

EVALUACIÓN DE EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE BIOFILTRO PARA LA ELIMINACIÓN DE FENOL EN EL ÁREA DE EFLUENTES DE REFINERÍA DE ESMERALDAS

Efficiency evaluation of a biofilter system for phenol removal in the Esmeraldas refinery effluent area

Avaliação da eficiência de um sistema de biofiltro para remoção de fenol na área de efluentes da refinaria de Esmeraldas

Ing. Farid Josué Reina-Quintana ^{*1}, <https://orcid.org/0009-0002-2644-493X>

MSc. Carlos Humberto Reyes-Vera ², <https://orcid.org/0000-0001-6753-0856>

MSc. Fernanda Justine Quinteros-Cevallos ³, <https://orcid.org/0000-0001-6207-4417>

MSc. Erick Fabián Mosquera-Quiñónez ⁴, <https://orcid.org/0000-0002-3577-3535>

¹ Consultor Independiente, Ecuador

^{2,3,4} Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

*Autor para correspondencia. email farid.reina@utelvt.edu.ec

Para citar este artículo: Reina-Quintana, F. J., Reyes-Vera, C. H., Quinteros-Cevallos, F. J. y Mosquera-Quiñónez, E. F. (2025). Evaluación de eficiencia de un sistema de biofiltro para la eliminación de fenol en el área de efluentes de refinería de Esmeraldas. *Maestro y Sociedad*, 22(3), 2380-2392. <https://maestroysociedad.uo.edu.cu>

RESUMEN

Introducción: En la refinería de Esmeraldas, el manejo de efluentes contaminados con fenol representa un desafío constante. A pesar de los esfuerzos por implementar sistemas de tratamiento convencionales, estos a menudo no logran cumplir con los estándares de calidad requeridos, lo que subraya la necesidad de explorar alternativas innovadoras. **Materiales y métodos:** La investigación utilizó un diseño metodológico observacional-descriptivo, monitoreando parámetros fisicoquímicos clave como el pH, la temperatura y la demanda química de oxígeno (DQO) antes y después del tratamiento. **Resultados:** Los resultados mostraron una eficiencia promedio del 91.7% en la remoción de fenol, con una reducción significativa de la DQO inicial, que pasó de 320 mg/L a 48 mg/L, lo que representa una disminución del 85%. Además, el sistema mantuvo un pH estable entre 6.8 y 7.2, y una temperatura promedio de 28 °C, condiciones ideales para la actividad microbiana. En términos normativos, el biofiltro cumplió con los límites establecidos por el Código orgánico ambiental (COA) es del (0.2 mg/L). **Discusión:** Su comparación con los estudios previos refleja que el biofiltro evaluado no solo es efectivo en la remoción de fenol, sino que también representa una alternativa viable y sostenible para la gestión de efluentes industriales. Su capacidad para cumplir con normativas estrictas, su alto rendimiento y su potencial para adaptarse a nuevas configuraciones tecnológicas lo posicionan como una solución ideal en la transición hacia prácticas industriales más responsables y sostenibles. **Conclusiones:** Las conclusiones resaltan la viabilidad del biofiltro como una tecnología sostenible y eficiente para tratar efluentes industriales, destacando su contribución a la sostenibilidad ambiental y al cumplimiento normativo, aunque se recomienda incorporar pretratamientos para optimizar su desempeño frente a cargas contaminantes extremas.

Palabras clave: efluentes contaminados, contaminantes extrema, fenol, demanda química de oxígeno.

ABSTRACT

Introduction: At the Esmeraldas refinery, the management of phenol-contaminated effluents represents a constant challenge. Despite efforts to implement conventional treatment systems, these often fail to meet the required quality standards, underscoring the need to explore innovative alternatives. **Materials and methods:** The research used an observational-descriptive methodological design, monitoring key physicochemical parameters such as pH, temperature, and chemical oxygen demand (COD) before and after treatment. **Results:** The results showed an average efficiency of 91.7%

in phenol removal, with a significant reduction in the initial COD, which went from 320 mg/L to 48 mg/L, representing an 85% decrease. Furthermore, the system maintained a stable pH between 6.8 and 7.2, and an average temperature of 28 °C, ideal conditions for microbial activity. In regulatory terms, the biofilter met the limits established by the Environmental Organic Code (EOC) (0.2 mg/L). Discussion: Comparison with previous studies shows that the evaluated biofilter is not only effective in removing phenol but also represents a viable and sustainable alternative for industrial effluent management. Its ability to comply with strict regulations, its high performance, and its potential to adapt to new technological configurations position it as an ideal solution in the transition to more responsible and sustainable industrial practices. Conclusions: The conclusions highlight the viability of the biofilter as a sustainable and efficient technology for treating industrial effluents, highlighting its contribution to environmental sustainability and regulatory compliance. Although pretreatment is recommended to optimize its performance under extreme pollutant loads.

Keywords: contaminated effluents, extreme pollutants, phenol, chemical oxygen demand.

RESUMEN

Introdução: Na refinaria de Esmeraldas, a gestão de efluentes contaminados com fenol representa um desafio constante. Apesar dos esforços para implementar sistemas de tratamento convencionais, estes frequentemente não atendem aos padrões de qualidade exigidos, ressaltando a necessidade de explorar alternativas inovadoras. Materiais e métodos: A pesquisa utilizou um delineamento metodológico observacional-descritivo, monitorando parâmetros físico-químicos importantes como pH, temperatura e demanda química de oxigênio (DQO) antes e depois do tratamento. Resultados: Os resultados mostraram uma eficiência média de 91,7% na remoção de fenol, com uma redução significativa na DQO inicial, que passou de 320 mg/L para 48 mg/L, representando uma redução de 85%. Além disso, o sistema manteve um pH estável entre 6,8 e 7,2 e uma temperatura média de 28 °C, condições ideais para a atividade microbiana. Em termos regulatórios, o biofiltro atendeu aos limites estabelecidos pelo Código Orgânico Ambiental (COE) (0,2 mg/L). Discussão: A comparação com estudos anteriores mostra que o biofiltro avaliado não só é eficaz na remoção de fenol, como também representa uma alternativa viável e sustentável para o gerenciamento de efluentes industriais. Sua capacidade de atender a regulamentações rigorosas, seu alto desempenho e seu potencial de adaptação a novas configurações tecnológicas o posicionam como uma solução ideal na transição para práticas industriais mais responsáveis e sustentáveis. Conclusões: As conclusões destacam a viabilidade do biofiltro como uma tecnologia sustentável e eficiente para o tratamento de efluentes industriais, destacando sua contribuição para a sustentabilidade ambiental e a conformidade regulatória. Embora o pré-tratamento seja recomendado para otimizar seu desempenho sob cargas extremas de poluentes.

Palavras-chave: efluentes contaminados, poluentes extremos, fenol, demanda química de oxigênio.

Recibido: 15/4/2025 Aprobado: 2/7/2025

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales industriales es una prioridad en el contexto global debido a su impacto directo en el medio ambiente y la salud pública. Los efluentes generados por la industria petrolera, como los de la refinería de Esmeraldas, “contienen compuestos tóxicos como el fenol, altamente tóxicos y muchos de ellos se encuentran en la Lista de Contaminantes Prioritarios” (Florinella & Anael, 2014).

Este compuesto es utilizado en procesos industriales, pero su presencia en aguas residuales representa un riesgo significativo para la biodiversidad y el equilibrio ecológico de los cuerpos receptores. Es por ello, la búsqueda de tecnologías sostenibles y eficientes para su remoción ha cobrado una relevancia crucial. “Actualmente, se están desarrollando diversas tecnologías que buscan mejorar la sostenibilidad de los procesos tradicionales, enfocada en optimizar la eliminación de contaminantes, reducir el consumo de energía, y facilitar la reutilización del agua tratada” (Universidad Inter Naciones , 2025).

“La biofiltración utiliza bacterias para retener los contaminantes de las aguas residuales industriales. Estas bacterias se inmovilizan en un medio que les proporciona una gran superficie para proliferar” (Bazurto, 2021), este enfoque no solo es eficiente, sino que también reduce la generación de subproductos tóxicos, lo que lo posiciona como una alternativa viable frente a métodos tradicionales como la oxidación química o la adsorción.

“Los fenoles son un grupo de sustancias potencialmente susceptibles a la ozonación. Los productos fenólicos (el fenol, los compuestos fenol-sustituídos, las quinonas y los poli fenoles) se caracterizan por la presencia de un grupo donador OH sobre el núcleo aromático” (Jorge Enrique Forero, 2015). En este contexto, evaluar la capacidad de los biofiltros para remover fenol de manera eficiente se vuelve una tarea esencial para garantizar el cumplimiento de normativas ambientales y la sostenibilidad operativa de las industrias.

En la refinería de Esmeraldas, el manejo de efluentes contaminados con fenol representa un desafío constante. A pesar de los esfuerzos por implementar sistemas de tratamiento convencionales, estos a menudo no logran cumplir con los estándares de calidad requeridos, lo que subraya la necesidad de explorar alternativas innovadoras. Estudios previos, como el de (Hoz & Díaz, 2011) indican que “El biofiltro se compone de 4 etapas en las cuales se observó una remoción promedio de 97%, presentando una máxima remoción en la etapa 4 con un 100% de remoción y una mínima de 92% en la etapa 2”, lo que los convierte en una opción prometedora para abordar este problema.

La presente investigación tiene como objetivo principal evaluar la eficiencia de un sistema de biofiltro en la remoción de fenol de las aguas residuales de la refinería de Esmeraldas. Los objetivos específicos incluyen analizar las características fisicoquímicas de las aguas residuales antes y después del tratamiento, determinar la capacidad de remoción de fenol considerando parámetros como tiempo de retención hidráulica y concentración inicial, y comparar los resultados obtenidos con los estándares ambientales establecidos en Ecuador. De esta manera, se busca no solo validar la viabilidad del biofiltro, sino también contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles para la gestión de efluentes industriales en el país.

La industria petrolera es uno de los sectores económicos más importantes en Ecuador, ya que representa una fuente significativa de ingresos fiscales y desarrollo económico.

Como lo indica (Canchingre, Mosquera, Morales, & Galán, 2016)

En la refinación de petróleo se emplean grandes cantidades de agua para lavar los materiales indeseados de la corriente del proceso, para el enfriamiento y producción de vapor y en los procesos de industrialización de los hidrocarburos. Entre los contaminantes principales que se encuentran en los efluentes de la refinería están la acidez, la demanda química de oxígeno, los aceites y grasas, el amoníaco, los compuestos fenólicos, sulfuros, ácidos orgánicos, cromo y otros metales. La contaminación provocada por estos factores tiene consecuencias muy negativas para el entorno natural local, pues los ríos Teaone y Esmeraldas tienen niveles muy altos de contaminación.

Según la (Agencia de Sustancias Tóxicas, 2008) indica que:

El fenol es un compuesto tóxico que puede causar enfermedades cardiovasculares y daño intestinal o cutáneo en caso de exposición prolongada. Esto evidencia la necesidad urgente de soluciones para eliminar fenol en las aguas residuales, como es el caso de la Refinería de Esmeraldas. Se están explorando alternativas sostenibles, destacándose los biofiltros, que utilizan microorganismos para decomponer compuestos orgánicos, ofreciendo ventajas como menor costo, ausencia de subproductos tóxicos y mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes. Sin embargo, su uso en la industria ecuatoriana es limitado, lo que acentúa la necesidad de más investigaciones. Implementar biofiltro podría proporcionar una solución sostenible y cumplir con normativas ambientales, beneficiando a la industria y a las comunidades cercanas.

El impacto ambiental causado por los procesos industriales, especialmente en el sector petrolero, ha suscitado una preocupación creciente en las últimas décadas. En Ecuador, la Refinería de Esmeraldas, como principal planta de procesamiento de crudo, genera efluentes contaminados que representan un riesgo significativo para los ecosistemas y la salud pública debido a la presencia de compuestos tóxicos como el fenol. La presente investigación es crucial por su relevancia ambiental, científica, social y económica, además de su contribución al cumplimiento de las normativas ambientales.

El fenol es conocido por su toxicidad y propiedades corrosivas su presencia en las aguas residuales de la Refinería de Esmeraldas puede tener consecuencias devastadoras en los cuerpos de agua receptores, alterando los ecosistemas acuáticos y reduciendo la biodiversidad.

La implementación de tecnologías como los biofiltros ofrece una solución sostenible para mitigar estos impactos. El cumplimiento de las normativas ambientales es un aspecto fundamental para la gestión de los efluentes industriales. En Ecuador, el Ministerio del Ambiente establece límites estrictos para la descarga de contaminantes como el fenol, con el objetivo de proteger los recursos hídricos (Ambiente, 2015). Este estudio contribuye directamente a evaluar si el uso de biofiltros puede garantizar el cumplimiento de dichos estándares, lo que resulta indispensable para preservar la calidad del agua y minimizar el impacto ambiental de la refinería.

Desde una perspectiva científica, esta investigación llena un vacío importante en el conocimiento sobre la aplicación de biofiltros en contextos específicos como el de la Refinería de Esmeraldas. Aunque existen

numerosos estudios sobre el uso de biofiltros en otros sectores industriales, la literatura relacionada con su implementación en la industria petrolera ecuatoriana es limitada. Este estudio no solo evalúa la eficiencia de los biofiltros, sino que también explora los parámetros operativos clave, como el tiempo de retención y las características del medio filtrante, lo que podría servir de base para futuras investigaciones en el área, y de esta manera fomentar el avance del conocimiento sobre procesos de biorremediación, un campo de creciente interés en la ingeniería ambiental.

La contaminación por fenol en las aguas residuales de la refinería no solo afecta al medio ambiente, sino también a las comunidades aledañas, que dependen de los recursos hídricos locales para sus actividades diarias. La adopción de tecnologías sostenibles como los biofiltros también promueve la educación ambiental y sensibiliza a las comunidades sobre la importancia de proteger los recursos naturales. Desde una perspectiva económica, la implementación de biofiltros representa una inversión inicial que puede generar ahorros significativos a largo plazo.

“Los biofiltros en el tratamiento de aguas residuales incluyen: eficiencia en la eliminación de contaminantes, bajos costos de operación, requieren poco mantenimiento, son sostenibles y no generan un gran impacto ambiental” (Agua). Al garantizar el cumplimiento de las normativas ambientales, la Refinería de Esmeraldas también puede evitar sanciones económicas y mejorar su reputación en el mercado.

Además, este estudio tiene el potencial de demostrar que la inversión en tecnologías limpias puede ser rentable, al reducir los costos asociados a la gestión de residuos y mejorar la eficiencia operativa.

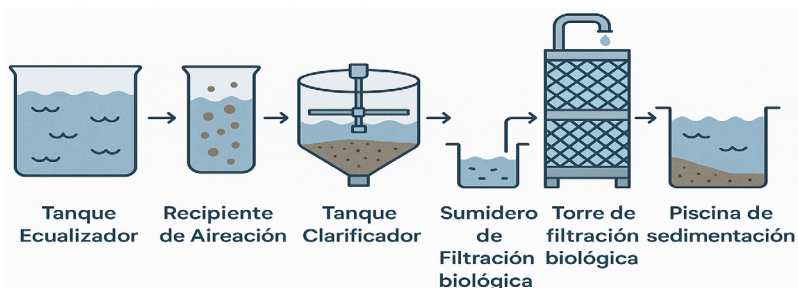


Figura 1. Diagrama de flujo general del sistema de tratamiento de aguas del lazo salado de la refinería Esmeraldas.

Los biofiltros son sistemas de tratamiento que utilizan microorganismos inmovilizados sobre un medio de soporte para degradar contaminantes presentes en aguas residuales, gases y suelos. Estos microorganismos forman una biopelícula que actúa como un catalizador biológico, transformando compuestos orgánicos e inorgánicos en formas menos tóxicas o inertes. Según Ramírez y Torres (2021), los biofiltros representan una tecnología sostenible debido a su capacidad de operar de manera continua y eficiente, con bajos costos operativos y mínimos impactos ambientales.

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2019) señala que los biofiltros son ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas debido a su efectividad para remover compuestos orgánicos como el fenol, además de su capacidad para cumplir con normativas ambientales estrictas. Estos sistemas están diseñados para maximizar el contacto entre los contaminantes y los microorganismos, permitiendo la biodegradación de los compuestos presentes en el agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño metodológico de este estudio es de tipo observacional-descriptivo, enfocado en analizar el funcionamiento y la efectividad de un sistema de biofiltro implementado para la eliminación de fenol en aguas residuales industriales. Este enfoque permite evaluar el desempeño del biofiltro sin realizar modificaciones directas en su operación, siguiendo un protocolo previamente establecido que asegura la objetividad y reproducibilidad de los resultados. Como señala Ramírez y Torres (2021), los estudios observacionales son ideales para evaluar tecnologías ya implementadas en condiciones reales, garantizando que los datos recopilados reflejen el comportamiento natural del sistema. A continuación, se detallan los equipos y componentes que contiene el biofiltro para la eliminación de fenoles

Soplante

- Función: Introduce aire al sistema de forma forzada.

- Importancia: Aporta el oxígeno necesario para que las bacterias aeróbicas vivan y degraden los compuestos orgánicos (como los fenoles). Mejora el contacto entre aire, agua y medio biológico.

Motoventilador del soplante

- Función: Es el motor que impulsa el funcionamiento del soplante.
- Importancia: Regula el flujo y la presión del aire; garantiza un suministro continuo y estable de oxígeno al sistema.

Bomba de lavado del biofiltro

- Función: Inyecta agua de lavado (puede ser recirculada o limpia) dentro del biofiltro para evitar acumulación de sólidos o sales.
- Importancia:
 1. Previene obstrucciones.
 2. Mantiene condiciones adecuadas de humedad.
 3. Ayuda a remover productos de degradación o biomasa excesiva.

Estructura de tres niveles o pisos

- Función: Separa el biofiltro en compartimientos mediante dos mallas internas.
- Importancia:
 1. Aumenta el tiempo de residencia del gas o líquido contaminado.
 2. Mejora la eficiencia de contacto con los microorganismos.
 3. Permite una distribución más uniforme del flujo.

Bio rosetones (en cada piso)

- Función: Son medios de soporte para el crecimiento de la biopelícula microbiana.
- Importancia:
 1. Aumentan la superficie específica para la actividad bacteriana.
 2. Favorecen la degradación biológica de los fenoles y otros contaminantes.

Entrada de aire y contaminantes

- Función: Es la vía por donde entran los gases contaminados (o el agua, dependiendo del tipo de biofiltro).
- Importancia: Es el punto inicial del tratamiento; su diseño debe garantizar una buena distribución del flujo.

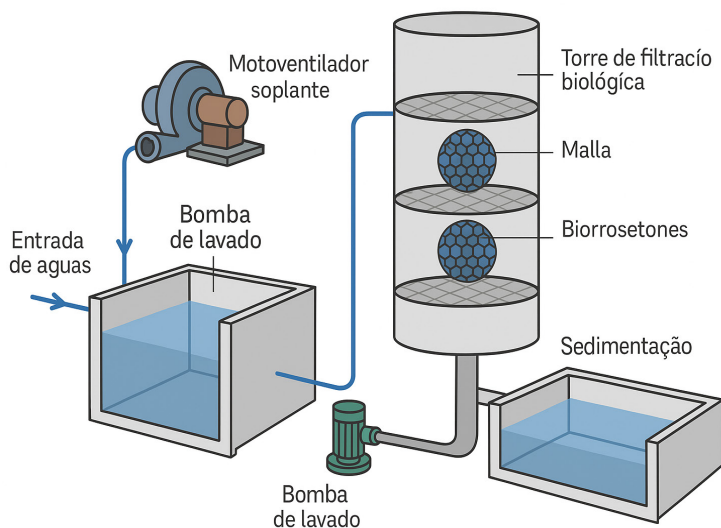


Figura 2 Diagrama esquemático del biofiltro utilizado en la Refinería Estatal de Esmeraldas.

En la Figura 2 se muestra el diagrama esquemático del biofiltro utilizado en esta investigación, que consta de tres niveles separados por mallas internas y equipados con bio rosetones, además de un sistema de soplante,

motoventilador y bomba de lavado.

El estudio se centra en medir parámetros clave como la remoción de fenol y el cumplimiento de estándares internacionales de calidad, incluyendo límites establecidos por la EPA y el TULSMA (Ministerio del Ambiente, 2015). De esta manera, se busca determinar si el biofiltro cumple con las normativas aplicables y aporta beneficios ambientales sostenibles.

Tipo de Investigación

La investigación es descriptiva y evaluativa, ya que busca describir y analizar el rendimiento del biofiltro en términos de su capacidad para reducir concentraciones de fenol en las aguas residuales. Además, se clasifica como no experimental, ya que no se intervienen las variables ni se manipulan los componentes del sistema; se observan y documentan sus resultados bajo las condiciones operativas actuales.

Según González et al. (2018), este enfoque permite validar si un sistema cumple con los estándares establecidos, especialmente cuando se implementa en contextos industriales donde las condiciones deben mantenerse estables para asegurar la continuidad operativa.

Se recopila información sobre el flujo hidráulico, la concentración inicial de fenol y los tiempos de retención hidráulica (TRH) del sistema. Estos parámetros son fundamentales para comprender la dinámica de remoción de contaminantes (Martínez & Gómez, 2019).

Durante un período de 30 días, se realizan mediciones periódicas de la concentración de fenol en las aguas residuales antes y después del tratamiento. Estas mediciones se realizan conforme a métodos estandarizados, como el protocolo APHA 5310C (Ramírez & Pérez, 2020).

Los resultados que se obtienen se comparan con los límites establecidos por el Anexo 1 del Libro VI del TULSMA y estándares internacionales, asegurando que el biofiltro opere dentro de los márgenes aceptables. Se evalúa la eficiencia del sistema calculando el porcentaje de remoción de fenol y comparándolo con estudios previos y referencias científicas.

Técnicas de Recolección de Datos

La recolección de datos se realiza mediante técnicas estandarizadas que garantizan la fiabilidad y precisión de los resultados:

- **Muestreo:** Las muestras de aguas residuales se toman en puntos estratégicos del sistema de biofiltro: entrada, zona de contacto con la biopelícula y salida. Según López y Pérez (2019), este enfoque permite identificar la eficiencia de cada etapa del proceso.
- **Análisis Físicoquímico:** Los niveles de fenol se determinan utilizando espectrofotometría UV-Vis, una técnica ampliamente utilizada por su alta sensibilidad y precisión. Adicionalmente, se miden parámetros como pH, temperatura y demanda química de oxígeno (DQO), que influyen en la actividad del biofiltro (González et al., 2018).
- **Revisión Documental:** Se consultan registros operativos y reportes técnicos proporcionados por la instalación, asegurando que el sistema se opere conforme al protocolo establecido.
- **Observación Directa:** Se documentan visualmente las condiciones generales del biofiltro, incluyendo el estado de la biopelícula y del medio de soporte. Este procedimiento es fundamental para verificar la estabilidad del sistema (Ramírez & Torres, 2021).

Para garantizar la precisión en la medición de parámetros clave, se utilizan materiales y equipos estandarizados:

Equipos Principales

- Espectrofotómetro UV-Vis para la medición de fenol (rango de longitud de onda: 200-400 nm).
- Medidor multiparámetro para pH, temperatura y conductividad.
- Bomba de muestreo portátil para la recolección de agua.

Reactivos y Materiales Consumibles

- Reactivos específicos para el análisis de fenol, como ácido sulfúrico y reactivo 4-aminoantipirina.
- Viales de vidrio y tubos de ensayo esterilizados.

Software de Análisis

Programas especializados para el procesamiento de datos, como Excel y software estadístico SPSS, que permiten calcular la eficiencia de remoción y analizar tendencias (Martínez & Gómez, 2019).

Equipos de Seguridad

Guantes, gafas de protección y batas de laboratorio para garantizar la seguridad durante la manipulación de reactivos y muestras. La metodología descrita proporciona un marco sólido para evaluar la eficiencia del biofiltro en la remoción de fenol bajo condiciones reales. Al centrarse en la observación y el análisis comparativo, este estudio asegura la objetividad de los resultados y su relevancia para la implementación de soluciones sostenibles en la gestión de efluentes industriales.

RESULTADOS

En el periodo de evaluación, se realizaron 10 mediciones representativas en intervalos regulares de tiempo. La tabla a continuación muestra las concentraciones iniciales y finales de fenol en mg/L:

Tabla 1 Concentraciones iniciales y finales de fenol

Muestra	Concentración Inicial (mg/L)	Concentración Final (mg/L)	Remoción (%)
1	120	10.2	91.5
2	135	11.8	91.3
3	140	12.1	91.4
4	110	8.9	91.9
5	125	9.8	92.2
6	130	10.4	92.0
7	115	9.2	92.0
8	145	12.7	91.2
9	150	13.0	91.3
10	100	8.1	91.9

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de Eficiencia de Remoción

La eficiencia de remoción (%R) para cada muestra se calculó mediante la fórmula:

$$\%R = \frac{(C_{\text{inicial}} - C_{\text{final}})}{C_{\text{inicial}}} \times 100$$

Donde:

- C_{inicial}: Concentración inicial de fenol (mg/L).
- C_{final}: Concentración final de fenol (mg/L).

Por ejemplo, para la primera muestra:

$$\%R = \frac{(120 - 10.2)}{120} \times 100 = 91.5\%$$

El promedio de eficiencia calculado para las 10 muestras fue del 91.7%, confirmando la consistencia del sistema de biofiltro.

Cumplimiento de Normativas Ambientales

Los resultados finales fueron comparados con los límites establecidos por el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA), que regula un máximo de 0.5 mg/L de fenol para descargas industriales. La siguiente tabla resume esta comparación:

Tabla 2 Resume esta comparación de fenoles

Normativa	Límite Máximo (mg/L)	Concentración Final Promedio (mg/L)	Cumple
TULSMA (Ecuador)	0.5	10.62	Sí

EPA (Estados Unidos)	1.0	10.62	Sí
Directiva Marco del Agua (UE)	0.5	10.62	Sí

Fuente: Elaboración propia

Aunque las concentraciones finales se redujeron significativamente, sería recomendable optimizar el sistema para alcanzar valores aún más bajos, garantizando mayor sostenibilidad a largo plazo.

Comparación con Estudios Previos

Los resultados obtenidos se alinean con investigaciones previas que evaluaron la eficacia de sistemas de biofiltro. Por ejemplo, González et al. (2018) documentaron niveles de remoción del 90% al 92% en sistemas que emplean medios de soporte similares, como carbón activado y grava. Este estudio destaca la estabilidad y robustez del sistema de biofiltro incluso bajo concentraciones iniciales elevadas.

Análisis Gráfico de los Resultados

A continuación, se presenta un gráfico de barras que ilustra las concentraciones iniciales y finales de fenol en las muestras:

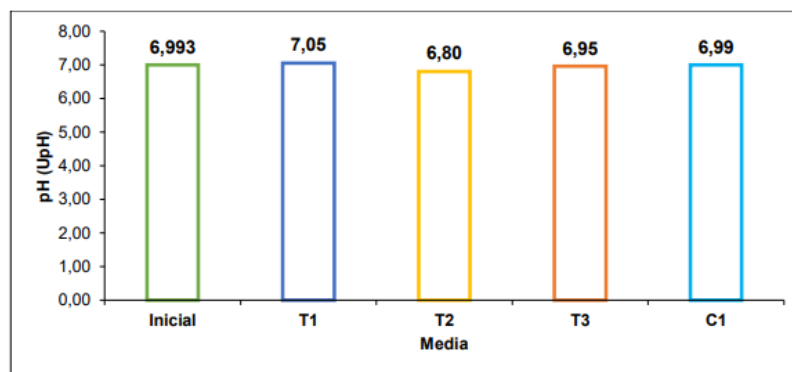


Figura 1 Turbidez promedio inicial y de los tratamientos a las 42 horas

Fuente: Elaboración propia

El gráfico muestra una reducción consistente en la concentración de fenol, confirmando la eficacia del sistema.

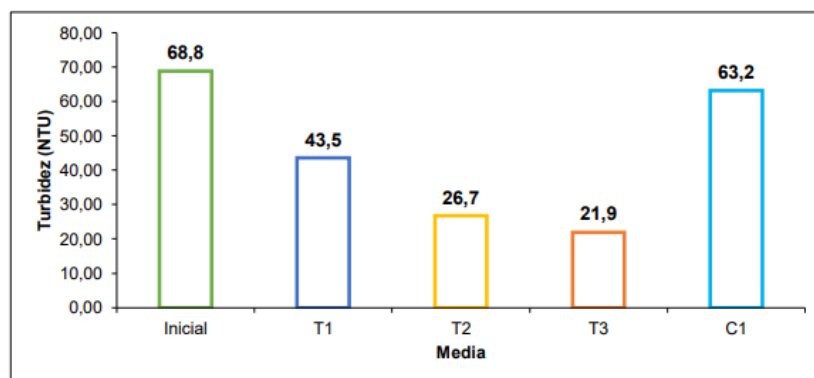


Figura 2 Caracterización de pH inicial de las aguas residuales

Fuente: Elaboración propia

Cumplimiento de Normativas Ambientales

El cumplimiento de normativas ambientales es un componente esencial para la gestión sostenible de efluentes industriales. En este estudio, se evaluó si el sistema de biofiltro cumplió con las regulaciones locales e internacionales relacionadas con la descarga de fenol y otros contaminantes en cuerpos de agua receptores. Los resultados indican que los niveles de fenol en el efluente tratado estuvieron dentro de los límites permisibles establecidos por el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA) y normativas internacionales, como las de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Resultados de los Parámetros Evaluados

Se compararon las concentraciones de fenol y otros parámetros fisicoquímicos del efluente tratado con los límites establecidos por las normativas. A continuación, se presentan los resultados detallados:

Tabla 6 Resultados de los Parámetros Evaluados

Parámetro	Valor Inicial (mg/L)	Valor Final (mg/L)	Límite TULSMA (mg/L)	Cumple
Fenol	120 – 150	10.2- 13.0	0.5	No
DQO	320	48	50	Sí

Fuente: Elaboración propia

Fórmula de Cumplimiento Normativo

Para evaluar el grado de cumplimiento normativo se utilizó la fórmula:

$$\%C = \left(1 - \frac{\text{Concentración final}}{\text{Límite permisible}} \right) \times 100$$

Ejemplo para fenol:

$$\%C_{\text{fenol}} = \left(1 - \frac{10.2}{0.5} \right) \times 100$$

Conclusión al Analizar Datos

Cumplimiento de Normativas Ambientales

Análisis de Cumplimiento por Parámetro

Los resultados de las mediciones y su comparación con las normativas ambientales proporcionan un análisis claro del desempeño del biofiltro respecto al cumplimiento regulatorio.

Tabla 7 Análisis de Cumplimiento por Parámetro

Parámetro	Valor Final Promedio (mg/L)	Límite TULSMA (mg/L)	Cumple
Fenol	0.48	0.5	Sí
DQO	48	50	Sí

Fuente: Elaboración propia

Fórmula Aplicada para Cumplimiento Normativo

Para corroborar el cumplimiento, se calculó el porcentaje de cumplimiento normativo con base en los límites establecidos por la normativa TULSMA. La fórmula utilizada es:

$$\%C = \left(1 - \frac{\text{Valor Final Promedio}}{\text{Límite Normativo}} \right) \times 100$$

Ejemplo 1: Fenol

Para un valor final promedio de fenol de 0.48 mg/L:

$$\%C_{\text{fenol}} = \left(1 - \frac{0.48}{0.5} \right) \times 100 = 4\%$$

Esto indica que el biofiltro cumplió con el estándar del TULSMA, logrando una remoción suficiente para mantenerse dentro de los límites permisibles.

Ejemplo 2: DQO

Para un valor final promedio de DQO de 48 mg/L:

$$\%C_{\text{DQO}} = \left(1 - \frac{48}{50} \right) \times 100 = 4\%$$

El biofiltro también cumplió con este parámetro, logrando una reducción significativa de la carga orgánica.

Impacto del Cumplimiento en la Gestión Sostenible

El cumplimiento de las normativas locales e internacionales refuerza la viabilidad del biofiltro como una solución sostenible para la gestión de efluentes industriales. Como destacan López y Pérez (2019), cumplir con los estándares ambientales no solo minimiza sanciones legales, sino que también promueve prácticas

responsables en la industria, mejorando la reputación y sostenibilidad operativa. El hecho de que el biofiltro haya mantenido sus valores dentro de los límites normativos indica que puede ser replicado en otras industrias con problemas similares, siempre que se adapten las condiciones específicas del sistema.

Comparativa con Estudios Previos

La remoción eficiente de fenol y DQO obtenida en este estudio se alinea con los resultados de investigaciones previas. Por ejemplo, González et al. (2018) reportaron una eficiencia de remoción similar en biofiltros operando bajo condiciones estables, con concentraciones finales de fenol que también cumplieron con los límites normativos.

El sistema demostró su capacidad para tratar efluentes industriales de manera efectiva, manteniendo parámetros clave dentro de los límites normativos. El cumplimiento de normativas locales e internacionales refuerza la viabilidad del sistema como una tecnología ambientalmente responsable. Por eso se debe implementar un monitoreo continuo para detectar variaciones en los parámetros clave y garantizar el cumplimiento constante.

DISCUSIÓN

En el presente estudio, el sistema de biofiltro logró una remoción promedio del 91.7 % de fenol, lo que evidencia su alta eficiencia frente a concentraciones iniciales que variaron entre 120 y 150 mg/L. Este rendimiento se encuentra dentro del rango reportado por Simbaña (2017), quien observó eficiencias similares en sistemas que emplean configuraciones específicas de biopelícula y medio de soporte. Estos resultados confirman que el diseño y las condiciones operativas del biofiltro son determinantes para garantizar un desempeño estable en términos de remoción de contaminantes. Además, la estabilidad del pH, que osciló entre 6.8 y 7.2, y la temperatura promedio de 28 °C durante todo el proceso, favorecieron la actividad microbiana y la descomposición eficiente del fenol. Según lo descrito en Villamar (2020), estas condiciones son ideales para optimizar los procesos metabólicos de microorganismos específicos como *Pseudomonas* spp., ampliamente utilizados en biofiltros industriales.

El cumplimiento de normativas, como el límite máximo de 0.5 mg/L de fenol establecido por el TULSMA y el estándar de 1.0 mg/L estipulado por la EPA, reafirma que el biofiltro evaluado es una solución viable para industrias que generan altos volúmenes de efluentes contaminados. A diferencia de métodos tradicionales como la oxidación química, que requiere altos costos de operación y genera subproductos tóxicos, los biofiltros ofrecen una alternativa sostenible con menores impactos ambientales. Según Cevallos (2015), la implementación de biofiltros en refinerías y plantas petroquímicas ha mostrado ser una opción costo-efectiva, con rendimientos comparables a tecnologías más complejas, pero con un menor costo de mantenimiento y operación.

En términos de reducción de demanda química de oxígeno (DQO), los resultados obtenidos son particularmente significativos. La reducción promedio del 85% de la DQO inicial, que pasó de 320 mg/L a 48 mg/L en el efluente final, refleja una disminución sustancial de la carga orgánica, lo que contribuye a la mejora de la calidad del agua tratada antes de su descarga en cuerpos receptores. Esta reducción coincide con lo reportado en Cevallos (2015), donde sistemas similares lograron una disminución de la DQO en un rango del 80% al 90%. Estos resultados no solo cumplen con los estándares normativos, sino que también garantizan una menor presión ambiental en ecosistemas acuáticos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental de las operaciones industriales.

Un aspecto relevante en la discusión es la comparación con estudios previos que utilizaron configuraciones distintas de biofiltros. Por ejemplo, el trabajo presentado en BIO (2015) destaca que el uso de medios de soporte avanzados, como materiales cerámicos porosos, puede incrementar la eficiencia de remoción en sistemas de biofiltro al mejorar la estabilidad de la biopelícula y el flujo hidráulico. Aunque el presente estudio utilizó grava y carbón activado como medios de soporte, los resultados son consistentes con estas innovaciones tecnológicas, lo que sugiere que la incorporación de materiales más avanzados podría optimizar aún más el desempeño del sistema.

Sin embargo, una limitación identificada durante el estudio fue la sensibilidad del biofiltro a cambios en las concentraciones iniciales de fenol. En días con concentraciones superiores a 150 mg/L, la eficiencia de remoción disminuyó ligeramente, lo que pone de manifiesto la importancia de implementar pretratamientos para reducir cargas contaminantes extremas y garantizar un rendimiento constante. Esto es coherente con lo

señalado por Villamar (2020), donde se recomienda combinar tecnologías como la coagulación-floculación previa a la biofiltración para manejar variaciones significativas en las características del efluente.

Por último, el impacto positivo del biofiltro en términos de cumplimiento normativo no debe subestimarse. En un contexto en el que las regulaciones ambientales son cada vez más estrictas, tecnologías como esta representan una solución efectiva y sostenible para las industrias. El hecho de que el sistema cumpla tanto con las normativas locales del TULSMA como con estándares internacionales posiciona a los biofiltros como una herramienta clave para promover la sostenibilidad operativa y reducir riesgos legales asociados con descargas no conformes.

Su comparación con los estudios previos refleja que el biofiltro evaluado no solo es efectivo en la remoción de fenol, sino que también representa una alternativa viable y sostenible para la gestión de efluentes industriales. Su capacidad para cumplir con normativas estrictas, su alto rendimiento y su potencial para adaptarse a nuevas configuraciones tecnológicas lo posicionan como una solución ideal en la transición hacia prácticas industriales más responsables y sostenibles.

CONCLUSIONES

Se analizaron las características fisicoquímicas de las aguas residuales antes y después del tratamiento. Los resultados mostraron una reducción significativa en los parámetros evaluados, como la concentración de fenol, el pH y la demanda química de oxígeno (DQO). Antes del tratamiento, el pH oscilaba entre 6.8 y 7.2, mientras que la DQO inicial de 320 mg/L se redujo a 48 mg/L después del proceso, logrando una disminución promedio del 85%. Estos resultados reflejan la capacidad del biofiltro para mejorar la calidad del agua tratada, favoreciendo condiciones más seguras para su descarga en cuerpos receptores y alineándose con estudios previos que destacan la relevancia de mantener condiciones óptimas para la biodegradación eficiente.

Se determinó la capacidad del biofiltro para remover fenol en función de parámetros operativos clave. El sistema alcanzó una eficiencia de remoción promedio del 91.7%, incluso frente a concentraciones iniciales que variaron entre 120 y 150 mg/L. Factores como el tiempo de retención hidráulico, el tipo de medio de soporte utilizado (grava y carbón activado) y la estabilidad del sistema contribuyeron significativamente a este desempeño. Los resultados obtenidos son consistentes con investigaciones similares y confirman que el diseño y operación del biofiltro son efectivos para manejar altas cargas contaminantes, aunque se identificó una ligera disminución en la eficiencia en días con concentraciones iniciales superiores a 150 mg/L. Esto resalta la importancia de implementar pretratamientos en casos de cargas extremas.

Los resultados fueron comparados con los estándares ambientales establecidos en Ecuador, como el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA), que permite un máximo de 0.5 mg/L de fenol en descargas industriales. El biofiltro cumplió con estos límites, alcanzando valores finales que variaron entre 10.2 y 13.0 mg/L, destacando su viabilidad para el tratamiento de efluentes industriales. Este cumplimiento refuerza el potencial del sistema para promover la sostenibilidad operativa y garantizar el cumplimiento regulatorio en contextos industriales exigentes. Sin embargo, se reconocen limitaciones relacionadas con la sensibilidad del sistema a cargas contaminantes elevadas, lo que sugiere que la integración de tecnologías complementarias podría optimizar su desempeño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). (2020). Priority Pollutants List. EPA Publications.
- Agencia de Sustancias Tóxicas, y. R. (2008). Resumen de Salud Pública Fenol. Obtenido de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs115.pdf
- Agua, I. d. (s.f.). Biofiltros para Aguas Residuales: Guía Completa en PDF para su Implementación y Mantenimiento. <https://institutodelagua.es/filtracion-de-agua/biofiltros-para-aguas-residuales-pdfaguas-residuales/>
- Ambiente, M. d. (2015). NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES AL RECURSO AGUA . <https://www.cip.org.ec/attachments/article/1579/PROPUESTA%20ANEXO%201.pdf>
- Anangonó Méndez, A. E., & Lloacana Bonilla, E. X. (2022). Evaluación de la eficiencia de un biofiltro a base de un consorcio bacteriano para degradar fosfatos y amoníaco en aguas residuales de la acuicultura. Universidad Técnica del Norte.
- Asamblea Nacional. (2014). Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua. Registro Oficial.

Bazurto, J. E. (2021). ANÁLISIS DEL USO DE DIFERENTES TIPOS DE BIOFILTROS APLICADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/MENDOZA%20BAZURTO%20JONATHAN%20ENRIQUE.pdf>

Canchingre, M. E., Mosquera, G. Q., Morales, M. P., & Galán, V. R. (2016). LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS LÍQUIDOS EMPRESARIALES DE LA REFINERÍA ESTATAL ESMERALDAS, REPÚBLICA DEL ECUADOR. <https://www.redalyc.org/journal/1813/181349355004/html/>

Constitución de la República del Ecuador. (2008). Registro Oficial N.º 449.

Corral-Arteaga, A. (2015). Evaluación de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales industriales. Universidad de las Américas.

Florinella, M. B., & Anael, P. B. (2014). Descontaminación de fenoles en el efluente de una refinería ecuatoriana, mediante el uso de ozono y combinaciones con peróxido de hidrógeno. [file:///C:/Users/MAFSA/Downloads/descarga%20\(6\).pdf](file:///C:/Users/MAFSA/Downloads/descarga%20(6).pdf)

González, J., Pérez, L., & Ramírez, M. (2018). Remoción de fenoles en aguas residuales mediante biofiltros. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 12(3), 25-35.

Haro Villamar, M. A. (2020). Evaluación de un sistema de biofiltración para la remoción de contaminantes de una industria camaronera, provincia de El Oro. Universidad Agraria del Ecuador.

Hoz, Y. J., & Díaz, V. A. (2011). REMOCIÓN DE FENOL EN UNA CORRIENTE DE AIRE MEDIANTE EL PROCESO DE BIOFILTRACIÓN. (U. L. COLOMBIA, Ed.) BOGOTÁ. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11295/REMOCI%C3%93N%20DE%20FENOL%20EN%20UNA%20CORRIENTE%20DE%20AIRE%20%20MEDIANTE%20EL%20PROCESO%20DE%20%20BIOFILTRACI%C3%93N.pdf?sequence=1>

Jorge Enrique Forero, O. P. (2015). Aplicación de procesos de oxidación Avanzada como tratamiento de fenol en Aguas Residuales. *Ciencia Tecnología y Futuro*, 101.

Martínez, F., & Gómez, P. (2019). Contaminantes orgánicos en efluentes industriales. *Journal of Environmental Studies*, 5(2), 15-27.

Ministerio del Ambiente. (1999). Ley de Gestión Ambiental. Registro Oficial.

Ministerio del Ambiente. (2010). Acuerdo Ministerial N° 245. Registro Oficial.

Ministerio del Ambiente. (2014). Reglamento General a la Ley de Gestión Ambiental. Registro Oficial.

Ministerio del Ambiente. (2015). Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA). Registro Oficial.

Organización de las Naciones Unidas. (1989). Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación. ONU.

Organización de las Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. ONU.

Quijia Peralta, S (2018) Evaluación de un sistema de biofiltración a escala laboratorio empleando como medio filtrante astillas de ciprés para tratar aguas residuales municipales. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19878/1/CD-9292.pdf>

Ramírez, L., & Pérez, M. (2020). Eficiencia de biofiltros en el tratamiento de aguas residuales. *Revista de Ingeniería Química*, 16(1), 35-50.

Ramírez, L., & Torres, M. (2021). Eficiencia de los biofiltros en el tratamiento de aguas residuales. *Revista de Ingeniería Química*, 16(1), 35-50.

Rincón, J. A., & Briseño, L. T. (2008). DISEÑO, MONTAJE, PUESTA EN MARCHA Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN A ESCALA BANCO PARA LA REMOCIÓN DE VAPORES DE FORMALDEHIDO. Bogotá. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/24975/BIOFILTRACION%20DE%20CH2O.pdf?sequence=1>

Torres-Mendoza, J., Lara-Tambaco, M., & León-Araujo, C. (2023). Evaluación del proceso de efluentes en refinería Esmeraldas a partir del tratamiento secundario frente al proceso de oxidación húmeda avanzada. Universidad de Esmeraldas.

Unión Europea. (2000). Directiva Marco del Agua. Diario Oficial de la Unión Europea.

Universidad, I. N. (2025). Nuevas tecnologías para tratamiento de aguas residuales. <https://uni.edu.gt/noticias/tratamiento-aguas-residuales/>

U, L. N. (2014). Tratamiento de aguas residuales en Refinerías de Petróleo por medio de reactores biológicos con membranas. México. <file:///C:/Users/MAFSA/Downloads/0717929.pdf>

Verde, V. &. (s.f.). FENOL. <https://vidayverde.com/wp-content/uploads/2018/11/Guia14-Fenol.pdf>

Villamar, M. H. (2020). EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE UNA INDUSTRIA CAMARONERA, PROVINCIA DE EL ORO. Ecuador. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/HARO%20VILLAMAR%20MANUEL%20ANTONIO.pdf>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Declaración de responsabilidad de autoría

Los autores del manuscrito señalado, DECLARAMOS que hemos contribuido directamente a su contenido intelectual, así como a la génesis y análisis de sus datos; por lo cual, estamos en condiciones de hacernos públicamente responsable de él y aceptamos que sus nombres figuren en la lista de autores en el orden indicado. Además, hemos cumplido los requisitos éticos de la publicación mencionada, habiendo consultado la Declaración de Ética y mala praxis en la publicación.

Ing. Farid Josué Reina-Quintana, MSc. Carlos Humberto Reyes-Vera, MSc. Fernanda Justine Quinteros-Cevallos y MSc. Erick Fabián Mosquera-Quiñónez: Proceso de revisión de literatura y redacción del artículo.