogénica humana (HncT) (kg 1,4-DCB)
 - Uso de tierra (LU) (m²a crop eq)
 - Escasez de recursos minerales (MRs) (kg Cu eq)
 - Escasez de recursos fósiles (FRs) (kg oil eq)
 - Consumo de agua (WC) (m³).
4. Interpretación de los impactos ambientales. Se evaluaron los resultados obtenidos en el paso anterior, así mismo, se complementó la toma de decisiones

en la obtención de la propuesta sostenible en la implementación de la alternativa a nivel industrial para recuperar agua con calidad de agua potable.

Los resultados se expresaron en milipoints (mPt), y se agruparon en tres indicadores de daño a nivel de punto final: salud humana, calidad de los ecosistemas y disponibilidad de recursos.

De la misma manera, se realizó la normalización con el propósito de identificar las categorías de impacto en el punto medio más significativas entre los escenarios evaluados. Los factores de normalización se basaron en el modelo internacional ReCiPe 2016 (Huibregts et al., 2016), el cual proporciona valores de referencia que representan las cargas ambientales promedio asociadas a un individuo, una región específica o la población mundial en un año determinado (Chen et al., 2024).

La aplicación de estos factores permitió convertir los resultados de caracterización en valores adimensionales, lo que facilitó la comparación entre categorías de impacto y la identificación de los impactos ambientales con mayor relevancia (Bai et al., 2017).

Posteriormente se aplicó un análisis de sensibilidad orientado a evaluar los efectos potenciales de integrar fuentes de energía renovables en cada alternativa, particularmente en la etapa de osmosis para reducir los impactos en 12 categorías ambientales (GW, SOD, IR, OfHh, FPMf, OfTe, TA, ME, TEc, LU, FRs). Para ello se propuso la incorporación de un módulo fotovoltaico representativo del contexto mexicano (Cayuela et al., 2024; Viotti et al., 2024), modelo a partir de la base de datos Ecoinvent bajo el proceso *Electricity, low voltage {MX} | electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted | Cut-off, S*. Se asumió que esta tecnología renovable cubriría el 50% de la demanda eléctrica total en cada escenario, permitiendo analizar de forma comparativa su incidencia sobre el perfil de impactos ambientales.

3 RESULTADOS

Los resultados de este apartado corresponden a la evaluación de la factibilidad técnica, económica, ambiental y de análisis de ciclo de vida (ACV) de las alternativas estudiadas para recuperar agua a partir del tratamiento de un efluente industrial.

3.1 Factibilidad técnica de las alternativas de tratamiento del efluente industrial para recuperar agua

3.1.1 Calidad del agua recuperada

La tabla 3.1 muestra las características fisicoquímicas del agua recuperada por cada alternativa y su comparación con la NOM-127-SSA1-2021 (SEMARNAT, 2022), la cual establece los límites permisibles de la calidad del agua para uso y consumo humano.

De los resultados obtenidos, se observa que el agua recuperada es completamente depurada con las alternativas de tratamiento, obteniendo agua con calidad de agua potable y es comparable con los parámetros de pH, color y TDS indicados en la NOM-127-SSA1-2021.

Con respecto a otros parámetros mencionados en la norma, como metales pesados, nitrógeno y fluoruros, no se indican debido a que el efluente industrial proviene de una industria alimenticia, por lo que no contiene dichos parámetros.

Por otro lado, se realizaron pruebas de toxicidad del agua recuperada con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*). Los resultados confirmaron que no existe toxicidad del agua, ya que en cada una de las pruebas se observó germinación de las semillas y

crecimiento de su radícula, por lo que se confirma que se recupera agua con calidad de agua potable, libre de impurezas.

Así mismo, se observa que la calidad del agua recuperada cumple con lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de agua residual en cuerpos receptores propiedad de la nación. No obstante, el agua obtenida al final de los procesos presenta características que permiten su aprovechamiento directo, evitando la necesidad de descargar al medio ambiente.

Tabla 3.1 Características del agua recuperada por cada alternativa del tratamiento del efluente industrial.

Parámetro		Efluente crudo	Agua recuperada del efluente tratado				NOM-127- SSA1-2021	NOM-001- SEMARNAT- 2021
			Alternativas					
			1	2	3	4		
pH		8.5 ± 0.5	7.5 ± 05	7.5 ± 05	7.5 ± 05	7.3 ± 0.1	6.5 a 8.2	6 a 9
DQO (g/L)		4640 ± 100	0.6 ± 0.4	0.6 ± 0.4	0.6 ± 0.4	0.016 ± 0.005	-	150 a 210
CE (mS/cm)		80 ± 10	ND	ND	ND	0.0087 ± 0.0004	-	-
Cl ⁻¹ (g/L)		35 ± 15	ND	ND	ND	1.9 ± 0.05	-	-
SDT (g/L)		52.5 ± 12.5	0.63 ± 0.12	0.63 ± 0.12	0.63 ± 0.12	0.4 ± 0.03	1000	-
ST (mg/L)		57.5 ± 12.5	ND	ND	ND	ND	-	60 a 84
SS (mg/L)		7.5 ± 2.5	ND	ND	ND	ND	-	-
Color verdadero (m ⁻¹)	436 nm	600	ND	ND	ND	0.62	-	7.0
	525 nm	492	ND	ND	ND	0.42	-	5.0
	620 nm	114	ND	ND	ND	0.28	-	3.0

ND. No detectado

En la tabla 3.2 se integran los procesos de tratamiento que conforman alternativas para recuperar agua a partir del efluente industrial (250 m³/día) y se establecen los flujos de los productos y subproductos obtenidos por alternativa, considerando el reúso del agua potable obtenida y el subproducto de salmuera, En los que se puede observar que las alternativas de tratamiento 3 y 4 son las que recuperan mayor cantidad de agua. Además, es destacable que mediante las alternativas 1-3 se genera un efluente o concentrado salino de reúso (40-50%), mientras que la alternativa 4, genera 2%; sin embargo, este no es reutilizable porque contiene colorantes y su destino es la disposición.

Tabla 3.2 Alternativas de tratamiento propuestas para recuperar agua a partir del tratamiento de un efluente industrial.

Alternativa de tratamiento	Etapas del sistema de tratamiento			Producto y subproducto del sistema de tratamiento
1	Filtración con arena. Retención de sólidos suspendidos	Adsorción con carbón activado. Remoción del color	Osmosis inversa. Remoción de sales	100 m ³ /día de agua potable y 150 m ³ de concentrado salino de reúso
2	Filtración con arena. Retención de sólidos suspendidos	Oxidación con O ₃ . Degradación de color y carga orgánica	Osmosis inversa. Remoción de sales	100 m ³ /día de agua potable y 150 m ³ de concentrado salino de reúso
3	Filtración con arena. Retención de sólidos suspendidos	Oxidación catalítica O ₃ -CA. Degradación de color y carga orgánica	Osmosis inversa. Remoción de sales	150 m ³ /día de agua potable y 100 m ³ de concentrado salino de reúso
4	Evaporación de agua			245 m ³ /día de agua potable y 5 m ³ de concentrado salino para disposición

3.1.2 Características técnicas y dimensionamiento de los equipos requeridos

La tabla 3.3 muestra las dimensiones de los equipos requeridas para el tratamiento del efluente en cada alternativa provenientes del escalamiento y considerando el caudal de 250 m³/día. La tabla 3.4 muestra las características técnicas de dichos equipos.

La tabla 3.5 presenta la superficie necesaria para la colocación, distribución y operación de los procesos por alternativa, incluyendo los tanques de almacenamiento del efluente, producto y subproducto obtenidos.

Tabla 3.3 Escalamiento de equipos a nivel industrial para los procesos de las alternativas propuestas

Equipo	Dimensiones a nivel piloto	Dimensiones escaladas	Dimensiones de equipos comerciales para el caudal de 250 m ³ /día
Tanque de almacenamiento del efluente	Capacidad 0.012 m ³	Capacidad 300 m ³	Capacidad 300 m ³
Filtro de arena	Largo: 30 cm Diámetro: 12 cm	Largo: 1.80 m Diámetro: 72 cm	Largo: 1.83 m Diámetro: 0.92 m
Filtro de CA	Largo: 30 cm Diámetro: 12 cm	Largo: 1.80 m Diámetro: 72 cm	Largo: 1.83 m Diámetro: 0.92 m
Generador de ozono	Producción de ozono: 6.6 mg O ₃ /L	Producción de ozono: 275 g O ₃ /h	Producción de ozono: 560 g O ₃ /h
Membrana de OI	Área: 0.53 m ² Caudal: 21.12 L/h	Área: 35 m ² Caudal: 1500L/h	Área: 37 m ² Caudal: 1.2 L/s
Evaporador	Caudal: 0.001 m ³ /día	Caudal: 250 m ³ /día	Caudal: 280 m ³ /día
Tanque de agua recuperada	Capacidad 0.012 m ³	Capacidad 300 m ³	Capacidad 300 m ³
Tanque de almacenamiento de salmuera	Capacidad 0.012 m ³	Capacidad 300 m ³	Capacidad 300 m ³

Tabla 3.4 Características técnicas de los equipos requeridos para el proceso de recuperación de agua.

Etapas del proceso de tratamiento	Instrumento, equipo e insumo requeridos	Unidades requeridas	Condiciones de operación
1. Filtración con arena	Bomba centrífuga	1	7.5 HP, Voltaje de 3F440V, 5×10^{-3} mbar de presión y un caudal de 505 m ³ /s
	Unidad de filtración de fibra de vidrio	2	Flujo máximo 2.73 m ³ /h/m ² Temperatura máxima 80°C, Dimensión del filtro 0.92x 0.92x1.83m
2. Adsorción con carbón activado	Unidad de adsorción con carbón activado	4	Caudal máximo 12 m ³ /h Dimensiones del filtro 0.92 m x 0.92 m x1.83 m
	Bomba centrífuga	2	7.5 HP, Voltaje de 3F440V, 5×10^{-3} mbar de presión y un caudal de 505 m ³ /s
3. Oxidación O ₃ y oxidación catalítica O ₃ -CA	Generador de ozono	1	Producción de ozono 560 g/h Presión máxima 0.6 bar Dimensiones 2.06 x 0.92 x 0.89 m
	Bomba centrífuga	1	7.5 HP, Voltaje de 3F440V, 5×10^{-3} mbar de presión y un caudal de 505 m ³ /s
	Generador de oxígeno	1	Presión máxima 1 bar Pureza de 93 ± 3% Dimensiones 2.18 x 1.17 x 0.91 m
	Compresor de aire	1	Capacidad 1000 L Potencia 40 HP Presión máxima 11 bar Dimensiones 2.3 x 0.8 m
4. Desalación con OI	Módulo con 7 membranas LG de OI	7	Flujo máximo 4.32 m ³ /h Presión máxima 55 bar Potencia de motor 70 HP
5. Evaporador	Equipo de evaporación de 3 efectos	1	Caudal: 280,000 L/d Consumo energético: 1744.5 kWh Dimensiones: 5x10x8 m

Tabla 3.5 Superficie requerida para la instalación y operación de los procesos para recuperar agua de cada alternativa

Alternativa	Superficie necesaria	Distribución
1	40 m ²	Equipos requeridos para los procesos: 11.5 m ² Tanques subterráneos (almacenamiento de efluente, agua recuperada y salmuera) y almacenamiento de materia prima: 28.5 m ²
2	40 m ²	
3	40 m ²	
4	50 m ²	Sólo equipo de evaporación de 3 efectos

Cabe mencionar que la empresa cuenta con una superficie de aproximadamente 40 m² disponible para la implementación del proceso de tratamiento y recuperación de agua, por lo que la Alternativa 4 supera la superficie disponible en la planta.

Al analizar la parte operativa de la implementación del sistema de las cuatro alternativas, se estableció un número de trabajadores de tres personas: operador, técnico y jefe de planta. De acuerdo con lo anterior, los equipos necesarios para la ejecución del tratamiento se encuentran disponibles en el mercado, se cuenta con espacio disponible para su instalación (excepto para la alternativa 4), concluyendo que el proceso es técnicamente viable para su implementación.

En la tabla 3.6 se muestran los resultados de la factibilidad técnica evaluada para cada alternativa.

Tabla 3.6 Evaluación de la factibilidad técnica por alternativa

Concepto	Alternativa para recuperar agua			
	1	2	3	4
Proceso	Retención de SS Adsorción con CA Desalación con OI	Retención de SS Oxidación con O ₃ Desalación con OI	Retención de SS Oxidación catalítica O ₃ -CA Desalación con OI	Evaporación
Equipos	Disponibles	Disponible	Disponible	Disponible
Espacio requerido (m ²)	40	40	40	50 m ² solo equipo de evaporación
Personal	3	3	3	3
Eficiencia (%)	40	40	50	98
Calidad del agua	Potable	Potable	Potable	Potable
Cantidad recuperada (m ³)	100	100	125	245
Concentrado de salmuera	Reutilizable	Reutilizable	Reutilizable	No reutilizable

3.1.3 Diagramas de flujo de los sistemas de tratamiento

Las figuras 3.1 a 3.4 muestran los diagramas de flujo de los procesos de las alternativas propuestas para la recuperación de agua.

Los filtros de arena ayudan a retener los sólidos suspendidos contenidos en el efluente, la remoción del color se realizará con los filtros de carbón activado y la degradación será con el equipo de ozono, así como el catalizado con carbón activado reduciendo la carga orgánica de forma más rápida, además de disminuir la salinidad del efluente mitigando el ensuciamiento de las membranas de osmosis inversa. Finalmente, el objetivo de las membranas de ósmosis inversa es la recuperación de agua de alta calidad y el concentrado de sal en el rechazo.

En el equipo de evaporación la recuperación de agua comprende un solo proceso de evaporación del efluente, recuperando agua de alta calidad y obteniendo un concentrado tipo salmuera. En cada una de las alternativas se obtiene un concentrado salino, el cual será reutilizado en el proceso de la empresa.

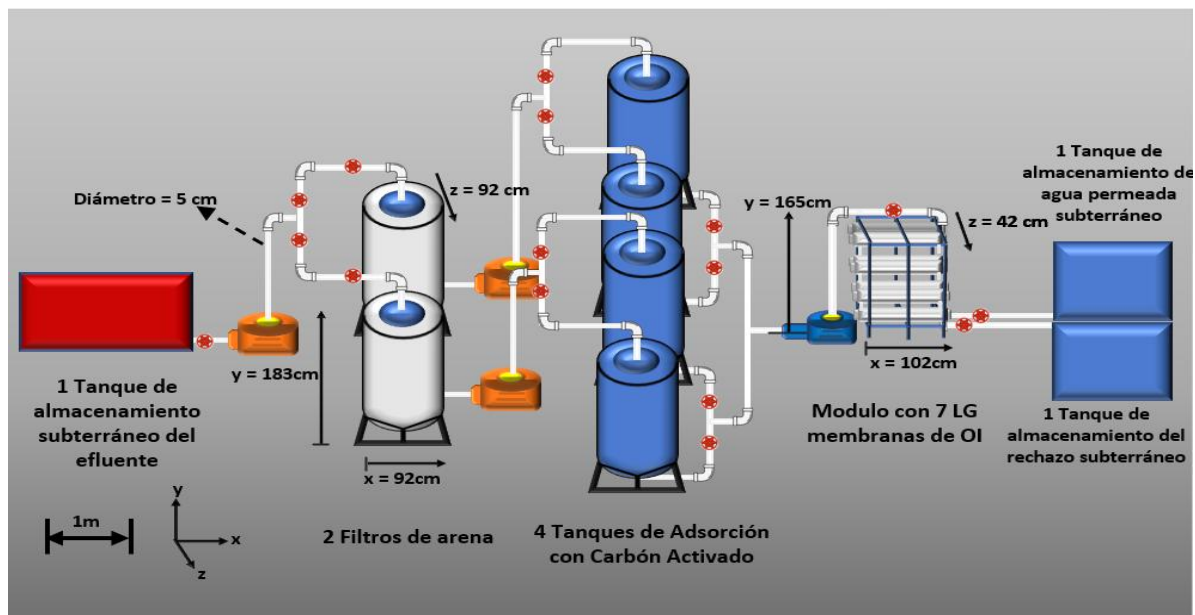


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la distribución de los equipos utilizados en el tratamiento para recuperar agua de un efluente industrial

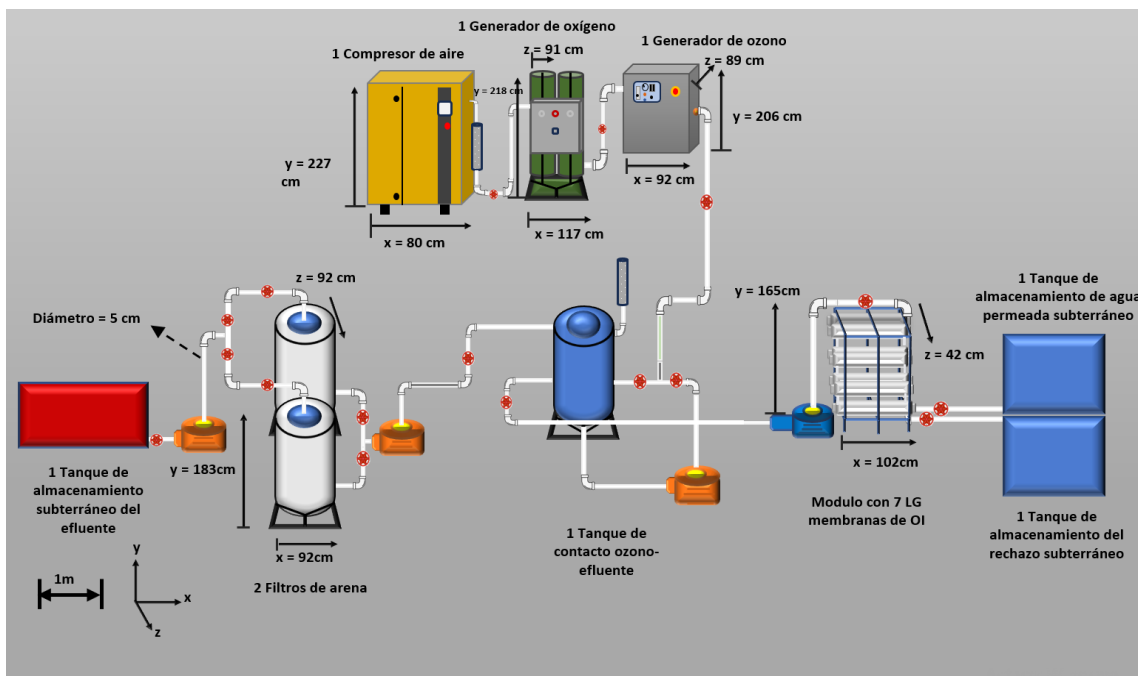


Figura 3.2 Diagrama de flujo de la distribución de los equipos requeridos en el tratamiento de recuperación de agua del efluente industrial. Alternativa 2

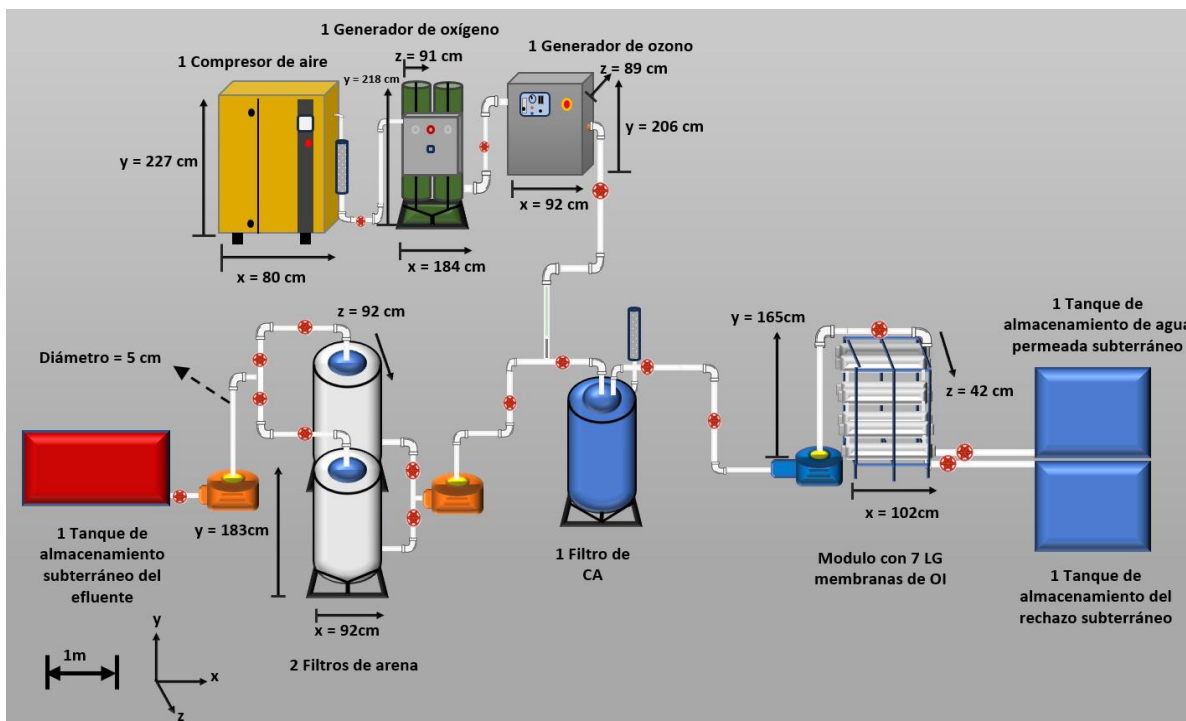


Figura 3.3 Diagrama de flujo de la distribución de los equipos requeridos en el tratamiento de recuperación de agua del efluente industrial. Alternativa 3.

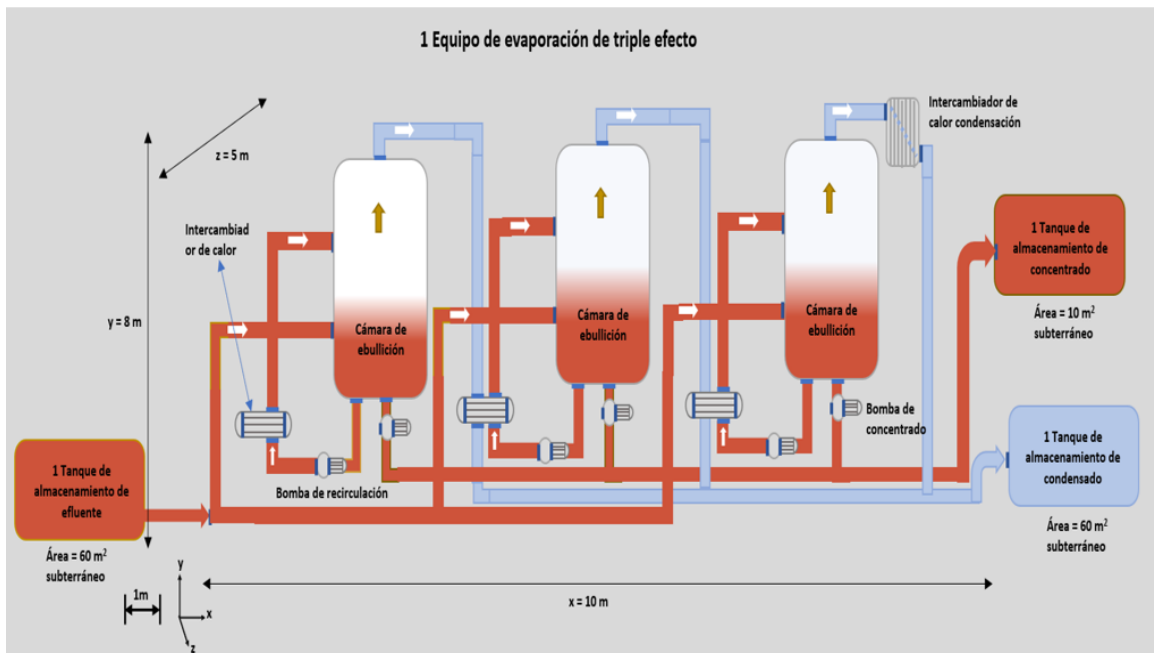


Figura 3.4 Diagrama de flujo de la distribución del equipo de evaporación de triple efecto para la recuperación de agua del efluente industrial. Alternativa 4.

De acuerdo con las especificaciones del equipo de evaporación, la eficiencia estimada del tratamiento a nivel industrial será del 98% quedando el 2% con los residuos de sal y colorantes. Por lo tanto, de los 250 m³/día del efluente tratado el agua recuperada (agua destilada) será 245 m³/día y de residuos tipo salmuera se obtendrán 5 m³/día.

Del agua recuperada en cada alternativa, se propone utilizar el 50% para el lavado de los materiales de los filtros, arena, carbón activado y ósmosis inversa, así como para la limpieza en general de la planta y el 50% restante utilizarla en los procesos de la planta.

3.2 Factibilidad económica de las alternativas de tratamiento del efluente industrial para recuperar agua

Al hacer la evaluación técnica de las alternativas propuestas, se encontró que los equipos necesarios se encuentran disponibles en el mercado, resultando ser factible técnicamente, por lo que se solicitaron cotizaciones para comenzar a analizar los precios y evaluar si los proyectos propuestos para recuperar agua resultaban factibles económicamente para llevarse a cabo.

La tabla 3.7 muestra los precios de los equipos, accesorios y tanques de almacenamiento necesarios para la implementación del proceso de recuperación de agua a nivel industrial.

Tabla 3.7 Precios de las unidades requeridas para el proceso de recuperación de agua para cada alternativa

Etapas del proceso de tratamiento	Instrumento, equipo e insumo requeridos	Unidades requeridas	Costo de inversión (\$MXN)
1. Almacenamiento	Tanque de almacenamiento del efluente	1	110,516.00
2. Filtración con arena	Bomba centrífuga	1	120,251.40
	Unidad de filtración de fibra de vidrio	2	432,188.16
3. Adsorción con carbón activado	Unidad de adsorción con carbón activado	4	723,320.32
	Bomba centrífuga	2	240,502.8
4. Oxidación catalítica O ₃ -CA	Generador de ozono	1	4,142,360.00
	Bomba centrífuga	1	120,251.40
	Generador de oxígeno	1	1,388,993.28
	Compresor de aire	1	1,511,934.72
	Filtro de carbón activado	1	180,830.08
5. Desalación con RO	Módulo con 7 membranas LG de RO	7	6767914.44
	Tanque de almacenamiento del permeado	1	46,621.03
	Tanque de almacenamiento del rechazo	1	46,621.03
6. Evaporación	Equipo de evaporación de 3 efectos	1	21,630,000

El costo anual que gasta la industria para trasladar y tratar el efluente en una planta tratadora externa es de \$3,000,000.00 MXN. Si a esto se suman los costos de energía eléctrica y agua potable, más los costos de mano de obra, da un total de \$5,050,000.00, como se observa en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Costos anuales que gasta la industria por consumo de agua potable y generación de 250 m³/día

Concepto	Inversión (\$MXN)			Flujo de caja (\$MXN)	
	Fija	Diferida	Capital de trabajo	Ingresos	Egresos
Consumo anual de agua potable		1,500,000.00			1,500,000.00
Consumo anual de energía eléctrica		50,000.00			50,000.00
Gastos anuales de traslado y tratamiento del efluente por externos		3,000,000.00			3,000,000.00
Gastos anuales de mano de obra			500,000.00		500,000.00
Egresos totales actuales		4,550,000.00	500,000.00		5,050,000.00

Una vez implementado el proceso, la industria puede generar ahorros ya que evitaría el gasto por traslado y tratamiento del efluente a una empresa externa, y el costo del agua ya que en el proceso se estará recuperando agua de alta calidad para reutilizarse, sin embargo, se generarían gastos por traslado y tratamiento de los residuos generados.

Tras evaluar los costos asociados al envío del efluente a una planta tratadora externa, así como la inversión necesaria para instalar una planta tratadora propia y generar ahorros al evitar los elevados gastos de transporte y tratamiento, resulta indispensable determinar si el proyecto es económicamente factible para su implementación.

De acuerdo con el Banco de México el índice del valor inflacionario promedio del primer trimestre del año 2023 es de 7.5, para el segundo trimestre fue de 4.7 (Banco de México, 2023), para el primer trimestre del año 2024 fue de 4.42 (INEGI, 2024), y considerando como premio al riesgo de 12.5%, calculando la TMAR resulta de 21%, 17.8 y 17.5% para las alternativas 1, 2 y 3, respectivamente.

Para la determinación del costo de operación por alternativa se consideró el costo de la energía utilizada, el costo de la materia prima, el costo de la mano de obra y el costo por la disposición de residuos (material filtrante agotado; arena, carbón activado, cartuchos de membranas), anualmente. Y para la determinación del costo por tratar 1 m³ de efluente se consideró el volumen de agua a tratar (91,250 m³/año) y el costo de operación. La tabla 3.9 muestra un resumen de la evaluación económica de cada una de las alternativas propuestas.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los índices de rentabilidad económica, y al haber obtenido un VPN positivo, se concluye que los proyectos de las alternativas 1, 2 y 3 pueden llevarse a cabo ya que resultó ser factiblemente económico, recuperando la inversión en 2.4 y 3.8 años respectivamente. Sin embargo, para la alternativa 4 no se pueden calcular los índices de rendimiento económico debido a los elevados costos de los equipos y de la disposición de residuos.

Tabla 3.9 Factibilidad económica de las alternativas de tratamiento

Factibilidad	Concepto	Alternativa para recuperar agua			
		1	2	3	4
Económica	Inversión (\$MXN)	12,000,816.10	18,563,945.38	18,636,675.06	37,595,279.99
	Ahorro (\$MXN/año)	4,961,550.00	4,972,450.00	4,971,632.50	NA
	TMAR (%)	21	17.8	17.5	NA
	VPN (\$MXN)	5,404,035.40	496,881.63	585,184.16	NA
	PRI (años)	2.4	3.8	3.8	NA
	TIR (%)	36.7	18.7	18.6	NA
	Energía (\$MXN)	614,707.20	869,068.80	869,068.80	2,005,084.43
	Costo de operación (\$MXN)	2,500,681.60	2,603,216.40	2,595,110.70	NA
	Costo por tratar residuos sólidos (\$MXN)	38,450.00	27,550.00	28,367.5	10,079,250.00
	Costo por 1m ³ de agua tratada (\$MXN)	27.4	28.3	28.4	NA

3.3 Factibilidad ambiental de la operatividad de las alternativas de tratamiento del efluente industrial para recuperar agua

En la evaluación ambiental utilizando la metodología lhobe, del proceso de tratamiento de las alternativas del efluente industrial para recuperar agua, se identificó una relación causa-efecto positiva, ya que el efluente contaminado (entrada) se trata hasta obtener agua con calidad de agua potable (salida). Esto reduce la extracción de agua subterránea promoviendo la sostenibilidad.

Sin embargo, se detectaron impactos negativos potenciales en suelo y agua asociados a la generación de residuos sólidos y líquidos durante el lavado y la regeneración de materiales filtrantes (arena y carbón activado) y la operación de

membranas de ósmosis inversa. Estos efectos fueron analizados mediante una matriz causa-efecto en la que se consideraron condiciones normales, anormales y de emergencia.

Se prevé la generación de residuos cada tres meses, con un cambio anual de materiales agotados, proponiendo su valorización en materiales de construcción y reintegración del agua residual al sistema, lo que reduce significativamente el impacto ambiental.

Las tablas 3.10 a 3.13 muestran la matriz causa-efecto de cada una de las alternativas evaluadas.

El valor obtenido del índice de impacto ambiental (R) en todas las alternativas es igual a 1, que de acuerdo con la tabla 1.15 nos indica que el proyecto tiene un efecto ambiental bajo, por lo tanto, las propuestas de recuperación de agua se pueden implementar y se establece que son factibles ambientalmente.

La tabla 3.14 muestra en resumen el análisis de evaluación ambiental analizado en las cuatro alternativas propuestas de acuerdo con la metodología lhobe.

Tabla 3.10 Matriz causa-efecto y magnitudes de los posibles efectos esperados durante la operación del tratamiento para recuperar agua del efluente industrial

ETAPAS DEL PROCESO DE TRATAMIENTO	EFECTO			CONDICIONES NORMALES Y ANORMALES DE OPERACIÓN					SITUACIONES DE EMERGENCIA				
Actividad	Entrada	Operación	Salida (efecto)	Magnitud	Peligrosidad	Límites de referencia	Sensibilidad al medio	Regulación	Probabilidad	Extensión	Peligrosidad	Sensibilidad al medio	Total del efecto
Filtración con arena	Efluente industrial	Retención de sólidos suspendidos	Efluente Libre de sólidos suspendidos	1	1	1	1	1	2	1	1	1	10
			Arena saturada										
Adsorción con carbón activado	Efluente proveniente del filtro de arena	Retención del color del efluente	Efluente Libre de sólidos suspendidos y color	1	1	1	2	1	2	1	1	2	12
			Carbón saturado										
Membranas de OI	Efluente proveniente de las columnas de carbón activado	Remoción de sales del efluente	Agua recuperada tipo potable y salmuera	1	1	1	2	1	2	1	1	2	12
			Membranas sucias										
Lavado y regeneración de materiales y membranas	Agua para lavado de membranas y materiales	Limpieza y regeneración de materiales y membranas	Efluente de lavado contaminado con moléculas retenidas y agentes químicos	1	1	1	1	3	2	1	1	2	13
	Agentes químicos de limpieza			1	1	1	1	3	2	1	1	2	13
Reemplazo de materiales y membranas	Materiales y membranas nuevas	Retención de sólidos suspendidos, color y sales	Materiales y membranas agotadas	2	2	2	2	3	2	2	2	3	20
Calificación cuantitativa total de los criterios				7	7	7	9	12	12	7	7	12	80
													80

Tabla 3.11 Matriz causa-efecto y magnitudes de los efectos esperados durante la operación del tratamiento para recuperar agua del efluente industrial. Alternativa 2

ETAPAS DEL PROCESO DE TRATAMIENTO	EFECTO			CONDICIONES NORMALES Y ANORMALES DE OPERACIÓN					SITUACIONES DE EMERGENCIA				
Actividad	Entrada	Operación	Salida (efecto)	Magnitud	Peligrosidad	Límites de referencia	Sensibilidad al medio	Regulación	Probabilidad	Extensión	Peligrosidad	Sensibilidad al medio	Efectos totales
Filtración arena con	Efluente industrial	Retención de sólidos suspendidos	Efluente Libre de sólidos suspendidos	1	1	1	1	1	2	1	1	1	10
			Arena saturada										
Oxidación ozono con	Efluente proveniente del filtro de arena	Degradación de color y remoción de DQO	Efluente libre de color	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
			Máxima remoción de DQO										
Membranas de OI	Efluente proveniente de la oxidación con ozono	Remoción de sales del efluente	Agua recuperada tipo potable y salmuera	1	1	1	2	1	2	1	1	2	12
			Membranas sucias										
Lavado y regeneración de materiales y membranas	Agua para lavado de membranas y materiales	Limpieza y regeneración de materiales y membranas	Efluente de lavado contaminado con moléculas retenidas y agentes químicos	1	1	1	1	3	2	1	1	2	13
	Agentes químicos de limpieza			1	1	1	1	3	2	1	1	2	13
Reemplazo de materiales y membranas	Materiales y membranas nuevas	Retención de sólidos suspendidos, color y sales	Materiales y membranas agotadas	2	2	2	2	3	2	2	2	3	20
Calificación cuantitativa total de los criterios				7	7	7	8	12	11	7	7	11	77
													77

Tabla 3.12 Matriz causa-efecto y magnitudes de los efectos esperados durante la operación del tratamiento para recuperar agua del efluente industrial. Alternativa 3

ETAPAS DEL PROCESO DE TRATAMIENTO	EFECTO			CONDICIONES NORMALES Y ANORMALES DE OPERACIÓN					SITUACIONES DE EMERGENCIA				
Actividad	Entrada	Operación	Salida (efecto)	Magnitud	Peligrosidad	Límites de referencia	Sensibilidad al medio	Regulación	Probabilidad	Extensión	Peligrosidad	Sensibilidad al medio	Efectos totales
Filtración con arena	Efluente industrial	Retención de sólidos suspendidos	Efluente Libre de sólidos suspendidos	1	1	1	1	1	2	1	1	1	10
			Arena saturada										
Oxidación catalítica O ₃ -CA	Efluente proveniente del filtro de arena	Degradación de color y remoción DQO	Efluente libre de color	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
			Remoción del 96 % de DQO										
			CA agotado										
Membranas de OI	Efluente proveniente de la oxidación con ozono	Remoción de sales del efluente	Agua recuperada tipo potable y salmuera	1	1	1	2	1	2	1	1	2	12
			Membranas sucias										
Lavado y regeneración de materiales y membranas	Agua para lavado de membranas y materiales	Limpieza y regeneración de materiales y membranas	Efluente de lavado contaminado con moléculas retenidas y agentes químicos	1	1	1	1	3	2	1	1	2	13
	Agentes químicos de limpieza			1	1	1	1	3	2	1	1	2	13
Reemplazo de materiales y membranas	Materiales y membranas nuevas	Retención de sólidos suspendidos, color y sales	Materiales y membranas agotadas	2	2	2	2	3	2	2	2	3	20
Calificación cuantitativa total de los criterios				7	7	7	8	12	11	7	7	11	77 77

Tabla 3.13 Matriz causa-efecto y magnitudes de los efectos esperados durante la operación del tratamiento para recuperar agua por evaporación del efluente industrial. Alternativa 4

ETAPAS DEL PROCESO DE TRATAMIENTO	EFECTO			CONDICIONES NORMALES Y ANORMALES DE OPERACIÓN					SITUACIONES DE EMERGENCIA				
Actividad	Entrada	Operación	Salida (efecto)	Magnitud	Peligrosidad	Límites de referencia	Sensibilidad al medio	Regulación	Probabilidad	Extensión	Peligrosidad	Sensibilidad al medio	Efectos totales
Evaporación	Efluente industrial	Separación líquido-sólido por evaporación	Agua limpia (destilada)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
	Agentes químico-antiincrustantes		Concentrado de sal, colorantes y agentes químicos antiincrustantes	1	3	3	3	3	1	1	2	2	19
Calificación cuantitativa total de los criterios				2	4	4	4	4	2	2	3	3	28 28

Tabla 3.14 Evaluación de la factibilidad ambiental en las cuatro alternativas para la recuperación de agua (metodología lhobe)

Concepto	Alternativa para recuperar agua			
	1	2	3	4
Proceso	Retención de SS Adsorción con CA Desalación con OI	Retención de SS Oxidación con O ₃ Desalación con OI	Retención de SS Oxidación catalítica O ₃ -CA Desalación con OI	Evaporación
Calificación cualitativa de los impactos ambientales	Simple	Simple	Simple	Simple
Índice de impacto ambiental (R)	1	1	1	1
Magnitud de los efectos ambientales	80	77	77	28
Residuos líquidos y sólidos (por año)	5,000 kg	1,000 kg	1,150 kg	1,825 m ³
Agua recuperada (m ³ /año)	100	100	125	245

De acuerdo con la evaluación ambiental del proceso de recuperación de agua de las alternativas, las actividades esperadas durante la operación del proceso dieron como resultado una calificación cualitativa que categoriza los efectos como “simples”. La sensibilidad al medio en situaciones de emergencia presentó una calificación de categorización baja debido a que los residuos generados no se consideran peligrosos.

Finalmente, se propone reutilizar el residuo sólido proveniente del filtro de arena mediante su incorporación en materiales para la construcción. Así mismo, se plantea reincorporar el agua residual generada durante el lavado de equipos al efluente del tratamiento, con el fin de disminuir el impacto ambiental asociado al proceso. Por otro lado, los residuos de salmuera pueden ser considerados para su reutilización en el mismo proceso de la industria alimentaria o en la industria textil, específicamente en la fijación del color durante la fabricación de telas (Mohan & Oke, 2021).

La revalorización de residuos y la regeneración de los materiales filtrantes no solo contribuyen a la sostenibilidad del proceso, sino que también pueden reducir los costos operativos. Además, la incorporación de fuentes de energía renovable permitiría minimizar los impactos ambientales derivados de la operación, promoviendo un sistema más eficiente y respetuoso con el ambiente.

3.4 Análisis de ciclo de vida (ACV) de las alternativas de tratamiento del efluente industrial para recupera agua

Los resultados presentados en este análisis corresponden a 1m³ de efluente tratado, valor que representa la unidad funcional (UF) del presente estudio.

3.4.1 Límites e inventario de los sistemas de estudio (alternativas de tratamiento)

Los límites del sistema incluyen las entradas y salidas de materia prima en las alternativas de tratamiento (carbón activado, arena y los cartuchos de la membrana de ósmosis inversa), equipos, instalación, operación de los tratamientos, consumo de electricidad, químicos de limpieza de los materiales filtrantes, recuperación de agua, las sales del rechazo, los residuos sólidos y su disposición.

En la tabla 3.15 se presentan los datos establecidos como límites de los sistemas y en la figura 3.5 se muestran los diagramas de flujo de los límites del sistema para los procesos de las cuatro alternativas.

Tabla 3.15 Límites del sistema. Entradas y salidas por alternativa propuesta

Alternativa	Entradas	Salidas
Alternativa 1	Efluente Electricidad Material Filtrante (arena, carbón activado y cartuchos de membranas) Agua para lavado de medios filtrantes Agentes químicos de limpieza (H_2O_2)	Residuos sólidos (arena, carbón activado y cartuchos de membrana) Agua para lavado de material filtrante Concentrado de salmuera Agua tratada
Alternativa 2	Efluente Electricidad Material Filtrante (arena y cartuchos de membranas) Agua para lavado de medios filtrantes Agentes químicos de limpieza (H_2O_2)	Residuos sólidos Agua para lavado de material filtrante (arena y cartuchos de membranas) Concentrado de salmuera Agua tratada
Alternativa 3	Efluente Electricidad Material Filtrante (arena, carbón activado y cartuchos de membranas) Agua para lavado de medios filtrantes Agentes químicos de limpieza (H_2O_2)	Residuos sólidos Agua para lavado de material filtrante (arena, carbón activado y cartuchos de membranas) Concentrado de salmuera Agua tratada
Alternativa 4	Efluente Electricidad Agua para lavado Agentes químicos de limpieza (HPMA)	Residuos sólidos Agua para lavado de material filtrante Concentrado de salmuera Agua tratada

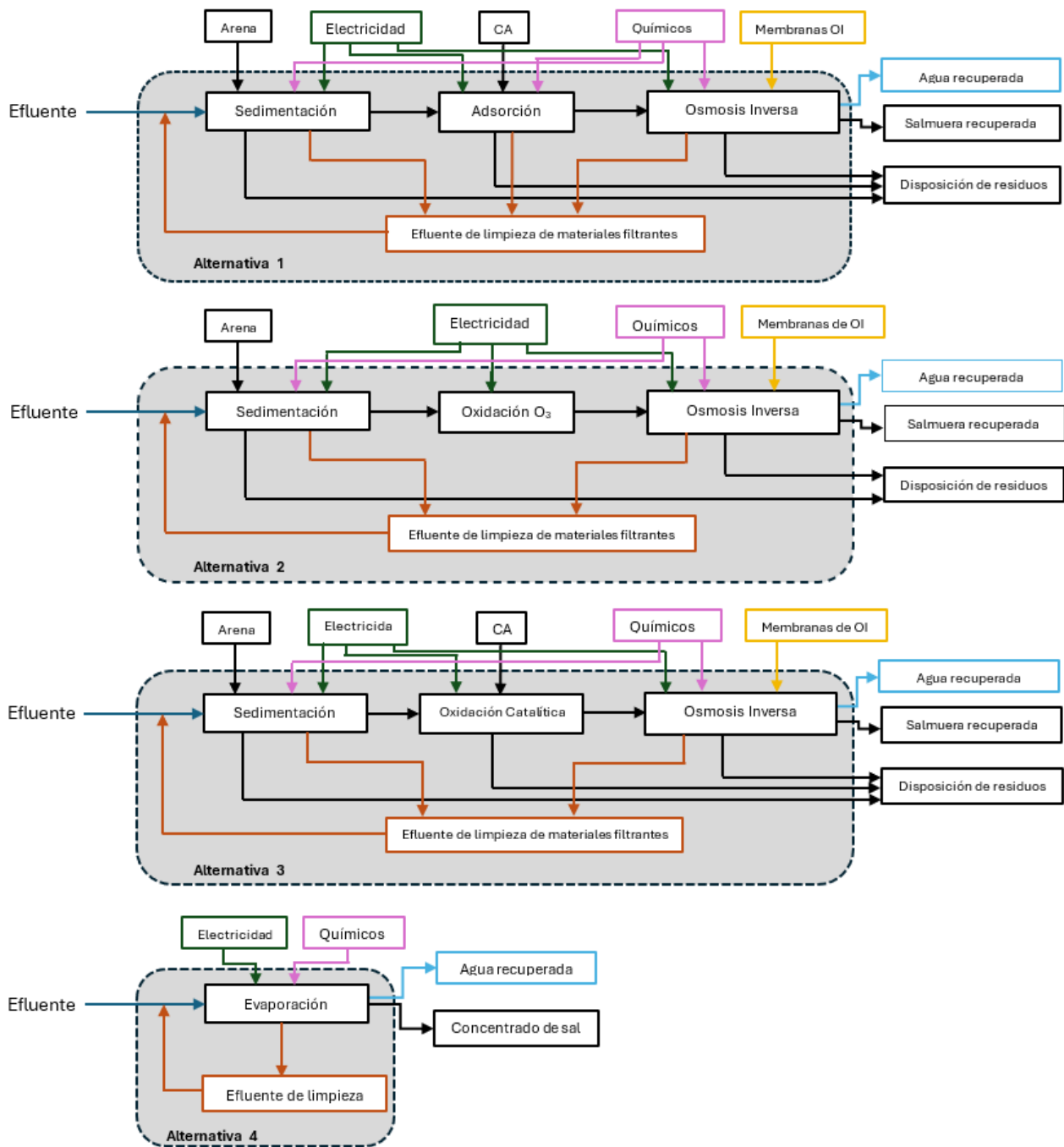


Figura 3.5 Límites del sistema de las 4 alternativas de los tratamientos propuestos para recuperar agua del efluente industrial alimentario

3.4.2 Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

La tabla 3.16 presenta las entradas y salidas para cada proceso en cada una de las alternativas propuestas, considerando 1 m³ del efluente tratado.

Las emisiones de CO₂ se refieren a la cantidad de energía en kWh consumida por el factor de emisión del sistema eléctrico nacional para el cálculo de las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero por consumo de electricidad equivalente a 0.505 t CO₂ eq/MWh (0.505 kg CO₂ eq/KWh) (CRE, 2020).

Los materiales filtrantes son arena para el proceso de sedimentación, carbón activado (CA F300 mesh) para el proceso de adsorción, el material de las membranas de ósmosis inversa es de un nanocompósito de película delgada de polisulfona (TFN), los agentes de limpieza del material filtrante son una solución de Oxyde® al 5% y un antiincrustante para el evaporador. El material filtrante contempla su reemplazo anual con limpiezas cada tres meses.

Las salidas representan los resultados obtenidos al final de cada proceso para cada alternativa. Los residuos sólidos serán enviados a disposición por una empresa externa.

Tabla 3.16 Inventario del Ciclo de Vida para los procesos de cada alternativa para recuperar agua. UF 1m³ de efluente tratado

Inventario		Unidades	Proceso												
			Alternativa 1				Alternativa 2				Alternativa 3				Alternativa 4
			Filtración	Adsorción	Osmosis inversa	Total	Filtración	Oxidación O3	Osmosis Inversa	Total	Filtración	Oxidación catalítica O3-CA	Osmosis inversa	Total	Evaporación
Entradas															
Electricidad		kWh	0.36	0.72	2.39	3.47	0.36	Compresor: 0.6	2.39	4.79	0.36	Compresor: 0.6	2.39	5.15	139.66
								Gen. O2: 0.36				Gen. O2: 0.36			
								Gen. O3: 1.08				Gen. O3: 1.08			
												Filtro CA: 0.36			
Material filtrante	Arena	Kg	0.011	0	0	0.011	0.011	0	0	0.011	0.011	0	0	0.011	0
	Carbón Activado	Kg	0	0.022	0	0.022	0	0	0	0	0	2.74x10 ⁻³		2.74x10 ⁻³	0
Cartuchos de membrana	Nanocomposito (TFN) membrana de polisulfona	Kg	0	0	1.27x10 ⁻³	1.27x10 ⁻³	0	0	1.27x10 ⁻³	1.27x10 ⁻³	0	0	1.27x10 ⁻³	1.27x10 ⁻³	0
Agua para lavado de medios filtrantes		Kg	0.5	1	0.84	2.34	0.5	0	0.84	1.34	0.5	0	0.84	1.34	8
Agentes químicos de	H2O2	Kg	0	0	0.066	0.066	0	0	0.066	0.066	0	0	0.066	0.066	0
	Anhidro polimaléico hidrolizado (HPMA)	Kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Salidas															
Residuos sólidos		Kg	0.011	0.022	1.27x10 ⁻³	0.0343	0.011	0	1.27x10 ⁻³	0.0123	0.011	2.74x10 ⁻³	1.27x10 ⁻³	0.015	0
Agua para lavado de material filtrante		Kg	0.5	1	0.84	2.34	0.5	0	0.84	1.34	0.5	0	0.84	1.34	8

Salmuera	Kg	0	0	0.6	0.6	0	0	0.6	0.6	0	0	0.5	0.5	0.02
Agua tratada	m³	1	1	0.4	0.4	1	1	0.4	0.4	1	1	0.5	0.5	0.98
<i>Emisiones del agua</i>														
Cloruros	Kg	33.5	32	0	0	33.5	22	0	0	33.5	15.1	0	0	1.9
DQO	Kg	3.5	0.05	0	0	3.5	0.28	0	0	3.5	0.15	0	0	0.016
SDT	Kg	51	40	0.63	0.63	51	40	0.63	0.63	51	25	0.63	0.63	0.4
ST	Kg	52	45	0.08	0.08	52	50	0.08	0.08	52	32.2	0.08	0.08	0
<i>Emisiones al suelo</i>														
Sólidos sedimentables	Kg	5.5	0	0	0	5.5	0	0	0	5.5	0	0	0	0
SD	Kg	0	11	0	0	0	0	0	0	0	3.3	0	0	0
Colorantes	Rojo 40	Kg	0	7.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rojo 2	Kg	0	2.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tartrazina	Kg	0	1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Emisiones al aire</i>														
NMVOC	Kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.98
Agua	m³	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.008

3.4.3 Impactos ambientales de la operatividad de las alternativas de tratamiento

Con el propósito de garantizar un análisis comparativo robusto y coherente, los resultados del análisis de ciclo de vida (ACV) se organizaron en cuatro apartados que representan distintos escenarios operativos y tecnológicos del sistema.

1. Escenario base. Se evaluaron los impactos ambientales asociados al efluente cuando es vertido sin recibir ningún tratamiento previo.
2. Escenario 1. Se evaluaron los resultados del ACV de las cuatro alternativas de tratamiento orientadas a la recuperación de agua y reúso del concentrado salino en las alternativas 1, 2 y 3, diferenciando los escenarios.

3.4.3.1 Impactos de punto medio (midpoint)

1. Escenario base. Impactos ambientales del efluente vertido sin tratamiento previo

El efluente vertido sin tratamiento contribuye de manera significativa al impacto de la categoría eutrofización en el agua dulce de los cuerpos receptores, con un impacto total de 32.5 kg P eq. A primera vista, este resultado podría interpretarse como evidencia de una elevada carga de fósforo en el efluente, lo que sugeriría un alto potencial de alteración de los ecosistemas acuáticos.

No obstante, la caracterización detallada del efluente muestra que uno de los componentes principales es la sal, predominantemente cloruro de sodio (NaCl), la cual no contribuye directamente al indicador de eutrofización de agua dulce expresado en kg P eq. Si bien la salinidad puede favorecer procesos de desecación de los cuerpos de agua, este efecto no se contempla en los indicadores del análisis de ACV.

El principal impulsor de la eutrofización es la elevada carga orgánica del efluente, reflejada en una demanda química de oxígeno (DQO) de 4.6 ± 0.10 g/L. Concentraciones elevadas de DQO reducen el oxígeno disuelto tras la descarga en cuerpos de agua, lo que altera indirectamente la dinámica de nutrientes y promueve el crecimiento descontrolado de organismos acuáticos.

En conjunto, estos resultados evidencian que la problemática ambiental del escenario base no se asocia a sales inorgánicas, sino al contenido orgánico del efluente y a su capacidad de generar condiciones propicias para la eutrofización.

2. Escenario 1. Evaluación de emisiones derivadas del tratamiento del efluente en las categorías de impacto ambiental

La tabla 3.17 presenta los resultados del impacto ambiental de las alternativas de tratamiento para cada categoría, los cuales se muestran en las figuras 3.6.

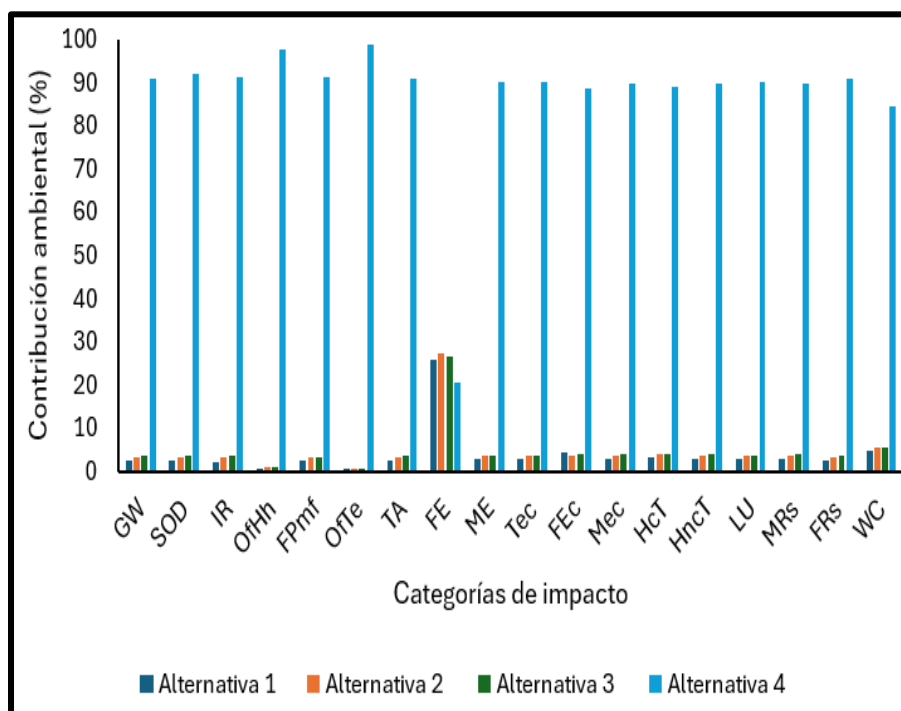


Figura 3.6. Distribución porcentual de la contribución ambiental de las categorías de impacto (midpoint) para las alternativas propuestas

La figura 3.6 muestra el porcentaje de contribución de las cuatro alternativas en las 18 categorías de impacto definidas por el método ReCiPe. La alternativa 4 (Evaporación), representa el 84 % del impacto total, debido principalmente a su elevado consumo de energía eléctrica. Únicamente en la categoría de eutrofización de agua dulce (FE) la contribución se distribuye de forma más equitativa entre las cuatro alternativas, con valores que oscilan entre 18 % y 28 %.

Tabla 3.17 Categorías de impacto (midpoint) por alternativas basado en la unidad funcional (1 m³)

Categoría de impacto	Unidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Calentamiento global (GW)	kg CO ₂ eq	2.41	3.16	3.40	87.76
Agotamiento de ozono estratosférico (SOD)	kg CFC11 eq	2.71E-06	3.71E-06	3.99E-06	1.08E-04
Radiación ionizante (IR)	kBq Co-60 eq	0.11	0.15	0.16	4.23
Formación de ozono salud humana (OfHh)	kg NOx eq	4.49E-03	5.85E-03	6.29E-03	0.64
Formación de materia prima particulada (FPmf)	kg PM _{2.5} eq	3.15E-03	4.10E-03	4.41E-03	0.12
Formación de ozono, ecosistema Terrestre (OfTe)	kg NOx eq	4.77E-03	6.23E-03	6.70E-03	1.21
Acidificación terrestre (TA)	kg SO ₂ eq	6.96E-03	8.99E-03	9.68E-03	0.25
Eutrofización de agua dulce (FE)	kg P eq	2.63E-02	2.81E-02	2.72E-02	0.02
Eutrofización marina (ME)	kg N eq	5.94E-05	7.64E-05	8.18E-05	2.01E-03
Ecotoxicidad Terrestre (Tec)	kg 1,4-DCB	10.74	13.89	14.83	355.60
Ecotoxicidad de agua dulce (FEc)	kg 1,4-DCB	6.11E-02	5.15E-02	5.49E-02	1.29
Ecotoxicidad marina (Mec)	kg 1,4-DCB	6.39E-02	7.96E-02	8.50E-02	2.00
Toxicidad carcinogénica humana (HcT)	kg 1,4-DCB	2.00E-01	2.48E-01	2.63E-01	5.77
Toxicidad no carcinogénica humana (HncT)	kg 1,4-DCB	0.95	1.17	1.25	29.46
Uso de tierra (LU)	m ² a crop eq	1.50E-02	1.82E-02	1.95E-02	0.47
Escasez de recursos minerales (MRs)	kg Cu eq	2.23E-03	2.87E-03	3.07E-03	0.07
Escasez de recursos fósiles (FRs)	kg oil eq	0.77	1.02	1.09	28.30
Consumo de agua (WC)	m ³	9.31E-03	1.07E-02	1.12E-02	0.17

Al mismo tiempo se evaluaron los impactos ambientales excluyendo el consumo de electricidad, con el objetivo de aislar los efectos asociados a los insumos materiales y a los contaminantes emitidos al agua, suelo y aire. Bajo estas condiciones, la distribución de las contribuciones ambientales mostró que la alternativa 1 varía entre 21 % y 66 % según la categoría; la alternativa 2 entre 13 % y 34 %; la alternativa 3 entre 14 % y 33 %; y la alternativa 4 entre 5 % y 100 %.

Para analizar los efectos de los contaminantes liberados al aire, agua y suelo durante la etapa de reacción, se observa que en la eutrofización de agua dulce (FE expresada en kg P eq) el nivel de impacto es similar en las alternativas 1, 2 y 3. En contraste, la alternativa 4 presenta el menor impacto (2.0×10^{-2} kg P eq), lo cual se atribuye a una menor descarga de contaminantes en cuerpos de agua.

En la categoría de formación de ozono (OfTe y OfHh) en la atmósfera se encuentra impulsada principalmente por las emisiones al aire. En la alternativa 4, la etapa de reacción por evaporación se diferencia claramente de las demás alternativas debido a sus emisiones atmosféricas, en particular vapor de agua y compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM). En este contexto, el impacto sobre la salud humana alcanza 0.64 kg NOx eq, y el impacto sobre los ecosistemas terrestres asciende a 1.21 kg NOx eq.

Por otro lado, la toxicidad humana carcinogénica (HcT) representa un impacto significativo principalmente en la alternativa 1 (0.2 kg 1,4-DCB), debido a la adsorción de contaminantes en el suelo, entre estos contaminantes se incluyen sólidos disueltos y colorantes sintéticos, destacando Rojo 40, Rojo 2 y tartrazina.

3.4.4 Impactos ambientales de punto final (Endpoint)

En cuanto a los impactos ambientales en punto final (categoría de daño ambiental), los resultados mostraron que la alternativa 4 presenta la mayor contribución, que oscila entre 0.85 % y 91 % en las áreas de salud humana, ecosistemas y escasez de recursos naturales, principalmente debido a su elevado requerimiento energético. Por otro lado, dentro de la categoría de daño a la salud humana, la alternativa 4 contribuye con un 42 % del impacto global, seguida por la alternativa 1 con un 33 %. Con respecto al daño a los ecosistemas, la alternativa 3 presenta un impacto relativamente bajo, con aproximadamente 8%. En contraste, en la categoría de escasez de recursos naturales, la alternativa 1 registra la mayor contribución con un 33 %, mientras que la alternativa 4 presenta la menor contribución con un 12 %.

De acuerdo con estos resultados, la tabla 3.18 resume las contribuciones totales de los impactos de punto final (endpoint), expresados en puntos (Pt). En esta comparación, la alternativa 1 muestra el puntaje global más bajo, 0.09 Pt, lo que la posiciona como la opción de menor daño bajo estas condiciones. Por otro lado, la tabla 3.18 muestra los resultados cuando se evalúan únicamente los efectos asociados a los insumos, la alternativa 2 alcanza un valor de 13.14 mPt, reflejando el impacto derivado de los procesos específicos que lo componen.

Tabla 3.18 Impactos ambientales en la categoría de daño (endpoint) para las alternativas propuestas, con base a la unidad funcional

Categoría de daño	Unidades	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Salud humana	Pt	8.55E-02	0.111	0.119	3.02
Ecosistemas	Pt	7.28E-03	8.36E-03	8.44E-03	0.137
Recursos	Pt	1.89E-03	2.53E-03	2.72E-03	7.08E-02
Total	Pt	0.09	0.12	0.13	3.22

Tabla 3.19 Impactos ambientales en la categoría de daño (endpoint) para las alternativas propuestas asociados a los insumos

Categoría de daño	Unidades	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Salud humana	mPt	20.48	7.86	8.25	26.39
Ecosistemas	mPt	4.97	5.17	5.01	45.34
Recursos	mPt	0.13	0.11	0.11	0.05
Total	mPt	25.58	13.14	13.38	71.78

3.4.5 Análisis de sensibilidad de la operatividad de las alternativas de tratamiento

Para el análisis de sensibilidad, se evaluó el efecto de incorporar el consumo de energía renovable mediante la modelación de la integración de un módulo de tecnología de paneles solares fotovoltaicos para México, cubriendo el 50% de la demanda total de electricidad por escenario. Las categorías de impacto midpoint correspondientes y sus valores en unidades estándar se presentan en la tabla 3.20, mientras que la reducción porcentual, que varía entre 1% y 48%, se ilustra en la figura 3.7.

Tabla 3.20 Categorías de impacto midpoint para las alternativas actuales que incluyan consumo de electricidad proveniente de energía renovable fotovoltaica.

Categoría de impacto	Unidad	A1	A1 (solar)	A2	A2 (solar)	A3	A3 (solar)	A4	A4 (solar)
GW	kg CO ₂ eq	2.41	1.43	3.16	1.80	3.40	1.93	87.76	47.41
SOD	kg CFC11 eq	2.71E-06	1.41E-06	3.71E-06	1.92E-06	3.99E-06	2.06E-06	1.08E-04	5.51E-05
IR	kBq Co-60 eq	0.11	0.07	0.15	0.09	0.16	0.09	4.23	2.37
OfHh	kg NO _x eq	4.49E-03	2.73E-03	5.85E-03	3.42E-03	6.29E-03	3.68E-03	0.64	0.57
FPmf	kg PM _{2.5} eq	3.15E-03	1.95E-03	4.10E-03	2.44E-03	4.41E-03	2.63E-03	0.12	0.07
OfTe	kg NO _x eq	4.77E-03	2.90E-03	6.23E-03	3.64E-03	6.70E-03	3.92E-03	1.21	1.13
TA	kg SO ₂ eq	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.25	0.14
Tec	kg 1,4-DCB	10.74	9.42	13.89	12.05	14.83	12.85	355.60	307.72
HcT	kg 1,4-DCB	0.20	0.17	0.25	0.20	0.26	0.22	5.77	4.44
HncT	kg 1,4-DCB	0.95	0.96	1.17	1.18	1.25	1.27	29.46	29.68
LU	m ² a crop eq	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.47	0.37
FRs	kg oil eq	0.77	0.45	1.02	0.57	1.09	0.61	28.30	15.05

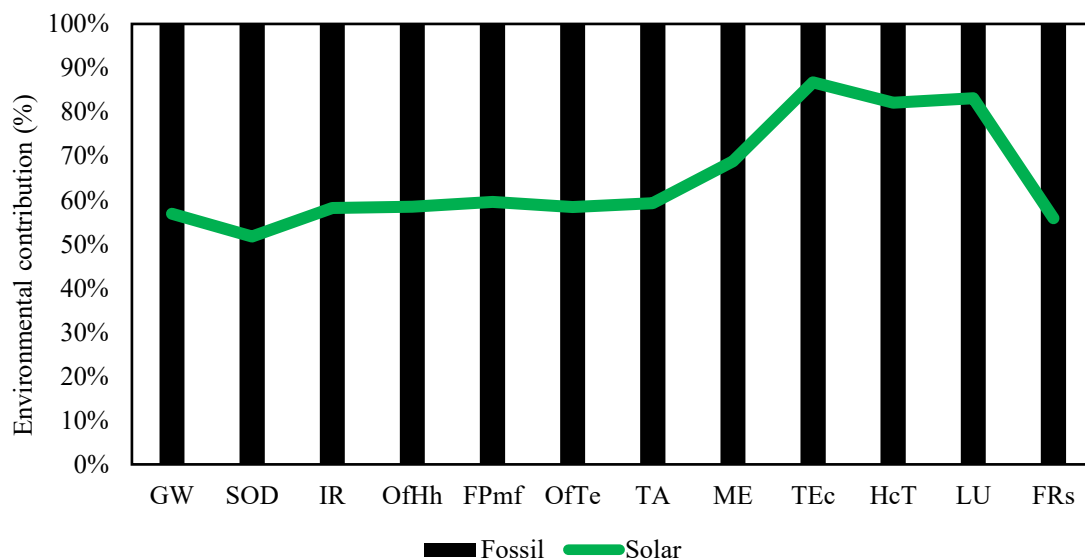


Figura 3.7 Análisis de sensibilidad, efecto de energía fotovoltaica en la categoría de impactos ambientales en las cuatro alternativas propuestas.

La implementación de esta fuente de energía renovable resultó en una disminución en 12 de las 18 categorías de impacto analizadas previamente.

Por otro lado, al considerar el uso de la sal recuperada del rechazo de la ósmosis inversa, el escenario 3 permitió estimar los criterios ambientales derivados de sustituir la sal virgen por el subproducto generado durante el tratamiento del efluente. Al integrar este flujo de valorización en el modelo, se cuantificó la reducción neta de impactos en categorías clave como uso de recursos minerales, calentamiento global y ecotoxicidad, proporcionando una visión más completa del potencial de recuperación y aprovechamiento de subproductos dentro del sistema.

Los resultados del análisis demuestran que la recuperación de agua y sales a partir de efluentes salinos contribuye directamente a la sostenibilidad del sistema productivo. El agua recuperada puede reutilizarse en procesos industriales y servicios auxiliares, lo que reduce la demanda de fuentes externas y alivia la opresión sobre los acuíferos locales. De manera simultánea, la recuperación de sales disueltas (principalmente NaCl) evita los impactos ambientales asociados con su producción y transporte convencionales, al tiempo que genera beneficios económicos al disminuir la necesidad de materias primas nuevas.

Los resultados del ACV indican que la ósmosis inversa (OI) es el proceso principal responsable de la recuperación de agua, con impactos ambientales dominados por el consumo de electricidad y su contribución al potencial de calentamiento global (GWP). Sin embargo, al incluir beneficios ambientales por sustitución de agua dulce o subterránea, el impacto neto se reduce de manera sustancial. De forma similar, la recuperación de salmuera reutilizable proporciona beneficios ambientales adicionales al evitar la producción y el transporte de sal virgen, además de reducir las cargas de descarga salina y los costos operativos (Elginoz et al., 2022).

En conjunto, la reutilización de agua y la valorización de la salmuera se consolidan como estrategias eficaces para mitigar impactos ambientales globales, particularmente en las categorías de calentamiento global, uso de recursos hídricos y salinización de suelos y cuerpos de agua. Estos hallazgos resaltan la importancia de integrar tecnologías de recuperación dentro de los límites del sistema industrial, promoviendo una transición hacia modelos de producción circulares y eficientes en el uso de recursos, con menores cargas ambientales.

En la literatura diversas investigaciones han abordado la evaluación de impactos ambientales de tecnologías para tratar y recuperar agua empleando Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Este análisis permite comparar alternativas de tratamiento considerando sus impactos, lo que ha contribuido a identificar opciones más sostenibles y eficientes en distintos contextos. Entre las investigaciones realizadas se encuentran las siguientes.

Rodríguez et al. (2018) compararon dos tratamientos de aguas residuales contaminadas con Cr(VI) provenientes de una planta de cromo-platino mediante un análisis de ciclo de vida (ACV) y una evaluación tecno económica. Utilizando la metodología ReCiPe 1.06 y el software GaBi 6.0, evaluaron categorías de impacto en midpoint y endpoint. Los resultados mostraron que el escenario que incluye intercambio iónico y fotocátalisis presentó menores impactos ambientales, aunque con mayores costos operativos (48,654 € frente a 39,703 €). El impacto ambiental más significativo se atribuyó al uso de productos químicos, especialmente en la regeneración de resinas.

Igos et al. (2021) evaluaron tecnologías avanzadas para la remoción de microcontaminantes, comparando carbón activado en lecho fluidizado (μ GAC y PAC) con ozonación. Usaron SimaPro v9 y el método USEtox. Los escenarios con μ GAC presentaron menores impactos netos, mientras que PAC tuvo el mayor impacto ambiental, debido a su cadena de suministro intensiva en energía. Ozonación resultó más eficiente en la eliminación de ciertos compuestos, aunque con impactos intermedios.

Capa et al. (2022) analizaron el tratamiento y recuperación de agua industrial mediante ultrafiltración, carbón activado, ósmosis inversa y desinfección UV. Usaron SimaPro 9.1, ReCiPe 2016 y CML-IA. Encontraron que el consumo eléctrico representa más del 90% de los impactos ambientales. Aunque el proceso de recuperación implica una alta carga energética, los beneficios ambientales asociados a la reducción en el consumo de agua nueva justifican su implementación.

Mayor y colaboradores (2022), realizaron un análisis ambiental y económico de la recuperación de nitrógeno y fósforo en una PTAR mediante estruvita e intercambio iónico. Compararon este enfoque con el uso de fertilizantes convencionales. A través del software OpenLCA y el método ReCiPe 2016, observaron que el escenario de recuperación tiene menores impactos ambientales en la mayoría de las categorías. No obstante, el alto consumo de químicos resultó en un valor presente neto negativo, aunque su viabilidad económica podría mejorar con el aumento del precio de los nutrientes recuperados.

Tarpani & Azapagic (2023) evaluaron la sostenibilidad del tratamiento avanzado de aguas residuales y lodos considerando aspectos ambientales, económicos y sociales. Utilizaron ReCiPe y definieron como unidad funcional 1000 m³ de efluente y 1000 kg de lodo seco. Nanofiltración resultó ser la alternativa más sustentable en el tratamiento de aguas, mientras que la digestión anaerobia fue la opción preferida para lodos. Ozonación y carbón activado presentaron buenos resultados ambientales, pero con mayores costos operativos.

Simsek & Yetis (2024) evaluaron tres escenarios de tratamiento de efluentes textiles mediante membranas (UF, NF y UF-NF). Aplicando ReCiPe 2016 Endpoint con SimaPro v9.2 y simulaciones con WAVE, concluyeron que UF presenta los menores impactos ambientales, especialmente cuando se utiliza energía renovable. Las principales categorías de impacto fueron formación de materia orgánica particulada, calentamiento global y salud humana.

3.5 Gestión de residuos. Monitoreo y Mitigación

La recuperación de agua del efluente industrial fue evaluada por cuatro alternativas de tratamiento, cada una con un enfoque distinto de residuos y medidas de monitoreo y mitigación ambiental. Los residuos principales generados en las tres primeras alternativas son material filtrante (arena, carbón activado y membranas agotadas), así como salmuera proveniente del rechazo de la ósmosis inversa, los

cuales no se consideran tóxicos, pero requieren manejo especial según la normatividad vigente, y en la cuarta alternativa se obtiene un concentrado de sales con colorantes.

La alternativa 1 contempla la generación de filtros y confinamiento adecuado de material agotado, la alternativa 2, al sustituir carbón activado por ozono, se reducen los residuos enfatizando dar mantenimiento al equipo de ozono para evitar fugas. La alternativa 3 al utilizar carbón activado como catalizador se generan residuos, sin embargo, estos son parcialmente regenerados por ozono. Finalmente, la alternativa 4 más avanzada pero costosa, se proponen tecnologías de vertido cero como la cristalización enfocada a recuperar agua de alta calidad minimizando el concentrado de sales.

En caso de detectarse alteraciones en los resultados de los tratamientos, como variaciones en la calidad del agua recuperada, el protocolo general incluye lo siguiente:

- Monitoreo continuo de los parámetros de la calidad del agua.
- Regeneración o sustitución del material filtrante (arena, carbón activado y membranas).
- Revisión del estado de los equipos y cambio de proveedor si se detecta agotamiento prematuro en los materiales filtrantes.
- Mantenimiento preventivo de equipos como el generador de ozono y evaporadores.
- Dar soluciones técnicas como el uso de antiincrustantes, modificación de pH y ajuste de condiciones operativas (presión y temperatura) para mantener la eficiencia de los tratamientos.

En las cuatro alternativas, se incluyen programas de gestión ambiental para una de residuos urbanos y especiales, así como capacitación del personal, garantizando así el control de impactos al suelo y al agua durante todo el proceso.

3.6 Obtención de una propuesta sostenible de tratamiento del efluente industrial para recuperar agua

La tabla 3.21 presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada aspecto evaluado en las alternativas de tratamiento. Entre ellas se observa que la alternativa 3 ofrece mayores ventajas en comparación con las demás, lo que la posiciona como una alternativa sostenible en la recuperación de agua. En consecuencia, se recomienda para su implementación a nivel industrial.

Tabla 3.21 Evaluación de sostenibilidad de acuerdo con la factibilidad técnica, ambiental y económica de las cuatro alternativas

Factibilidad	Concepto	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Técnica	Proceso para recuperar agua	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
	Equipos	Disponibles	Disponibles	Disponibles	Disponibles
	Espacio requerido	Disponible	Disponible	Disponible	No disponible
	Personal requerido	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
	Mejoras de tratamiento	Reúso de material filtrante (arena y carbón activado)	Reúso de material filtrante (arena)	Reúso de material filtrante (arena)	Tratamiento previo para remover color y reutilizar el concentrado de sal
Ambiental	Índice de impacto ambiental (R)	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
	Efectos ambientales	Moderados	Moderados	Moderados	Bajos
	Residuos generados	Moderados	Bajo	Bajo	Alto
	Calidad de agua recuperada	Potable	Potable	Potable	Potable
	Análisis de ACV	Moderado	Bajo	Bajo	Alto
Económica	Inversión	Recuperable	Recuperable	Recuperable	Alto
	Tiempo de recuperación de la inversión	Bajo	Bajo	Bajo	ND
	VPN	Positivo	Positivo	Positivo	ND
	Costo por tratar 1m ³ de efluente	Bajo	Bajo	Bajo	ND
	Costos de operación	Medio	Medio	Medio	ND
	Consumo eléctrico requerido	Medio	Medio	Medio	Alto

ND: No definido

Los resultados presentados en la tabla 3.21 muestran la evaluación de la factibilidad técnica, ambiental y económica de las alternativas propuestas, las cuales muestran

diferencias en el desempeño para la recuperación de agua. Entre ellas, la alternativa 3 se posiciona como la opción más equilibrada y sostenible, al integrar un desempeño técnico confiable, bajo nivel de residuos y una recuperación eficiente de agua con características de calidad potable.

Desde el punto de vista técnico, las cuatro alternativas cumplen con el objetivo de recuperar agua, cuentan con equipos disponibles y requieren bajo personal operativo. Sin embargo, la alternativa 3 presenta una mejora significativa en el proceso de tratamiento, debido a la combinación de retención de sólidos y oxidación, la cual facilita una operación estable y repetible. A diferencia de la alternativa 4, que requiere espacio superior al disponible y un tratamiento adicional para la recuperación de sales.

En términos de recuperación de recursos, la alternativa 3 presenta el mayor volumen de agua recuperada superando las alternativas 1 y 2. Este resultado se debe a la combinación eficiente de retención de sólidos, oxidación y permeación, lo que garantiza una producción estable de agua con características de calidad potable, la cual puede ser aprovechada directamente en la planta, evitando la necesidad de descargas al ambiente y reduciendo la demanda de recursos hídricos.

En cuanto a la generación de residuos, la alternativa 3 sobresale por registrar los valores más bajos junto con la alternativa 2, ya que el carbón activado utilizado como catalizador se regenera por acción del ozono evitando el aumento de residuos en dicha alternativa. Por el contrario, la alternativa 4 genera volúmenes elevados de residuos sin la opción de reutilizarse debido a la presencia de colorantes en el concentrado final, lo cual implica mayores costos de gestión y riesgos ambientales, así como restricciones operativas vinculadas al consumo de energía.

La evaluación económica refuerza su viabilidad. Con una inversión recuperable, periodo de retorno corto, costos de operación medios, VPN positivo y el costo por tratar el agua bajo, la alternativa 3 ofrece beneficios financieros comparables a los de las alternativas 1 y 2, sin recurrir a los incrementos de consumo eléctrico o complejidad asociados a la alternativa 4.

En base a la evaluación técnica, ambiental y económica, la alternativa 3 se identifica como la opción más sostenible y recomendable para su implementación a nivel industrial con el fin de recuperar agua y sal para su reúso. Los resultados obtenidos indican que, para maximizar la sostenibilidad del proceso de tratamiento del efluente, se sugiere complementar esta alternativa con una fuente de energía alternativa favoreciendo así la eficiencia energética y la viabilidad del sistema.

En la literatura científica se dispone de un número limitado de estudios que evalúen de manera integrada la factibilidad técnica, ambiental y económica de proyectos de recuperación de agua mediante tecnologías de membrana a escala industrial. No obstante, los pocos trabajos reportados coinciden en señalar que la recuperación de agua mediante estos sistemas es económicamente viable, presentando periodos de retorno de inversión relativamente cortos y una operación financieramente sostenible.

Li y colaboradores en 2020, probaron un proceso híbrido de membranas de un biorreactor con nanofiltración para tratar agua residual proveniente de la industria textil a nivel piloto, reportando que el proceso es adecuado para recuperar agua de alta calidad presentando beneficios obteniendo ingresos de hasta \$1.24 MUSD/año y un periodo de recuperación de la inversión de 3.11 años (Li et al., 2020).

Trabajos reportados en la literatura sobre el uso de ozono como tratamiento terciario demostraron resultados eficientes en comparación con otros procesos, por ejemplo, Zagklis y Bampos en 2022, construyeron una herramienta de toma de decisiones comparando varios métodos de tratamiento terciario reportando que la ozonización es uno de los métodos más adecuados de acuerdo con los aspectos técnico, económico y ambiental seleccionados por el usuario. Por ejemplo, el costo de ozono como tratamiento terciario fue de 0.030 EUR/m³ en comparación con foto fentón que presentó un costo de 0.405 EUR/m³, en el aspecto ambiental el ozono genera 0.219 Kg CO₂ eq/m³ y para foto fentón genera 0.549 eq/m³ (Zagklis & Bampos, 2022).

Vega-Álvarez y colaboradores en 2023, investigaron la degradación de un efluente industrial proveniente de la industria de aditivos alimentarios utilizando tratamientos

de oxidación catalítica de oxígeno y ozono con carbón activado (25, 50 y 100 mL) como catalizador. La remoción de color fue efectiva en cada tratamiento a diferentes periodos de tiempo, en la oxidación catalítica O_3 -CAG se alcanzó el 99% de remoción de color y DQO en 6 minutos de contacto usando 50 mL de lecho de CAG/100 mL y 2 mg O_3 /L, siendo el tratamiento más eficiente en comparación con el tratamiento de O_2 -CAG (72 g O_2 /L). Reportaron que el proceso mejora la vida operacional del catalizador, debido a que el ozono regenera el CAG presentando un agotamiento después de 60 ciclos, en el caso de O_2 -CAG el agotamiento se presenta a los 18 ciclos (Vega-Álvarez et al., 2023).

Shokouhi y colaboradores en 2020, realizaron un estudio comparativo entre un tratamiento de ozono y ozono catalizado con CA para degradar azul reactivo 194 (RB194), reportando que la degradación del colorante y la reducción de DQO fue más efectiva con O_3 -CA que, con solo ozono, también encontraron que la degradación del contaminante se incrementa cuando aumenta la concentración de NaCl. Por otro lado, el CA se regenera por acción del ozono modificando las características superficiales del CA por la adición de oxígeno. Concluyen que el ozono catalizado con CA es sugerido como una tecnología prometedora para remover colorantes de efluentes industriales salinos (Shokouhi et al., 2020).

Por otro lado, se han reportado investigaciones sobre el uso de evaporadores para recuperar agua de efluentes salinos, con el objetivo de minimizar los efectos ambientales y recuperar mayor cantidad de agua (vertido de líquido cero, ZLD).

Panagopoulos y Giannika en 2024, realizaron un análisis tecno-económico de dos sistemas de tratamiento para desalinizar agua recuperando agua con descarga de líquido cero (ZLD), utilizando cristalizador con membrana (MPC) y evaporación intensificada con el viento (WAIV). Los resultados muestran que con el tratamiento MPC se obtiene una eficiencia del 96% en la recuperación de agua y para WAIV se obtiene el 84 %. La energía necesaria para el tratamiento de MPC es de 19 kWh/m³ con un costo de \$95 US/día mientras que para WAIV es de 15 kWh/m³ con un costo de \$83 US/día. Los autores proponen que se utilice WAIV para tratamientos de

salmueras de plantas desalinizadoras o para empresas que generen efluentes salinos (Pangopoulos & Giannika, 2024).

De acuerdo con lo expuesto por los investigadores en los artículos reportados en la literatura, se puede recuperar la sal proveniente del efluente tratado y obtener un producto de valor agregado, para esto se requiere agregar un equipo para remover color como la osmosis inversa y otro equipo para cristalizar la sal y recuperar más agua en el cual el proceso cumpliría con el objetivo principal de la evaporación que es el de vertido de líquido cero (ZLD).

4. CONCLUSIONES

Se evaluó la sostenibilidad de cuatro alternativas de tratamiento para la recuperación de agua a partir de un efluente industrial generado en una planta dedicada a la producción de aditivos alimentarios, con un volumen de descarga de 250 m³/día. Las alternativas evaluadas incluyeron: (1) Retención de sólidos suspendidos, adsorción con carbón activado (CA) y osmosis inversa (OI), (2) Retención de sólidos suspendidos, oxidación con ozono y osmosis inversa (OI), (3) Retención de sólidos suspendidos, oxidación catalítica O₃-CA y osmosis inversa (OI) y (4) Evaporación completa.

La evaluación de sostenibilidad confirmó que los equipos requeridos para todas las alternativas son comercialmente accesibles y que el índice de impacto ambiental asociado presenta un valor de 1, lo que clasifica como riesgo ambiental bajo. El análisis económico mostró que las inversiones iniciales pueden recuperarse en periodos que oscilan entre 2.5 y 3.8 años para las alternativas 1, 2 y 3, lo que demuestra una viabilidad financiera para la industria.

No obstante, la generación de residuos constituye un factor crítico en la evaluación. La alternativa 4 produce la mayor cantidad de residuos sólidos debido a la alta concentración de sales y colorantes en el concentrado evaporado, generando costos de disposición que superan el costo de enviar el efluente a una planta externa. En contraste, la alternativa 2 genera menores residuos al sustituir el adsorbente granular por ozono, mientras que la alternativa 3 presenta una producción de residuos aún más reducida, ya que el carbón activado empleado en la catálisis es regenerado in situ con ozono, disminuyendo sustancialmente los desechos asociados.

En cuanto a los costos de inversión, la alternativa 4 requiere la inversión inicial más elevada, mientras que la alternativa 1 presenta la menor. Sin embargo, ambas generan mayores costos operativos derivados de la gestión de residuos. Las alternativas 2 y 3 poseen inversiones y costos de operación similares, recuperando la inversión en aproximadamente 3.8 años; no obstante, la alternativa 2 mostró

mayor eficiencia en la oxidación de colorantes y en la recuperación de agua, aunque la alternativa 3 obtuvo un desempeño más equilibrado en los tres ejes de sostenibilidad.

Los resultados del ACV evidenciaron que el impacto dominante en el escenario base proviene de la alta carga orgánica del efluente, mientras que en las alternativas de tratamiento el consumo eléctrico define gran parte del perfil ambiental. La incorporación de energía renovable permitió una reducción sustancial de los impactos asociados a los procesos de tratamiento, y el uso de las sales recuperadas añadió beneficios ambientales relevantes al evitar la utilización de sal nueva. Entre todas las alternativas evaluadas, la alternativa 3 presentó el mejor desempeño ambiental global al equilibrar eficiencias de tratamiento, reducción de impactos y potencial de recuperación de recursos, por lo que se posiciona como la opción más sostenible para su implementación a nivel industrial.

Finalmente, el bioensayo de toxicidad con semillas de *Lactuca sativa* reveló que el agua recuperada en las cuatro alternativas presenta baja o nula toxicidad.

Con base en la evaluación técnica, económica y ambiental, se concluye que la Alternativa 3 es la opción más sostenible para su implementación industrial, al mostrar el mejor equilibrio entre eficiencia de tratamiento, costos operativos, recuperación de agua y minimización de residuos.

5. REFERENCIAS

Absolute Ozone. (2023, Octubre 20). *Absolute Ozone*. Retrieved from Dimensionamiento de equipos de ozono: <https://es.absoluteozone.com/biblioteca/dimensionamiento-de-equipos-de-ozono/>

Agudelo Ospinosa, J. J. (2021). *Diseño computarizado de carreteras* (Primera Edición ed.). Medellin, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT. <https://doi.org/978-958-720-023-2>

Agudelo, E., Gaviria-Restrepo, L., Barrios-Ziola, L., & Cardona-Gallo, S.-A. (2018). Techniques to determine toxicity in industrial wastewater contaminated with dyes and pigments. *DYNA*, 85(207), 316-327. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.71915>

Ahangarnokolaei, M. A., Attarian, P., Ayati, B., Ganjidoust, H., & Rizzo, L. (2021). Life cycle assessment of sequential and simultaneous combination of electrocoagulation and ozonation for textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106251>

Alkhatib, A., Ayari, M. A., & Hawari, A. H. (2021). Fouling mitigation strategies for different foulants in membrane distillation. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 167, 1-31.

Alsehli, M., Choi, J.-k., & Alijuhan, M. (2017). A novel design for a solar powered multistage flash desalination. *Solar Energy*, 153, 348-359. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.082>

Amoatey, P., & Bani, R. (2011). *Wastewater Management*. ResearchGate.

APHA. (1992). *Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales* (17 ed.). Madrid: Díaz de Santos.

- APHA. (2023). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition* (23rd ed.). American Public Health Association. <https://doi.org/https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.150>
- Araulo Arévalo, D. (2021). *Proyectos de inversión. Análisis, formulación y evaluación práctica* (1 ed.). México: Trillas. <https://doi.org/978-970-10-7346-9>
- Arreguín Sámano, M., González Elías, J. M., Delgado Hernández, J. L., & Carrillo Espinoza, G. (2013). Evaluación económica de la planta purificadora de agua en Infiernillo, municipio de Arteaga, Michoacán. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 32, 246-256. <https://doi.org/http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14125584008>
- Bagur-González, M. G., Martín, F. J., & Morales, S. (2011). Toxicity assessment using *Lactuca Sativa* L. bioassay of the metal(loid)s As, Cu, Mn, Pb and Zn in soluble-in-water saturated soil extracts from an abandoned mining site. *Journal of Solids and Sediments*, 11, 281-289. [https://doi.org/ DOI 10.1007/s11368-010-0285-4](https://doi.org/DOI%2010.1007/s11368-010-0285-4)
- Ball, P. (2000). Scale-up and scale-down of membrane-based separation processes. *Feature*, 2000(117), 10-13. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-2118\(00\)86634-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-2118(00)86634-3)
- Banco de México. (2023, noviembre 16). *Banco de México*. Retrieved from Resumen visual. Informe trimestral abril- junio 2023: <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/resumenes-visuales/informe-trimestral-html/informe-trimestral-abr-jun-00002.html>
- Banco de México. (2023). *Portal de inflación*. Retrieved April 4, 2023, from <https://www.banxico.org.mx/tipcamb/main.do?page=inf&idioma=sp>
- Barrios-Ziolo, L., Gaviria-Restrepo, L., Agudelo, E., & Cardona-Gallo, S. (2015). Technologies for the removal of dyes and pigments present in wastewater. A review. *DYNA*, 118-126.

- Benites, A. E., Castañeda, O. C., Acosta, S. E., & Rengifo, M. (2022). Tecnología limpia para tratamiento de aguas residuales domésticas: hidrocavitación dinámica-ozono. *20th LACCEI international Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 1, 1-7. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.780>
- Bilinska, L., Blus, K., Bilinska, M., & Gmurek, M. (2020). Industrial Textile Wastewater Ozone Treatment: Catalyst Selection. *Catalyst*, 10(611), 1-16. <https://doi.org/doi:10.3390/catal10060611>
- Calderón-Mólgora, C., Quezada-Jiménez, M. L., Segura, B., & Hernández, Y. (2012). Remoción de arsénico mediante procesos de membrana. *Tecnología y ciencias del agua*, III, 31-51. <https://doi.org/https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531980003>
- Calvo Aguilar, A. D., & Muro Urista, C. R. (2021). *Análisis integral de factibilidad de inversión en procesos para la recuperación de agua a partir de un efluente industrial*. Metepec: TecNM.
- Capa, S., Özdemir, A., Günkaya, Z., Özkan, A., & Banar, M. (2022). An Environmental and economic assessment based on life cycle approaches for industrial wastewater treatment and water recovery. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 1-14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103002>
- Castañedo, Z. A., Aguila, E., Meneses-Marcel, A., Sifontes, S., Seijo, M., & Santana, A. (2019). Bioensayo de toxicidad aguda en tres biomodelos utilizando compuestos de referencia. *Toxicología*, 36(2), 127-142. <https://doi.org/https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91967023007>
- Castro-Muñoz, R., Fíla, V., Rodríguez-Romero, V., & Yáñez-Fernández, J. (2017). Water prodyuction from food precessing wastewaters using integrated membrane systems: A sustainable approach. *Tecnología y Ciencias del agua*, 8(6), 129-136. <https://doi.org/https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-09>

- Catenacci, A., Peroni, M., Gievers, F., Mainardis, M., Pasinetti, E., & Malpei, F. (2022). Integration of sludge ozonation with anaerobic digestion: From batch testing to scenario analysis with energy, economic and environmental assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 186, 1-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106539>
- CFE. (16 de Noviembre de 2023). *Comisión Federal de Electricidad*. Obtenido de Industria: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/DemandaIndustrialSub.aspx>
- CFE. (2023). *Comisión Federal de Electricidad*. Retrieved Febrero 25, 2023, from <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Industria.aspx>
- CFE. (2024, Octubre 16). *Comisión Federal de Electricidad*. Retrieved from Industria: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/DemandaIndustrialSub.aspx>
- Chen, Q., Burhan, M., Shahzad, M. W., Ybyraiymkul, D., Akhtar, F. H., Li, Y., & Ng, K. C. (2021). A zero liquid discharge system integrateing multi-effect distillation and evaporative crystallization for desalination brine treatment. *Desalination*, 502, 1-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114928>
- Chiavola, A., Salvati, C., Bongirolami, S., Di Marcantonio, C., & Boni, M. R. (2021). Techno-economic evaluation of ozone for sludge reduction at the full scale. Comparasion between the application to the return sludge (RAS) and the sludge digestion unit. *Journal of Water Process Engineering*, 42, 1-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102114>
- Collin , J. G., Yan Yan, F., Yun Hin, T.-Y., Chuan Kian, P., Janice L. H., N., & Gianluca Li, P. (2021). Ozonation treatment processes for the remediation of detergent

- wastewater: A comprehensive review. *Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 1-86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106099>
- CONAGUA. (2011). *Estadística del Agua en México*. Obtenido de Capítulo 8. Agua en el mundo: http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/sina/capitulo_8.pdf
- Condorchem. (13 de Agosto de 2024). *Condorchem Enviro Solutions*. Obtenido de Gestión de aguas salinas y tratamiento de salmueras industriales: <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-aguas-salinas-en-la-industria/>
- CRE. (27 de febrero de 2020). Comisión Reguladora de Energía . *Factor de Emisión del sistema Eléctrico Nacional 2019*. Ciudad de México, México.
- Cruz-González, G., Julcour, C., & Jáuregui-Haza, U. (2017). El estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación. *Revista Cubana de Química*, 29(3), 492-516. <https://doi.org/https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443552968013>
- Cui, T., Wang, X., Chen, Y., Chen, Y., Fu, B., & Tu, Y. (2023). Reverse osmosis coupling Multi-Catalytic Ozonation (RO-MCO) in treating printing and dyeing wastewater and membrane concentrate: Removal performance and mechanism. *Water Resource and Industry*, 30, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100217>
- da Silva Santos, D. H., Xiao, Y., Chaukura, N., Hill, J. M., Selvasembian, R., Silva Zanta, C. L., & Meili, L. (2022). Regeneratio of dye-saturated activated carbon through advanced oxidative processes: A review. *Heliyon*, 8(8), 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10205>
- Daskiran, F., Gulhan, H., Guven, H., Ozgun, H., & Ersahin, M. E. (2022). Comparative evaluation of different operation scenarios for a full-scale wastewater treatment plant: Modeling coupled with life cycle assessment.

Journal of Cleaner Production, 341, 1-12.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130864>

Dévora Isidora, G. E., González Enríquez, R., & Ponce Fernandez, N. E. (2012). Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México. *Ra Ximhai*, 8(2), 57-68.
<https://doi.org/https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46123333006>

Dévora-Isiordia, G., López-Mercado, M., Fimbres-Weihs, G., Álvarez-Sánchez, J., & Astorga-Trejo, S. (2016). Desalación por ósmosis inversa y su aprovechamiento en agricultura en el valle del Yaqui, sonora, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(3), 155-169.
https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000300155&lng=es&tlng=es.

DOF. (2001). NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. México: Diario Oficial de la Federación.

DOF. (2011). NMX-AA-030/2-SCFI-2011. Análisis de agua - Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratados - Método de prueba - Parte 2 - Determinación del índice de la demanda química de oxígeno - Método de tubo sellado. México: Diario Oficial de la Federación.

DOF. (2012). NMX-AA-030/1-SCFI-2012. Análisis de agua - Medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - Método de prueba - Parte 1 - Método de reflujo abierto -. México: Diario Oficial de la Federación.

DOF. (2013). NMX-AA-004-SCFI-2013. Análisis de agua - Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. México: Diario Oficial de la Federación.

- DOF. (2015). NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2016). Análisis de Agua. Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.-Método de prueba-. México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2018). NOM-AA-093-SCFI-20158. Análisis de agua - Medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - Método de prueba. México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2022, Marzo 11). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. México.
- DOF. (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. México: Diario Oficial de la Federación.
- Elsaie, Y., Soussa, H., Gado, M., & Balah, A. (2022). Water desalination in Egypt; literature review and assessment. *Ain Shams Engineering Journal*, 3, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101998>
- Escamilla López, M., Meza Jiménez, J., Llamas Cabello, R., & Sánchez Losoya, M. (2013). Análisis Económico para la Recuperación de las Aguas Residuales de un proceso Minero. *Conciencia Tecnológica*(45), 18-23. <https://doi.org/https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94427876001>
- Escobar-Jiménez, J., Muro-Urista, C., Esparza-Soto, M., Gómez-Espinoza, R. M., Díaz-Nava, C., García-Gaitán, B., & Ortega-Aguilar, R. E. (2012). Recuperación de Agua de Efluentes de una Industria de Cereales utilizando Membranas. *SciELO, Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(3), 65-82. https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000300005&lng=es&tlng=es.

- Esteves, B. M., Fernandes, R., Morales-Torres, S., Maldonado-Hódar, F. J., Silva, A. M., & Madeira, L. M. (2022). Integration of catalytic wet peroxidation and membrane distillation processes for olive mill wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 448, 1-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137586>
- Ferre-Aracil, J., Valcárcel, Y., Negreira, N., López de Alda, M., Barceló, D., Cardona, S. C., & Navarro-Laboulais, J. (2016). Ozonation of hospital raw wastewater for cytostatic compounds removal. Kinetic modelling and economic assessment of the process. *Science of The Total Environment*, 556, 70-79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.202>
- García, C., Rogel-Hernández, E., Flores-López, L. Z., & Espinoza-Gómez, H. (2011). Effect of the membrane characteristics and operation modes, in the fouling of ultrafiltration membranes by natural organic matter (NOM). *Journal of the Chilean Chemical Society*, 57(2), 1083-1086.
- Grueso-Domínguez, M., Castro-Jímenez, C., Correa-Ochoa , M., & Saldamaga-Molina, J. (2019). Estado del arte: desalinización mediante tecnologías de membrana como alternativa frente al problema de escasez de agua dulce. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 69-89. <https://doi.org/https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a5>
- Gubari, M. Q., Zwain, H. M., Hassan, W. H., & Vakili, M. (2023). Desalination of pigment industry wastewater by reverse osmosis using OPM-K membrane. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 1-6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100401>
- Gutiérrez Ruiz, S., Quiroga Alonso, J., & Egea-Corbacho, L. (2019). Removal of emerging contaminants from wastewater using reverse osmosis for its subsequent reuse: Pilot plant. *Journal of Water Process Engineering*, 29, 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100800>
- Hernández Gómez, K., Muro Urista, C., Ortega Aguilar, R. E., Velazquez Peña, S., & Riera, F. (2019). Water recovery by treatment of food industry wastewater

- using membrane processes. *Environmental Technology*, 42(5), 775-788.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1645739>
- Hernández, K., Muro, C., Monroy, O., Diaz-Blancas, V., Alvarado, Y., & Diaz, M. d. (2022). Membrane water Treatment for Drinking Water Production from an industrial Effluent Used in the Manufacturing of Food Additives. *Membranes*, 12(742), 217-228. <https://doi.org/10.3390/membranes12080742>
- Hernandez, K., Muro, C., Ortega, R., Velasquez, S., & Riera, F. (2021). Water recovery by treatment of food industry - wastewater using membrane processes. *Environmental Technology*, 42(5), 775-788.
- Igos, E., Mailler, R., Guillosoy, R., Rocher, V., & Gasperi, J. (2021). Life cycle assessment of powder and micro-grain activated carbon in a fluidized bed to remove micropollutants from wastewater and their comparison with ozonation. *Journal of Cleaner Production*, 287, 1-11.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125067>
- Ihobe. (2009). *Identificación y Evaluación de Aspectos ambientales*. Comunidad Autónoma del país Vasco: Sociedad Pública de Gestión ambiental.
- IMNC. (2009). NMX-SAA-14044-IMNC-2008. *Gestión Ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices*. México, Distrito Federal, México : Instituto Mexicano de Normalización A.C.
- INEGI. (2024). Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC). *Comunicado de prensa 221/24* (págs. 1-10). México: INEGI. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2024/inpc_2q/inpc_2q2024_04.pdf
- Innocenzi, V., Cantarini, F., Amato, A., Morico, B., Ippolito, N. M., Beolchini, F., . . . Veglio, F. (2020). Case study on technical feasibility of galvanic wastewater treatment plant based on life cycle assessment and costing approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, 1-10.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104535>

- Isah, A. S., Bt Shafiai, S. H., Takaijudin, H. B., Mahinder Singh, B. S., & Haq Gilani, S. I. (2022). The rol of desalination and contribution of hybrid solar desalination system towards primary health care. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 1-7.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100253>
- ISO 14040. (2006). *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework: International Standard 14040*. Geneva: International Standards Organization.
- ISO 14044. (2006). *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*. Geneva: International Standards Organization.
- Jiang, S., Li, Y., & Ladewig, B. P. (2017). A review of reverse osmosismembrane fouling and control strategies. *Science of the Total Environment*, 595, 567-583.
- Joseph, C. G., Farm, Y. Y., Taufiq-Yap, Y. H., Pang, C. K., Nga, J. L., & Puma, G. L. (2021). Ozonation treatment processes for the remediation of detergent wastewater: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 1-86.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106099>
- Kabir, S. M., Mahmud, H., & SchOenberger, H. (2022). Recovery of dyes and salts from highly concnetrated (dye and salt) mixed water using nano-filtration ceramic membranes. *Heliyon*, 8(11), 1-10.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11543>
- Kwak, W. C., Oh, Y. J., Kang, S. K., Lee, A. H., Jung, S. M., & Lee, P. S. (2022). Regeneration of zeolite. *membranes deactivated by condensable molecules*, 119.
- Larasati, A., Fowler, G. D., & Graham, N. J. (2020). Chemical regeneration of granular activated carbon: preliminary evaluation of alternative regenerant

solution. *Environmental Science Water Research and Technology*, 6, 2043-2056.

- Larasati, A., Fowler, G. D., & Graham, N. J. (2021). Insights into chemical regeneration of activated carbon for water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 1-11.
- Li, K., Liu, Q., Fang, F., Wu, X., Xin, J., Sun, S., . . . Addy, M. (2020). Influence of nanofiltration concentrate recirculation on performance and economic feasibility of pilot-scale membrane bioreactor-nanofiltration hybrid process for textile wastewater treatment with high water recovery. *Journal of Cleaner Production*, 261, 1-11.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121067>
- Lin, J., Ye, W., Baltaru, M.-C., Tang, Y. P., Bernstein, N. J., Gao, P., . . . Bruggen, B. V. (2016). Tight ultrafiltration membranes for enhanced separation of dyes and Na₂SO₄ during textile wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 514, 217-228.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.04.057>
- Liu, M., Li, Z., Duan, M., Su, Y., Lin, X., Han, H., & Sun, K. (2023). Research and demonstration on reclamation of chemical industrial wastewater with high salinity and hardness and purification of reverse osmosis concentrates. *Desalination*, 551, 1-16.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116437>
- Loayza Pérez, J., & Silva Meza, V. (2013). Los procesos industriales sostenibles y su contribución en la prevención de problemas ambientales. *Diseño y Tecnología*, 16(1), 108-117.
<https://doi.org/https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81629469013>
- López Ramírez, M. Á., Castellanos Onorio, O. P., Lango Reynoso, F., Castañeda Chávez, M. d., Montoya Mendoza, J., Sosa Villalobos, C. A., & Ortiz Muñoz, B. (2021). Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas

- residuales. Una revisión. *Enfoque UTE*, 12(4), 76-87.
<https://doi.org/https://doi.org/10.29019/enfoqueute.769>
- Mayor, Á., Vinardell, S., Ganesan, K., Bacardí, C., Cortina, J. L., & Valderrama, C. (2023). Life-cycle assessment and techno-economic evaluation of the nutrient recovery from wastewater treatment plants for agricultural application. *Science of the Total Environment*, 892, 1-10.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164452>
- Mestres, R. (2013). Química Sostenible: Naturaleza, fines y ámbito. *Áreas emergentes de la educación química*, 24(1), 103-112.
[https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(13\)72503-5](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(13)72503-5)
- Mohan, S., & Oke, N. (2021). Application of Optimaized Pre-ozonation Treatment for Potential Resource Recovery for Industrial Textile Effluent. *Ozone: Science and Engineering*, 44(3), 236-249.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01919512.2021.1911621>
- Mohan, S., & Oke, N. (2021). Application of the Optimized Pre-ozonation Treatment for Potential Resource Recovery from Industrial Textile Effluent. *Ozone: Science and Enginnering*, 44(3), 236-249.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01919512.2021.1911621>
- Morgante, C., Vassallo, F., Xevgenos, D., Cipollina, A., Micari, A., Tamburini, A., & Micale, G. (2022). Valorisation of SWRO brines in a remote island through a circular approach: Techno-economic analysis and perspectives. *Desalination*, 542, 1-21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116005>
- Mousavi, S. M., Dehghanzadeh, R., & Ebrahimi, S. M. (2016). Comparative analysys of ozonation (O3) and activated carbon catalyzed ozonation (ACCO) for destroying chlorophyll a and reducing dissolved organic carbon from a eutrophic water reservoir. *Chemical Engineering Journal*, 314, 396-405.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.159>
- Muñoz, L., & Sanchez, G. (2016). *El agua en la industria alimentaria*. Boletín de la Sociedad Española de Hidrología Médica.

- Nasruddin, M. N., Muhammad, R. F., Che Zuzikrami Azner, A., & Tan Sze, Y. (2018). Regeneration of Spent Activated Carbon from Wastewater Treatment Plant Application. *Journal of Physics: Conference Series*(1116), 1-9.
- Odubiyi, O., Awoyale, A., & Eloka-Eboka, A. (2012). Wastewater Treatment with Activated Charcoal Produced from Cocoa Pod Husk. *International Journal of Environment and Bioenergy*, 162-175.
- Ozbey-Unal, B., Omwene, P. I., Yagcioglu, M., Balcik-Canboalt, C., Karagunduz, A., Keskinler, B., & Dizge, N. (2020). Treatment of organized industrial zone wastewater by microfiltration/reverse osmosis membrane process for water recovery: From lab to pilot scale. *Journal of Water process Engineering*, 38, 1-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101646>
- Panagopoulos, A. (2021). Energetic, economic and environmental assessment of zero liquid discharge (ZLD) brackish water and seawater desalination system. *Energy Conversion and Management*, 235, 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113957>
- Pangopoulos, A., & Giannika, V. (2024). Techno-economic analysis (TEA) of zero liquid discharge (ZLD) systems for treatment and utilization of brine via resource recovery. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 200, 1-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109773>
- Pesqueira, J. F., Pereira, M. F., & Silva, A. M. (2024). Carbon-based composites in advanced wastewater treatment: A life cycle assessment of TiO₂ and GO-TiO₂ solar photocatalysis. *Journal of Cleaner Production*, 444, 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140845>
- Pham, A., Moussavi, S., Thompson, M., & Dvorak, B. (2021). Environmental life cycle impacts of small wastewater treatment plants: Design recommendations for impact mitigation. *Water Research*, 207, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117758>

- Ranade, V. V., & Bhandari, V. M. (2014). *Industrial Wastewater treatment, recycling, and reuse*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2012-0-06975-X>
- Rashidi, M. M., Mahariq, I., Murshid, N., Wongwises, S., Mahian, O., & Nazari, M. A. (2022). Applying wind energy as a clean source for reverse osmosis desalination: a Comprehensive review. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), 12977-12989.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.06.056>
- Rekhate, C. V., & Sirvastava, J. K. (2020). Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater- a review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 3(15), 1-18.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100031>
- Rekhate, Chhaya V.; Srivastava, J. K. (2020). Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater- A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 3, 1-18.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100031>
- Rodríguez, A. J., Robles, C. A., Ruíz, R. A., López, E., Sedeño, J. E., & Rodríguez, A. (2014). índices de germinación y elongación radical de *ALctiva sativa* en el biomonitorio de la calidad del agua del río Chalma. *Revista Internacional de Contaminación ambiental*, 30(3), 307-316. <https://doi.org/ISSN 0188-4999>
- Rodríguez, F.-A., Letón, G., Dorado, V., Rosal, G., Villar, F., & Sanz, G. M. (2014). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid: CEIM.
- Rodríguez, R., Espada, J. J., Gallardo, M., Molina, R., & López-Muñoz, M. J. (2018). Life cycle assessment and techno-economic evaluation of alternatives for the treatment of wastewater in a chrome-plating industry. *Journal of Cleaner production*, 172, 2351-2362.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.175>

- S., E. A., Carmona M., S. I., & Villegas R., L. C. (2010). *Gestión ambiental en proyectos de desarrollo* (Cuarta edición ed.). Serie de publicaciones del posgrado en gestión ambiental. <https://doi.org/958-9352-33-2>
- Saja, M., Talib, M. A., & Jamal, M. A. (2020). A hybrid adsorption membrane process for removal of dye from synthetic and actual wastewater. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 157, 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108113>
- Santos, A., Yustos, P., Rodríguez, S., Garcia-Ochoa, F., & de Gracia, M. (2007). Decolorization of Textile Dyes by Wet Oxidation Using Activated Carbon as Catalyst. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 46, 2423-2427.
- Sawadogo, B., Nouhou, A. W., Konaté, Y., Tiendrebeogo, C., Sossou, S., Sadio, S. D., & Karambiri, H. (2024). Integrated coagulation-flocculation with nanofiltration and reverse osmosis membrane for treating sugar can industry effluent. *Heliyon*, 10, 1-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40805>
- SEMARNAT. (2003). NOM-002-SEMARNAT-1996, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO URBANO MUNICIPAL. México: Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2003). NOM-003-SEMARNAT-1997, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE REUSEN EN SERVICIOS AL PÚBLICO. México: Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2003). NOM-004-SEMARNAT-2002, PROTECCIÓN AMBIENTAL- LODOS Y BIOSÓLIDOS - ESPECIFICACIONES Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA SU APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL. México: Diario Oficial de la Federación.

- SEMARNAT. (2006). *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-145-SEMARNAT-2003, Confinamiento de residuos en cavidades construidas por disolución en domos salinos geológicamente estables*. México: Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2022). NOM-127-SSA1-2021. agua para uso y consumo humano. Límites permidibles de la calidad del agua. México: Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2022). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-2021, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS RESIDUALES EN CUERPOS RECEPTORES PROPIEDAD DE LA NACIÓN. México: Diario Oficial de la Federación.
- Sewilam, H., & Al Bazedi, G. (2023). Hybrid BWRO/FO system for high recovery inland brackish water desalination: techno-economic assessment. *Sustainable Water Resources Management*, 9(136), 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40899-023-00912-4>
- Sharma, S., Buddhdev, J., Patel, M., & Ruparelia, J. (2013). Studies on Degradation of Reactive Red 135 Dye in Wastewater using ozone. *Procedia Engineering*, 51, 451-455. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.063>
- Sharma, S., Buddhev, J., Patel, M., & Ruparelia, J. P. (2013). Studies on Degradation of Reactive Red 135 Dye in Wastewater using Ozone. *Procedia Engineering*, 51, 451-455.
- Shokouhi, S. B., Dehghanzadeh, R., Aslani, H., & Shahmahdi, N. (2020). Activated carbon catalyzed ozonation (ACCO) of Reactive Blue 194 azo dye in aqueous saline solution: Experimental parameters, kinetic and analysis of activated carbon properties. *Journal of Water Process Engineering*, 35, 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101188>
- Simsek, N. Z., & Yetis, U. (2024). A life cycle assessment of the membrane processes applied for salt recovery from reactive dyeing wastewater.

Sustainable Chemistry and Pharmacy, 39, 1-16.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101552>

Sobrero, M. C., & Ronco, A. (2008). Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga *Lactuca Sativa* L. *Intercalibrados*, 55-67.

Tadda, M., Ahsan, A., Shitu, A., ElSergany, M., Arunkumar, T., Jose, B., . . . Nik, N. (2016). A review on activated carbon: process, application and prospects. *Journal of Advanced Civil Engineering Practice and Research*, 7-13.

Titchou, F. E., Zazou, H., Afganga, H., El Gaayda, J., Akbour, R. A., Nidheesh, P. V., & Hamdani, M. (2021). Removal of organic pollutants from wastewater by advanced oxidation processes and its combination with membrane processes. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 169, 1-22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108631>

Tomczak, W., & Gryta, M. (2021). Application of ultrafiltration ceramic membrane for separation of oily wastewater generated by maritime transportation. *Separation and Purification Technology*, 261, 1-14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118259>

Treviño-Rodríguez, V. D., Soria-Aguilar, M. d., Carrillo-Pedroza, F. R., Aguilera-González, E. N., & Sánchez-Castillo, M. A. (2023). Ozono para el tratamiento de aguas residuales. *CienciAcierta*(452), 48-64. <https://doi.org/ISSN:2683-1848>

UNICEF. (2020). *Water, Sanitation and Hygiene*. Retrieved from <https://www.unicef.org/wash/water-scarcity>

UN-Water. (2017). *Informe Mundial de las AGUAS RESIDUALES EL RECURSO DESAPROVECHADO*. Paris, Francia: UNESCO 2017.

UN-WATER. (2021). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021 EL VALOR DEL AGUA*. Paris, Francia: UNESCO.

Urbina Baca, G. (2010). *Evaluación de proyectos* (6ta ed.). México D. F.: McGraw-Hill. <https://doi.org/978-607-15-0260-5>

- Vega-Álvarez, M., Muro, C., Montero-Guadarrama, I., & Diaz-Blancas, V. (2023). Food Industrial Effluent Treatment with Oxygen and Ozone Using Activated Carbon for Catalytic Oxidation. *Ozone: Science and Engineering*, 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01919512.2023.2285290>
- Venkatesh, S., Quaff, A. R., Pandey, N. D., & Venkatesh, K. (2015). Impact of Ozonation on Decolorization and Mineralization of Azo Dyes: Biodegradability Enhancement, By-Products Formation, Required Energy and Cost. *Ozone: Science and Engineering*, 37(5), 420-430. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/01919512.2015.1027810>
- Wai, L., Pérez, S., & Félix, N. M. (2007). Preparation, Characterization and Salt Rejection of Negatively Charged polyamide Nanofiltration Membranes. *JOURNAL of the MEXICAN CHEMICAL SOCIETY*, 51(3), 129-135. https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-249X2007000300001&lng=es&tlng=en.
- Wang, W.-L., Hu, H.-Y., Liu, X., Shi, H.-X., Zhou, T.-H., Wang, C., . . . Wu, Q.-Y. (2019). Combination of catalytic ozonation by regenerated granular activated carbon (rGAC) and biological activated carbon in the advanced treatment of textile wastewater for reclamation. *Chemosphere*, 231, 369-377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.175>
- Wu, J., Gao, H., Yao, S., Chen, L., Gao, Y., & Zhang, H. (2015). Degradation of Crystal Violet by catalytic ozonation using Fe/activated carbon catalyst. *Separation and Purification Technology*, 147, 179-185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.04.022>
- Xiangmin , L., Lei, J., & Haixiang, L. (2018). Application of Ultrafiltration Technology in Water Treatment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 186(3), 1-8. <https://doi.org/DOI 10.1088/1755-1315/186/3/012009>
- Zagklis, D. P., & Bampos, G. (2022). Tertiary Wastewater Treatment Technologies: A Review of Technical, Economic, and Life Cycle Aspects. *Processes*, 10(2304), 1-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr10112304>

Zielinzka, M., & Galik, M. (2017). Use of Ceramic Membranes in a Membrane Filtration Supported by Coagulation for Treatment of Dairy Wastewater. *Water Air Soil Pollut*, 228(173), 1-10.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11270-017-3365-x>