



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Optimización del tratamiento de aguas residuales de buques
mediante tecnologías avanzadas de postratamiento*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Santiago Domínguez Gómez

DIRECTORES: Lorena González Gil

Rosa Devesa Rey

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Optimización del tratamiento de aguas residuales de buques
mediante tecnologías avanzadas de postratamiento*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

La contaminación marina generada por buques representa un reto ambiental significativo. Este Trabajo de Fin de Grado aborda la optimización del tratamiento de aguas residuales en buques de la Armada mediante tecnologías avanzadas de postratamiento. En concreto, se investiga la aplicación combinada de radiación ultravioleta (UV), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) e hidrotalcita calcinada como sistema de mejora de la eliminación de contaminantes como el nitrógeno, el fósforo, la turbidez y la materia orgánica.

Tras una caracterización inicial del agua residual y la evaluación de las tecnologías empleadas en las plantas TAR actuales, se desarrolla un diseño experimental tipo Box-Behnken para analizar el efecto de distintos parámetros operativos. Los resultados obtenidos demuestran que la combinación de estos tratamientos logra mejoras significativas en la calidad del efluente, acercándose al cumplimiento de la normativa establecida por la resolución MEPC.227(64) del convenio MARPOL.

Además, se analiza la viabilidad técnica y operativa de incorporar esta tecnología en buques militares, concluyendo que su integración es factible y beneficiosa. El estudio contribuye a avanzar en soluciones sostenibles para la gestión de aguas residuales, reforzando el compromiso ambiental de la Armada.

PALABRAS CLAVE

Agua residual, Radiación UV, Peróxido de hidrogeno, Hidrotalcita, Tratamiento

AGRADECIMIENTOS

Entre muchas de las cosas que decía mi abuela, una de ellas es ser agradecido con la gente que te apoya a seguir a delante. Y esta es una ocasión que lo merece, en primer lugar, darle las gracias a ella por ser siempre una referencia en mi vida.

Este proyecto no hubiese llegado a buen puerto si no hubiese sido por la implicación y profesionalidad que han demostrado mis dos tutoras, Lorena y Rosa. Muchas gracias por toda vuestra ayuda y estar en todo momento atentas y en el momento que se necesita, por esas correcciones a altas horas de la noche, por resolver la infinidad de dudas que he tenido y por lidiar con un horario de trabajo tan complicado que tenemos los infantes.

En segundo lugar, agradecer a mi familia y pareja, por saber dar los consejos oportunos en los momentos más complicados y estar tanto en las malas como en las buenas.

Agradecer a todo el personal de los buques “Cantabria” y “Almirante Juan de Borbón” por mostrar una gran profesionalidad y ayudar con la obtención de muestras, que sin ellas hubiese sido imposible realizar este proyecto.

Finalmente, no puedo acabar esta sección sin agradecer a todos mis compañeros de la promoción de “Los Húngaros” 425-155, por haber demostrado ser mi segunda familia.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Antecedentes	8
1.3 Justificación	9
1.4 Objetivos	10
1.5 Estructura	10
2 ESTADO DEL ARTE	12
2.1 Tipos de aguas residuales en buques.....	12
2.1.1 Aguas grises.....	12
2.1.2 Aguas negras.....	12
2.1.3 Aguas de lastre.....	13
2.1.4 Aguas de sentina	13
2.2 Principales contaminantes de las aguas residuales	14
2.2.1 Patógenos	14
2.2.2 Materia Orgánica	15
2.2.3 Nutrientes.....	15
2.2.4 Sólidos en suspensión	16
2.2.5 Otros compuestos químicos	17
2.3 Normativas – Convenio MARPOL.....	17
2.3.1 Anexos	17
2.3.2 Anexo IV – Prevención de la contaminación por aguas residuales de buques.....	18

2.3.3 Resolución MEPC.227(64) – Límites de descarga.....	18
2.4 Tratamientos de aguas contaminadas.....	20
2.4.1 Técnicas físicas.....	21
2.4.2 Técnicas químicas.....	21
2.4.3 Técnicas biológicas.....	23
2.5 Planta de tratamiento de aguas residuales (TAR) en buques de la Armada	24
2.6 Técnicas emergentes de postratamiento de aguas contaminadas.....	25
2.6.1 Hidróxidos Dobles Laminares (HDL)	25
2.6.2 Radiación UV	27
2.6.3 Radiación UV y peróxido de hidrógeno (<i>H2O2</i>)	30
3 Desarrollo del TFG.....	32
3.1 Producción de hidrotalcita	32
3.1.1 Preparación de las disoluciones	32
3.1.2 Precipitación – Formación de hidrotalcita.....	33
3.2 Lámpara ultravioleta y peróxido de hidrógeno	35
3.3 Obtención y preparación del agua residual	36
3.4 Experimentos de tratamiento de aguas contaminadas.....	36
3.4.1 Experimento preliminar con hidrotalcita	37
3.4.2 Experimento preliminar con UV y <i>H2O2</i>	37
3.4.3 Diseño experimental Box-Behnken (BBD)	38
3.4.4 Experimentos lámpara UV, <i>H2O2</i> e hidrotalcita	39
3.5 Métodos de análisis	39
3.5.1 Medición del pH	39
3.5.2 Turbidez.....	40
3.5.3 Nitrógeno Total.....	41
3.5.4 Fósforo Total	41
3.5.5 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	42
3.5.6 Nitrógeno total, carbono orgánico total e inorgánico	43
4 Resultados	44
4.1 Caracterización agua residual	44
4.1.1 Cumplimiento de la normativa	45
4.2 Experimentos preliminares	45
4.2.1 Evaluación del efecto de la hidrotalcita en la recuperación de aguas residuales en buques	45
4.2.2 Evaluación del efecto de la aplicación de UV y <i>H2O2</i> en la recuperación de aguas residuales en buques.....	47

4.3 Evaluación de la eficacia combinada de la lámpara UV, H2O2 e hidrotalcita en el tratamiento de aguas residuales en buques	48
4.3.1 Análisis de la turbidez	50
4.3.2 Análisis carbono orgánico total	55
4.3.3 Análisis de carbono inorgánico	60
4.3.4 Análisis del nitrógeno	66
4.3.5 Análisis del fósforo.....	71
4.3.6 Propuesta de tratamiento óptimo y discusión global de resultados	71
4.3.7 Viabilidad de implementación en la Armada	72
5 Conclusiones y líneas futuras	74
5.1 Conclusiones	74
5.2 Líneas futuras	75
6 Bibliografía.....	77
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	83
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Buque de Aprovisionamiento en Combate BAC A-15 “Cantabria” (elaboración propia).....	8
Figura 2-1 Porcentaje de las diferentes aguas generadas en los buques (elaboración propia)	12
Figura 2-2 Aguas de lastre en buques (tomada de [12]).....	13
Figura 2-3 Planta TAR F-102 (elaboración propia)	13
Figura 2-4 Floculante empleado en el buque BAC “Cantabria” (elaboración propia).....	22
Figura 2-5 Generador de Ozono buque F-105 (elaboración propia)	22
Figura 2-6 Planta TAR F-102 (elaboración propia)	24
Figura 2-7 Toma de agua residual F-102 (elaboración propia).....	25
Figura 2-8 Estructura Hidróxidos dobles laminares (tomada de [41])	25
Figura 2-9 Espectro electromagnético de la luz (tomada de [16])	28
Figura 2-10 Formación radicales de hidroxilo (elaboración propia).....	31
Figura 3-1 Nitrato de magnesio, carbonato de sodio y nitrato de aluminio	32
Figura 3-2 Montaje de estación de goteo para formación de la hidrotalcita	33
Figura 3-3 Estación de filtrado	34
Figura 3-4 Secado hidrotalcita	34
Figura 3-5 Hidrotalcita seca	34
Figura 3-6 Componentes de la lámpara UV (elaboración propia)	35
Figura 3-7 Peróxido de hidrógeno (elaboración propia)	36
Figura 3-8 Montaje lámpara UV en horizontal	37
Figura 3-9 Montaje del experimento UV/ H₂O₂	39
Figura 3-10 Medidor de pH Hanna Instruments (elaboración propia).....	40
Figura 3-11 Turbidímetro (elaboración propia)	41
Figura 3-12 Blanco para medición de fósforo total (elaboración propia)	42
Figura 3-13 Valoración de DQO, tomando color rojizo (elaboración propia).....	43
Figura 4-1 Evolución de la DQO en el experimento preliminar	46
Figura 4-2 Diagrama de Pareto - Turbidez.....	50
Figura 4-3 TURBIDEZ – HDL vs UV/ H ₂ O ₂ a tiempo 1 (180 min)	51
Figura 4-4 TURBIDEZ – HDL vs UV/ H ₂ O ₂ a tiempo 0 (105 min).....	51
Figura 4-5 TURBIDEZ – HDL vs UV/ H ₂ O ₂ a tiempo -1 (30 min)	52
Figura 4-6 TURBIDEZ: HDL vs UV/H ₂ O ₂ a tiempo 0 (superficie).....	52
Figura 4-7 TURBIDEZ: HDL vs t	53
Figura 4-8 TURBIDEZ: UV/ H ₂ O ₂ vs t.....	53
Figura 4-9 Turbidez: Predicción vs resultados.....	54

Figura 4-10 Diagrama de Pareto para efecto estandarizado - TOC.....	55
Figura 4-11 TOC – HDL vs UV/ H ₂ O ₂ a tiempo -1 (30 min).....	56
Figura 4-12 TOC – HDL vs UV/ H ₂ O ₂ a tiempo 0 (105 min)	57
Figura 4-13 TOC – HDL vs UV/ H ₂ O ₂ a tiempo 1 (180 min).....	57
Figura 4-14 TOC – HDL vs t a 0% UV/ H₂O₂	58
Figura 4-15 TOC – UV/ H₂O₂ vs t a HDL constante (2,5 mg/ml).....	58
Figura 4-16 Predicción vs Resultados - TOC.....	59
Figura 4-17 Diagrama de Pareto para efecto estandarizado - IC.....	61
Figura 4-18 IC – HDL vs UV/H ₂ O ₂ a tiempo -1 (30 min).....	62
Figura 4-19 IC – HDL vs UV/H ₂ O ₂ a tiempo 0 (105 min).....	62
Figura 4-20 IC – HDL vs UV/H ₂ O ₂ a tiempo 1 (180 min).....	63
Figura 4-21 IC – HDL vs t a 0% UV/ H₂O₂	63
Figura 4-22 IC - UV/H ₂ O ₂ vs t a HDL constante (2,5 mg/ml)	64
Figura 4-23 Predicción vs Resultados - IC.....	65
Figura 4-24 Diagrama de Pareto para efecto estandarizado - N.....	66
Figura 4-25 N – HDL vs UV/H ₂ O ₂ a tiempo -1 (30 min).....	67
Figura 4-26 N – HDL vs UV/H ₂ O ₂ a tiempo 0 (105 min)	68
Figura 4-27 N – HDL vs UV/H ₂ O ₂ a tiempo 1 (180 min).....	68
Figura 4-28 N – HDL vs t a 0% UV/H ₂ O ₂	69
Figura 4-29 N - UV/H ₂ O ₂ vs t a HDL constante.....	69
Figura 4-30 Predicción vs Resultados - N.....	70
Figura 4-31 Porcentajes de eliminación en los 15 experimentos realizados según el diseño Box- Behnken	72
Figura 0-1 ODS Agenda 2030 (tomada de [67])	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Cuadro resumen de los tipos de aguas y sus contaminantes en los buques (elaboración propia)	14
Tabla 2-2 Ventajas y desventajas del empleo de radiación UV (elaboración propia).....	30
Tabla 3-1 Combinaciones de los adsorbentes del proyecto.....	38
Tabla 3-2 Experimentos propuestos por el método de diseño Box-Behnken	38
Tabla 4-1 Caracterización agua F-102	44
Tabla 4-2 Comparativa valores F-102 vs límites MARPOL.....	45
Tabla 4-3 Experimento preliminar con hidrotalcita	45
Tabla 4-4 Resultados DQO experimento preliminar.....	46
Tabla 4-5 Resultados experimento preliminar radiación UV y H2O2 . <i>f.r.</i> indica que la medida está fuera de rango.....	47
Tabla 4-6 Combinación lámpara UV, H2O2 e HDL	49
Tabla 4-7 Porcentajes de eliminación, combinación lámpara UV, H ₂ O ₂ y HDL	50
Tabla 4-8 Datos para la ecuación generadora de resultados -TOC	60
Tabla 4-9 Datos para la ecuación generadora de resultados - IC	66
Tabla 4-10 Datos para la ecuación generadora de resultados - N	71
Tabla 4-11 Resultados del fósforo.....	71

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Las masas de agua salada que forman parte de nuestro planeta Tierra, conocidas como mares y océanos abarcan 361132000 km^2 , es decir, aproximadamente el 70% de la superficie mundial [1]. Por tanto, el estado de los mares y océanos tiene una repercusión directa a nuestras vidas. Entre las consecuencias negativas derivadas de la contaminación de los océanos destacan:

- Impacto en la vida marina: la contaminación de las aguas supone la muerte de especies marinas, ya que las sustancias tóxicas, como metales pesados, o sustancias químicas como el petróleo o combustibles, son letales para los peces, aves, mamíferos marinos y otro tipo de especies, dañando así a los ecosistemas. Los hábitats de estos seres vivos se ven contaminados quedándose en una situación crítica. Los manglares o arrecifes de coral son claros ejemplos de cómo, en la actualidad, se está perdiendo una gran biodiversidad en los mares [2]. Además, otras especies se ven también afectadas, destacando las algas, dando lugar a un fenómeno conocido como *eutrofización*, que se da cuando las algas crecen de manera descontrolada debido al exceso de nutrientes provenientes de las aguas residuales o fertilizantes, generando un exceso de nitrógeno y fósforo [3]. Las algas son seres vivos que consumen el oxígeno de las aguas, por lo que su sobrecrecimiento genera zonas muertas donde ninguna especie es capaz de vivir. Por otro lado, los diferentes contaminantes favorecen la acidificación de los mares, donde la absorción de dióxido de carbono (CO_2) disminuye el pH afectando, por ejemplo, a los moluscos.
- Alteraciones en el clima: los mares y océanos contaminados pierden la capacidad de regular el clima, ya que los daños ocasionados afectan al ciclo de vida del fitoplancton, organismos protagonistas de la producción de oxígeno [4]. De este modo, la contaminación de los mares es uno de los principales agentes del cambio climático.
- Impacto en el ser humano: la contaminación de los mares tiene una repercusión directa en la salud del ser humano, ya que los contaminantes son absorbidos y acumulados en los tejidos de los organismos marinos que se ingerirán como alimento en un futuro [5]. Otro aspecto donde la contaminación es clave es en la economía mundial. La industria pesquera, debido a la escasez de zonas de pesca, debe invertir más dinero y tiempo en estas actividades. Además, la contaminación de las playas ocasiona que se reduzca el turismo en estas zonas.

A nivel global, la urbanización acelerada de los grandes países debido al crecimiento poblacional está acompañado de un aumento significativo de los residuos que son vertidos a los mares, océanos, ríos o lagos, planteándose así la búsqueda de sistemas más eficientes y sostenibles para su tratamiento. Cabe

destacar que todos los años aproximadamente llegan a los mares y océanos 10 millones de toneladas de residuos [6]. Teniendo un 80% de estos residuos su origen en tierra [7], por lo que el restante 20% son generados en los mares, destacando entre otros los buques de transporte, pesca, carga, etc. Cabe mencionar también las plataformas petrolíferas. Por lo tanto, la gestión y tratamiento de aguas residuales generadas en buques son un desafío crítico en la preservación del medio ambiente y la salud pública. Resulta, por lo tanto, especialmente importante la existencia de un marco normativo que regula su gestión y vertido.

Concretamente, el tratamiento de aguas residuales a bordo de los buques tiene como principal regulación el Anexo IV del Convenio Internacional para Prevenir Contaminación por los Buques (MARPOL), administrado por la Organización Marítima Internacional (OMI). Este anexo establece normas para la prevención de la contaminación marina por aguas sucias proveniente de los buques. Además del Convenio MARPOL, los buques deben cumplir con las regulaciones nacionales de los países en los que se encuentran navegando, es decir, en el caso de las aguas de España, la prevención de vertidos desde embarcaciones de recreo está regulada por el Capítulo V de la Orden FOM/1144/2003, que establece normas específicas para la gestión de residuos y aguas residuales a bordo.

La gestión y tratamiento de aguas residuales son un desafío crítico en la preservación del medio ambiente y la salud pública. A nivel global, la urbanización acelerada de los grandes países debido al crecimiento poblacional está acompañado de un aumento significativo de los residuos que son vertidos a los mares, océanos, ríos o lagos, planteándose así la búsqueda de sistemas más eficientes y sostenibles. Cabe destacar que todos los años aproximadamente llegan a los mares y océanos 10 millones de toneladas de residuos. Teniendo un 80% de estos residuos su origen en tierra, por lo que sólo el restante 20% son generados en los mares, destacando entre otros los buques de transporte, pesca, carga, etc. Cabe mencionar también las plataformas petrolíferas.

1.2 Antecedentes

Desde que se comenzaron a tratar las aguas residuales se han utilizado ciertos procedimientos que hoy en día serían los llamados convencionales como la sedimentación, la filtración o los reactores de lodos activos, entre otros. Estos métodos se ha demostrado que son efectivos a la hora de reducir los contaminantes, pero presentan limitaciones en términos energéticos y económicos, debido a los elevados costes de operación. Además, tienen limitaciones en la capacidad para eliminar contaminantes emergentes, como los microplásticos, y contaminantes provenientes de los fármacos, patógenos y metales pesados.

En los buques de la Armada, cabe mencionar que los sistemas que utilizan son fisicoquímicos (véase Figura 1-1), los cuales poseen una eficacia limitada a la hora de realizar la depuración.



Figura 1-1 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Buque de Aprovisionamiento en Combate BAC A-15 “Cantabria” (elaboración propia)

En la actualidad, existe un interés creciente en mejorar estos tratamientos, por tanto, el desarrollo y optimización de nuevas técnicas que puedan incorporarse a los sistemas de depuración actuales resulta de gran interés. Esta optimización busca principalmente mejorar la eficiencia de los procesos ya existentes y desarrollar nuevas tecnologías que cumplan con los criterios de sostenibilidad, eficiencia energética y económicos con resultados más favorables que las tecnologías ya existentes. Entre estas innovaciones destacan:

- Nuevos materiales adsorbentes, hidrotalcitas: se tratan de hidróxidos dobles laminares, han demostrado ser un adsorbente eficaz para la eliminación de contaminantes orgánicos en aguas residuales. La modificación estructural de la hidrotalcita permite ajustar sus propiedades adsorbentes, mejorando su eficiencia en la remoción de diversos contaminantes presentes en aguas residuales [8].
- Tecnologías avanzadas: la electrocoagulación, sistemas de membranas (osmosis inversa) y la oxidación avanzada (UV) utilizados para el tratamiento de contaminantes difíciles de eliminar.
- Las herramientas de modelado y simulación: hoy en día con el auge de las inteligencias artificiales y de las tecnologías de simulación, nos permite predecir y mejorar los sistemas de tratamiento, reduciendo costes y optimizando recursos.

Existen pocos estudios que intenten optimizar el tratamiento de aguas residuales en buques aplicando procesos de oxidación avanzada o hidróxidos dobles laminares, y en ningún caso se han intentado combinar. Sin embargo, hay grandes avances en la materia de tratamiento de aguas residuales en la industria textil, como es el trabajo de fin de grado de Hidalgo Serrano “Tratamiento combinado de adsorción y oxidación para la eliminación de compuestos coloreados en aguas” [9], donde obtiene grandes eficiencias con la aplicación de radiación UV, peróxido de hidrógeno y de hidrotalcita para la eliminación de colorantes. La eficacia de la hidrotalcita para el tratamiento de aguas contaminadas también se ha probado en los TFG de Pozueco Mariño “Dopaje de una hidrotalcita de Mg/Al con surfactantes aniónicos para el tratamiento de aguas” [10] y Delgado Pérez “Preparación de arcillas sintéticas para el tratamiento de aguas contaminadas” [11].

Debido a los buenos resultados obtenidos en la eliminación de colorantes textiles en el proyecto de Hidalgo [9], donde combinando tratamientos con radiación UV, oxidación con H_2O_2 y la adsorción en hidrotalcita, se maximizaban los rendimientos del tratamiento, en el presente TFG se tratará de estudiar la viabilidad de aplicar dichos tratamientos en las aguas contaminadas en los buques de la Armada.

1.3 Justificación

El presente proyecto surge debido a la importancia del problema de la contaminación de los mares y océanos y el papel protagonista que los buques de todo el mundo tienen sobre este fenómeno, resulta evidente que, considerando la función crucial que desempeñan a diario (comercio, transporte, industria pesquera, etc.) no es viable plantear una disminución de su impacto ambiental con el recorte de sus actividades. El crecimiento del transporte marítimo resulta beneficioso tanto para la economía como para el medio ambiente ya que, en comparación con otros medios de transporte, implica menores costes y un impacto ambiental más reducido. No obstante, hay que reconocer que los buques, como se ha mencionado anteriormente, suponen un 20% de los residuos que se vierten a los mares por lo que este trabajo trata de analizar e investigar nuevas tecnologías de tratamiento de aguas, que sean más optimizadas que las tecnologías empleadas en la actualidad.

Respecto a España, más específicamente en la Armada, en las últimas décadas esta institución se ha presentado como líder internacionalmente en el desarrollo de estas tecnologías, buscando buques con el menor impacto ambiental posible. La Armada Española manifiesta su compromiso con el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL) mediante la integración de sus principios en la normativa y operativa naval, a pesar de que los buques de guerra están formalmente exentos de su cumplimiento obligatorio, según lo establece la propia Organización Marítima

Internacional (OMI). No obstante, España, adopta un enfoque de cumplimiento voluntario, por el cual los buques de la Armada se ajustan a los estándares del convenio siempre que sea técnica y operativamente posible. Este compromiso se traduce en diversas acciones concretas. En primer lugar, se incorporan en la normativa interna de la Armada los requisitos de los distintos anexos del MARPOL, especialmente en lo referente al manejo de hidrocarburos (Anexo I), sustancias peligrosas, basuras (Anexo V), aguas sucias (Anexo IV) y emisiones atmosféricas (Anexo VI).

Los buques están dotados de sistemas específicos como separadores de agua y aceite, incineradores de residuos, tanques de retención de aguas grises y negras, y sistemas para la clasificación y almacenamiento de residuos sólidos, lo que les permite operar bajo criterios ambientales sostenibles. A ello se suma un sistema de auditorías e inspecciones internas, que permite verificar el cumplimiento de los procedimientos ambientales y detectar oportunidades de mejora.

Es decir, aunque no estén legalmente obligados, los buques de guerra de la Armada Española operan bajo una filosofía de responsabilidad ambiental, asumiendo los principios del MARPOL como guía para su conducta en la mar. Esto refuerza el compromiso de España con la protección del medio marino, tanto desde su flota mercante como desde su flota militar, en línea con los objetivos de sostenibilidad y seguridad marítima promovidos a nivel internacional

En este contexto, este proyecto surge para estudiar un sistema de tratamiento que combina la radiación ultravioleta (UV), el peróxido de hidrogeno y un adsorbente sintetizado en el propio laboratorio, la hidrotalcita. La radiación UV es vital para la purificación del agua y con la incorporación del H_2O_2 mejora la eficiencia de los rayos UV para eliminar contaminantes orgánicos persistentes. A mayores se emplearán los hidróxidos dobles laminares que adsorberán compuestos orgánicos y se estudiará la viabilidad para reducir la cantidad de nutrientes presentes en el agua, como el fósforo y el nitrógeno.

1.4 Objetivos

En vista a lo expuesto anteriormente, es evidente que hay que continuar con el desarrollo e investigación de las tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales. Por ello, en la realización de este Trabajo de Fin de Grado, para estudiar la optimización de tratamientos de aguas residuales de buques se persiguen los siguientes objetivos principales:

- Evaluar la eficacia de un sistema combinado de radiación ultravioleta (UV), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y adsorción con hidrotalcita (HDL), en la eliminación de contaminantes prioritarios como materia orgánica, nitrógeno (N), fósforo (P) y turbidez, presentes en aguas residuales reales extraídas de buques.
- Determinar las condiciones óptimas de operación de los tratamientos mediante la aplicación de un diseño experimental tipo Box-Behnken, que permita analizar el efecto de variables como el tiempo de exposición a la radiación UV, la concentración de H_2O_2 y la dosis de adsorbente.
- Analizar la viabilidad técnica y operativa de implementar el sistema en plantas TAR de buques de la Armada, considerando las limitaciones de espacio, energía y mantenimiento a bordo.

Como fin último, con este TFG se pretende contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles y eficientes para el tratamiento de aguas residuales en entornos navales, en línea con los principios del Convenio MARPOL y el compromiso ambiental voluntario adoptado por la Armada Española.

1.5 Estructura

En cuanto a la elaboración y organización del presente trabajo, se ha estructurado de manera clara y lógica, con el objetivo de facilitar su comprensión. Tras el apartado inicial de introducción, en el que se expone la motivación y el contexto que da origen al estudio, se comienza explicando los diferentes tipos de aguas residuales que se producen en los buques y los principales contaminantes presentes en estas.

Una vez explicadas las aguas y los contaminantes se entra en materia con las normativas y límites que regulan las aguas residuales, el Convenio MARPOL y su resolución MEPC.227 (64). Tras esto se detallará en los diferentes tratamientos por las que atraviesa el agua residual para la eliminación de contaminantes, se explica brevemente el funcionamiento de las plantas TAR en los buques de la ARMADA. Para finalizar se explican las diferentes técnicas emergentes en el tratamiento de aguas residuales.

Tras finalizar el estado del arte, se detallan los procedimientos y técnicas empleados en la fase experimental del presente proyecto.

Seguidamente se exponen y discuten los resultados obtenidos en la fase experimental, y se propone un tratamiento óptimo y se estudia la viabilidad de aplicarlo en los buques de la Armada.

Se acaba el presente proyecto con unas conclusiones basadas en los datos estudiados y unas líneas futuras.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Tipos de aguas residuales en buques

Las diferentes aguas residuales generadas en buques deben atravesar una serie de tratamientos para poder cumplir las diferentes normativas internacionales que regulan la contaminación de los mares y océanos, además de proteger el medioambiente. Los buques engloban personas y maquinarias, por lo que son factores que generan una gran cantidad de residuos y no todos pertenecen al mismo grupo, por lo que dependiendo de las aguas residuales que se generen, tendrán que pasar por un tratamiento u otro. A continuación se describen los principales tipos de aguas residuales que se generan en los buques.

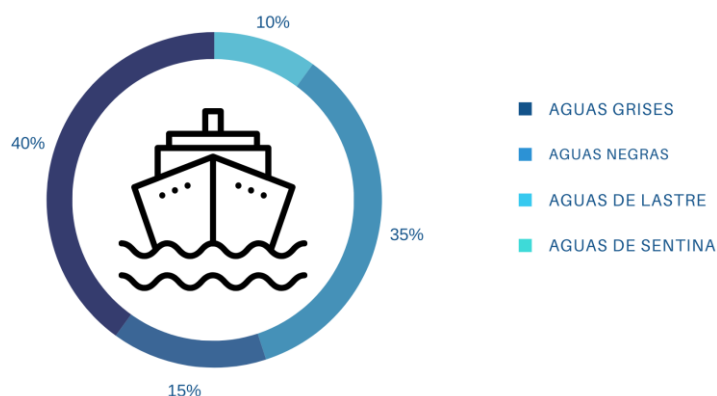


Figura 2-1 Porcentaje de las diferentes aguas generadas en los buques (elaboración propia)

2.1.1 Aguas grises

Las aguas grises son las provenientes de las cocinas, duchas, bañeras, lavabos y de la lavandería [12], por lo que son aguas que no contienen residuos fecales. En su composición suelen contener productos químicos como los detergentes empleados en la lavandería, grasas y aceites, entre otros tipos de contaminantes. Son aguas que no se pueden verter directamente a los mares y tienen que ser tratadas. Suelen suponer alrededor del 40% del residuo líquido producido a bordo de un barco (Figura 2-1) [13].

2.1.2 Aguas negras

Las aguas comúnmente conocidas como aguas negras son las que son generadas en inodoros, urinarios desechos de los espacios de servicio médico y los espacios destinados a los animales. Debido a esto las aguas negras, en el mayor de los casos, se componen de material biológico procedente del material fecal y la orina, de microorganismos patógenos y de productos químicos procedente de los

fármacos y productos de limpieza empleados. Dado el alto potencial contaminante de las aguas negras deben ser tratadas antes de ser descargadas al mar. Es por ello que, a pesar de producirse en menor volumen que las aguas grises, deben de tratarse siempre ya que producen más contaminación en proporción que otro tipo de aguas [14] [15].

2.1.3 Aguas de lastre

Las aguas de lastre son aguas cruciales para el correcto funcionamiento de los buques, ya que estas se bombean en los tanques para ganar estabilidad, equilibrio y seguridad durante las navegaciones (Figura 2-2). Estas aguas se toman en los diversos puertos y se descargan en otros puertos o grandes cuerpos de agua. Estas aguas pueden contener organismos marinos invasivos y sedimentos que, si no son tratados, causarán problemas en el ecosistema cercano a los puertos donde se descarguen.

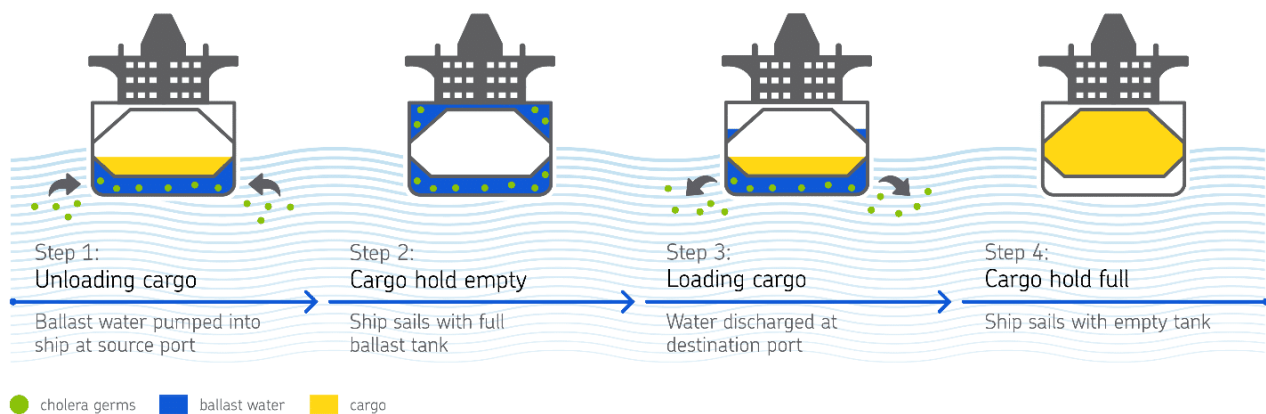


Figura 2-2 Aguas de lastre en buques (tomada de [12])

2.1.4 Aguas de sentina

Las aguas de sentina son los desechos líquidos que se acumulan en el punto más bajo de un barco (Figura 2-3), denominado sentina. Esta mezcla puede incluir combustible, aceites, productos químicos, materia orgánica y agua de mar, lo que las hace altamente contaminantes y perjudiciales para el ecosistema marino. Las aguas de sentinas debido a su composición, que cuenta con una importante proporción de hidrocarburos y lubricantes, son difíciles de tratar ecosistema marino. Las aguas de sentinas debido a su composición cuentan con una importante proporción de hidrocarburos y lubricantes, por lo que son difíciles de tratar en los buques. en los buques.



Los desechos van a parar por debajo del suelo de las máquinas, la **sentina**.

Figura 2-3 Planta TAR F-102 (elaboración propia)

A modo de resumen de los tipos de aguas residuales que generan los buques, destaca la siguiente Tabla 2-1:

TIPO DE AGUA	ORIGEN A BORDO	PRINCIPALES CONTAMINANTES
Aguas Negras	Inodoros, urinarios y enfermerías	Elevada materia orgánica, nutrientes (N y P) en altas concentraciones, patógenos y productos químicos provenientes de los fármacos.
Aguas Grises	Duchas, lavabos, lavandería y cocinas.	Productos químicos (limpieza), grasas y aceites (hidrocarburos) y posibles patógenos.
Aguas de lastre	Lastre	Organismos biológicos invasores.
Aguas de sentina	Sala de máquinas	Mezcla de hidrocarburos, solventes, desengrasantes, anticongelantes, metales pesados y productos de limpieza.

Tabla 2-1 Cuadro resumen de los tipos de aguas y sus contaminantes en los buques (elaboración propia)

2.2 Principales contaminantes de las aguas residuales

2.2.1 Patógenos

Los microorganismos patógenos presentes en las aguas residuales representan un riesgo grave para la salud pública, ya que pueden causar enfermedades infecciosas al ingerirse o entrar en contacto con los seres vivos. La contaminación microbiológica del agua ocurre principalmente por la descarga de aguas residuales sin tratar que contienen desechos animales y humanos.

Entre los efectos más graves que provocan los patógenos presentes en las aguas se encuentran: enfermedades gastrointestinales (cólera, disentería y gastroenteritis), fiebres entéricas, infecciones cutáneas y respiratorias y en algunos casos el contacto en seres humanos también genera resistencia a antibióticos [16].

Entre los principales patógenos que se han encontrado en las aguas destacan:

- Cólera (*Vibrio cholerae*): se propaga a través de aguas contaminadas por heces humanas, ya que resisten a ambientes acuáticos y se adhieren al zooplancton. Causante de diarreas intensas y deshidratación.
- Salmonelosis y fiebre tifoidea (*Salmonella spp.*): se propaga a través de aguas contaminadas por aguas fecales, generan infecciones que afectan al tracto intestinal y en menor medida al torrente sanguíneo.
- Disentería bacilar (*Shigella spp.*): causante de diarreas hemorrágicas y fiebres altas.
- E. coli (*Escherichia coli*): este patógeno utiliza como vector las aguas contaminadas procedentes de desechos humanos y animales, causante de gastroenteritis, diarreas hemorrágicas y en los casos más graves, síndrome urémico hemolítico.

El tratamiento microbiológico de las aguas residuales es fundamental para prevenir un gran número de enfermedades que afectan tanto a los seres humanos como a las diversas faunas de los océanos. Las pruebas que se realizan para detectar la presencia de patógenos se centran en las bacterias provenientes

de contaminación fecal (*Escherichia coli*), que pueden señalar la existencia de patógenos más dañinos [16].

Entre los tratamientos más destacados para la eliminación de patógenos destacan los métodos donde se emplean diferentes tipos de filtración, como la nanofiltración o la ósmosis inversa, la radiación de rayos UV, aplicación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) o de ozono (O_3) [16].

2.2.2 Materia Orgánica

Las aguas negras y las procedentes de las cocinas, debido a los alimentos, son las principales causas de la existencia de materia orgánica en el agua. La presencia de materia orgánica ocasiona un descenso de los niveles de oxígeno en agua, por lo que la fauna existente en las zonas donde se vierten estas aguas se ven gravemente afectados cambiándose así la biodiversidad de la zona. Esto se debe a que la materia orgánica que se encuentra en las aguas proporciona una fuente de alimento a las bacterias que, al proliferar, consumen oxígeno, ocasionando así que el medio quede en condiciones anóxicas.

Existen dos parámetros que miden de forma indirecta la concentración de materia orgánica en el agua: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO). La principal diferencia entre ambas es que la DQO mide todo el oxígeno necesario para oxidar los contaminantes presentes en el agua. En cambio, la DBO mide solo el oxígeno necesario para la eliminar el material orgánico biodegradable [17]. Se mide en mL O_2 / L agua, y es el nivel de oxígeno necesario por las bacterias mientras consumen la materia orgánica.

La DQO representa la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar tanto la materia orgánica biodegradable como la no biodegradable mediante agentes químicos y, al igual que la DBO, se mide en mL O_2 / L agua. La DQO debe ser en la gran mayoría de casos mayor que la DBO.

En la actualidad los principales métodos y tratamientos de eliminación de DBO y DQO consisten en una serie de métodos fisicoquímicos como la coagulación y floculación, oxidación avanzada mediante el uso de ozono, peróxido de hidrógeno o mediante radiación UV para así descomponer los compuestos orgánicos más complicados de degradar. También pueden emplearse métodos de adsorción que emplean, entre otros, carbón activado que atrapa compuestos orgánicos en su superficie porosa. Por otro lado, también son comunes métodos biológicos como los fangos activos o la digestión anaerobia.

Asimismo, en este proyecto también se estudia el TOC (Carbono Orgánico Total), que es un parámetro fundamental utilizado para medir la cantidad total de carbono presente en compuestos orgánicos, ya sea en suspensión o disueltos en el agua. Este indicador es clave para evaluar el nivel de contaminación orgánica, tanto en aguas residuales como naturales. A diferencia de otros parámetros como la DBO o la DQO, el TOC proporciona una medida directa de la carga orgánica sin depender de la biodegradabilidad o de reacciones químicas específicas. Su análisis se basa en la oxidación total de la materia orgánica para cuantificar el dióxido de carbono generado, lo que permite determinar con precisión el contenido de carbono orgánico. Valores elevados de TOC, expresados en mg/L, pueden indicar la presencia de contaminantes orgánicos no tratados, como hidrocarburos, pesticidas o detergentes. Por ello, el TOC es un parámetro esencial en la monitorización ambiental, en el control de procesos industriales y en las plantas de tratamiento de aguas, ya que permite optimizar la eficiencia de los sistemas de depuración y garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos para la protección del medio ambiente y la salud pública [18].

2.2.3 Nutrientes

El principal inconveniente del exceso de nutrientes en las aguas es que se produce el fenómeno eutrofización, ya mencionado anteriormente. Este fenómeno favorece al desarrollo de las algas, que crecen de manera anómala en la zona que se ve afectada por las aguas contaminadas, estas algas consumen una mayor cantidad de oxígeno para poder realizar sus procesos fotosintéticos, dejando una mayor escasez de oxígeno en el agua, por lo que la biodiversidad acuática de la zona muere por hipoxia.

Los principales nutrientes que deben ser controlados para evitar el enriquecimiento de las aguas y así el impacto en el equilibrio medioambiental son el nitrógeno y el fósforo. A nivel general, estos nutrientes llegan al agua por el impacto de la industria agrícola (empleo de fertilizantes tanto sintéticos como naturales), la descarga de las aguas domésticas y urbanas, residuos químicos de las industrias y, en menor medida, el impacto de los buques que navegan por los mares y océanos [3] [19] y que generan por el uso de jabones, detergentes, aceites y otros compuestos ya descritos en las aguas grises y negras.

Hoy en día no solo existe la preocupación de reducir estos nutrientes del agua sino también recolectarlos, ya que se estima que las reservas de P se agotarán en aproximadamente 50-100 años [20]. Las técnicas más comunes empleadas son técnicas biológicas como la oxidación anaeróbica en el caso del P y en el caso del N se aplica nitrificación o desnitrificación, el inconveniente de estas técnicas en los medios marítimos es que las bacterias empleadas son sensibles a la alta salinidad de los mares y océanos [21]. Las técnicas para recolectar estos nutrientes de las aguas residuales son tratamientos que emplean la cristalización.

2.2.4 Sólidos en suspensión

Los sólidos en suspensión (SS) son partículas finas de materia orgánica e inorgánica que no se disuelven en el agua y que pueden ser eliminadas mediante procesos físicos como la sedimentación o la filtración. Estas partículas pueden incluir restos vegetales, arena, limo, materia fecal, microorganismos, entre otros. Los SS son un indicador clave de la contaminación del agua, ya que una alta concentración puede reducir la penetración de la luz solar, afectar la fotosíntesis acuática y favorecer el crecimiento de bacterias anaerobias que consumen oxígeno, empeorando así la calidad del agua [22].

Los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales pueden clasificarse en dos grandes grupos según su naturaleza: sólidos orgánicos y sólidos inorgánicos.

- Sólidos orgánicos, también conocidos como sólidos suspendidos volátiles (SSV), están formados principalmente por materia de origen biológico. Incluyen restos de alimentos, heces, grasas, proteínas, carbohidratos y otras sustancias derivadas de actividades humanas y animales. Su principal característica es que son biodegradables, es decir, pueden ser descompuestos por microorganismos. Esta propiedad hace que su eliminación se lleve a cabo mayoritariamente en los procesos de tratamiento biológico secundario, como el sistema de lodos activados. Sin embargo, cuando no se tratan adecuadamente, los sólidos orgánicos pueden generar malos olores, consumo excesivo de oxígeno disuelto y la emisión de gases como el metano en ambientes anaerobios. Analíticamente, estos sólidos se identifican como la fracción volátil de los sólidos suspendidos, ya que se volatilizan al ser incinerados a 550°C [22].
- Sólidos inorgánicos, también denominados sólidos suspendidos fijos (SSF), están compuestos por materiales no biodegradables. En este grupo se incluyen partículas minerales como arena, arcilla y limos, así como fragmentos metálicos, restos de plásticos u otros compuestos de origen artificial. Estos sólidos no sufren transformaciones biológicas significativas, por lo que su remoción debe producirse en las etapas primarias del tratamiento, mediante procesos físicos como el desbaste, desarenado o decantación. Aunque no contribuyen directamente a la carga orgánica del agua residual, su presencia puede dañar los equipos, causar sedimentación indeseada en las redes de alcantarillado y aumentar el volumen de lodos generados en el sistema de tratamiento. Se determinan como la fracción que permanece tras la calcinación a 550°C, es decir, la parte fija de los sólidos suspendidos [23].

2.2.5 Otros compuestos químicos

Los compuestos químicos que contaminan el agua abarcan una amplia variedad de productos con características distintas e independientes entre sí. La presencia de estos productos depende de la procedencia de la fuente de contaminación, en el caso de los buques, la gran parte de los productos químicos provienen de fármacos empleados para el ámbito sanitario y de los productos de limpieza.

Cabe destacar que en la actualidad los fármacos son considerados como contaminantes emergentes ya que la existencia de estos productos en el agua altera la vida acuática. En las últimas décadas diferentes organizaciones y expertos, como la Comisión Europea consideran a los fármacos como “contaminantes de preocupación emergente” [24].

Para la eliminación de los productos químicos se emplean técnicas de adsorción aplicando carbón activo, procesos avanzados de oxidación (ozono y radiación UV) o procesos biológicos. Sin embargo, estas técnicas no dan resultados eficientes y siguen estudiándose tecnologías para mejorar estos resultados [25].

2.3 Normativas – Convenio MARPOL

Para evaluar si las aguas residuales de los buques pueden ser descargadas al mar, es necesario conocer los límites permitidos de sus parámetros. La normativa principal que regula estos vertidos es el Convenio MARPOL, centrado en la protección del medio marino. El Anexo IV de dicho convenio es el más relevante para este proyecto, ya que trata sobre la prevención de la contaminación por aguas residuales de buques. Además, se presentarán los límites actuales de vertido, establecidos en la Resolución MEPC.227(64) de 2019.

Aunque el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL) establece normas estrictas para reducir la contaminación marina procedente del tráfico marítimo, los buques de guerra, como los de la Armada Española, están formalmente exentos de su cumplimiento obligatorio. Esta exención se recoge en el artículo 3 del propio convenio, el cual especifica que las disposiciones del MARPOL no se aplican a los buques de guerra, buques auxiliares u otros buques propiedad del Estado dedicados a servicios gubernamentales no comerciales. Sin embargo, a pesar de esta exención legal, la Armada adopta voluntariamente muchas de las directrices del MARPOL, demostrando un claro compromiso con la protección del medio marino. En línea con el espíritu del convenio, que alienta a los Estados parte a garantizar que los buques exentos actúen “en lo razonable y posible” conforme al tratado, los buques de la Armada están generalmente equipados con sistemas de gestión ambiental que permiten reducir su impacto ecológico. Entre las medidas adoptadas se encuentran sistemas de tratamiento de aguas de sentina con separadores agua/aceite, planta de tratamiento de aguas negras y grises, equipos de control de emisiones atmosféricas, así como protocolos internos para la gestión y segregación de residuos. Además, la dotación recibe formación específica en gestión ambiental a bordo, como parte de la política de sostenibilidad y responsabilidad ambiental del Ministerio de Defensa.

En conclusión, aunque la Armada Española no está legalmente obligada a cumplir con MARPOL, opera siguiendo sus principios en la medida de lo posible, asegurando que sus operaciones sean compatibles con la protección del entorno marino.

2.3.1 Anexos

El Convenio MARPOL cuenta con 6 anexos técnicos, siendo estos [26]:

- Anexo I – Prevención de la contaminación por hidrocarburos: regula la descarga de aceites y aguas oleosas (por ejemplo, aguas de sentina).
- Anexo II – Control de la contaminación por sustancias nocivas líquidas a granel: aplica a buques que transportan productos químicos líquidos peligrosos.

- Anexo III – Prevención de la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos: regula mercancías peligrosas en contenedores, sacos, barriles, etc.
- Anexo IV – Prevención de la contaminación por aguas residuales de los buques: regula el tratamiento y vertido de aguas negras (sanitarias) al mar.
- Anexo V – Prevención de la contaminación por basuras provenientes de los buques: establece qué tipos de basura pueden o no pueden descargarse al mar (papel, plástico, alimentos, etc.).
- Anexo VI – Prevención de la contaminación atmosférica causada por los buques: regula las emisiones de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas y gases de efecto invernadero.

2.3.2 Anexo IV – Prevención de la contaminación por aguas residuales de buques

A continuación, se detallará el Anexo IV, ya que es el que tiene un mayor peso en el presente proyecto [26].

- Regla 1: se dan ciertas definiciones, donde destaca la definición de aguas sucias, siendo estas las procedentes de inodoros, urinarios, lavabos, lavaderos, conductos de salida situados en los servicios médicos, aguas procedentes de espacios donde halla seres vivos u otras aguas cuando están mezcladas con las mencionadas anteriormente.
- Regla 9: se recoge que todos los buques que estén sujetos al convenio deben estar equipados con sistemas de tratamiento de aguas sucias, que contengan:
 - Instalación de tratamiento de aguas sucias.
 - Sistema de desinfección y con capacidad de desmenuzar (capacidad de almacenar, si el buque se encuentra a menos de 3 millas de tierra).
 - Tanque de retención.
- Regla 11: regula la descarga de aguas sucias al mar, que está prohibida, salvo que se cumplan ciertas condiciones específicas.
 - En primer lugar, se permite la descarga cuando el buque se encuentra a una distancia superior a 3 millas náuticas de la costa, siempre que las aguas sucias hayan sido previamente trituradas y desinfectadas. En el caso de que las aguas no hayan sido sometidas a este tratamiento, solo podrán ser descargadas a más de 12 millas náuticas de la tierra más próxima.
 - Segunda opción para permitir la descarga es que el buque cuente con una instalación de tratamiento de aguas sucias que haya sido aprobada oficialmente, y cuyo funcionamiento esté certificado conforme a la normativa vigente. En este caso, los resultados de las pruebas del sistema deben estar consignados en el Certificado Internacional de Prevención de la Contaminación por Aguas Sucias. Además, el efluente tratado no debe producir sólidos flotantes visibles ni causar alteraciones en la coloración del agua circundante.
 - Finalmente, en los casos en que las aguas sucias estén mezcladas con otros residuos regulados por normativas más estrictas, se aplicarán las disposiciones correspondientes a dichos residuos.

2.3.3 Resolución MEPC.227(64) – Límites de descarga

Aunque el Convenio MARPOL aborda ampliamente la problemática de la contaminación del medio marino causada por vertidos de origen humano, los límites específicos respecto a los efluentes de aguas residuales no están claramente definidos. Para subsanar esta ambigüedad, se elaboró la Resolución MEPC.227(64), adoptada en 2019, la cual reúne y actualiza las normas vigentes aplicables al tratamiento y descarga de aguas residuales.

Esta resolución nace de la necesidad de reflejar los avances y exigencias actuales en materia de protección del medio marino, estableciendo criterios obligatorios que sustituyen tanto a directrices anteriores como a enmiendas previas del Anexo IV del Convenio MARPOL. Su propósito principal es garantizar una interpretación correcta de la regla 9 anteriormente mencionada, además de servir como guía para las Administraciones en la realización de pruebas de funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas sucias a bordo de los buques.

El documento técnico de la resolución detalla múltiples aspectos regulados, incluyendo los requisitos técnicos, operativos y de rendimiento que deben cumplir los equipos de tratamiento de aguas residuales, con el fin de asegurar que el efluente generado cumpla con los estándares ambientales internacionales.

Para entender la resolución correctamente se definen ciertos conceptos, destacando [27]:

- Dilución (Q_d): agua de dilución, aguas grises, aguas de procesos, o agua de mar introducida en la instalación de tratamiento de aguas sucias, después del punto de toma de muestras del influente y después del dispositivo de medición del flujo del influente
- Efluente (Q_e): aguas residuales tratadas.
- Carga hidráulica: caudal de proyecto del sistema de aguas de desecho (Q_i) en la instalación de tratamiento de aguas sucias.
- Influyente (Q_i): líquido que contiene aguas sucias, aguas grises u otras corrientes de líquidos, que ha de ser procesado en la instalación de tratamiento.
- Coliformes termotolerantes: grupo de bacterias coliformes que, en un plazo de 48 horas y a una temperatura de 44,5 °C, generan gas a partir de lactosa.

Para el cumplimiento de las reglas 9.1.1 y 9.2.1 del Anexo IV del Convenio MARPOL, los sistemas de tratamiento de aguas residuales deben cumplir con las siguientes especificaciones:

- Coliformes termotolerantes: durante el período de prueba, la media geométrica de coliformes termotolerantes en los efluentes no debe superar los 100 por cada 100 ml, según los resultados obtenidos mediante filtro de membrana, fermentación en tubos múltiples o un método analítico equivalente.

- Sólidos en suspensión (TSS): la media geométrica del contenido de sólidos en suspensión en efluentes durante el período de prueba no debe superar los 35 Q_i/Q_e mg/l. Si se prueba la instalación a bordo de un buque, este límite puede ajustarse considerando el contenido de sólidos presentes en el agua de lavado, siempre que se tomen suficientes muestras para calcular un valor promedio fiable (designado como "x"). En tal caso, el límite ajustado no debe exceder $(35 + x) Q_i/Q_e$ mg/l. Las pruebas deben realizarse usando procedimientos específicos.

- Demanda bioquímica de oxígeno sin nitrificación y demanda química de oxígeno: las pruebas de DBO sin nitrificación no deben ser mayores de 25 Q_i/Q_e mg/l y que la DQO no supere los 125 Q_i/Q_e mg/l.

- pH: las pruebas deben estar comprendidas entre los valores de 6 y 8,5.

- Eliminación de nitrógeno y fósforo: el nitrógeno total menor a 20 Q_i/Q_e mg/l o que se haya reducido en un 70%, en cuanto al fósforo no debe tener valores superiores a 1,0 Q_i/Q_e mg/l o una reducción del 80 %. Esta restricción se aplica actualmente a los buques de pasaje que operan en zonas especiales, en este caso el mar Báltico.

2.4 Tratamientos de aguas contaminadas

A continuación, se describirán los diferentes procesos (algunos de ellos mencionados anteriormente) por los que atraviesa el agua residual en las diferentes plantas de tratamiento, para la eliminación de sus contaminantes.

Tratar las aguas contaminadas supone en la actualidad un reto de vital importancia, para así proteger el medio ambiente y la salud pública. Por ello hay que garantizar que las aguas atraviesen los métodos y técnicas necesarios para que estas aguas puedan ser vertidas o reutilizadas sin suponer ningún tipo de riesgo. Este proceso pasa por un tratamiento primario, secundario y terciario, donde en estas diferentes etapas se combinan métodos tanto físicos, químicos como biológicos para la eliminación de contaminantes.

Los tratamientos primarios son precedidos por los conocidos pretratamientos donde se prepara el agua residual para tratamientos posteriores, eliminándose sólidos de gran tamaño y materiales que supondrían un efecto dañino a los equipos. Consiste en realizar un desbaste, empleando rejillas o tamizas y retener así los sólidos más grandes; otra técnica empleada en los pretratamientos es el desarenado, donde se deshace de los sólidos más pesados como arenas o grava. Por último, en esta etapa en muchas instalaciones se aplica un desengrasado para eliminar las grasas y aceites que flotan en la superficie [28].

Tras los pretratamientos se sigue con los mencionados tratamientos primarios, cuyo principal propósito es eliminar los sólidos suspendidos en el agua contaminada, mediante métodos físicos, por lo que también remueve una parte importante de la carga orgánica que puede representar entre un 25% y el 40% de la DBO [29]. En esta etapa destacan técnicas como la coagulación y la floculación.

Durante los tratamientos secundarios se emplean en su mayoría técnicas de eliminación de contaminantes de carácter biológico para así degradar materia orgánica disuelta y en suspensión que no haya sido eliminada con los tratamientos previos. Las técnicas que se aplican en esta fase funcionan de tal manera que los microorganismos metabolizan los contaminantes orgánicos, transformándolos en biomasa. Los biorreactores más utilizados en el tratamiento de aguas residuales son los de fangos activados, pero existen otras tecnologías disponibles como las lagunas de estabilización [28].

La última fase por la que pasa el agua, y que es objeto de estudio de este trabajo, son los tratamientos terciarios, donde ya se busca la eliminación de contaminantes específicos, como nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados y patógenos. El abanico de técnicas empleadas es muy amplio debido a la naturaleza diversa de cada contaminante a eliminar. Procesos de oxidación avanzada (ozono o peróxido de hidrógeno) combinados con la aplicación de luz UV [28].

También hay que mencionar los tratamientos cuaternarios que, en el ámbito de las aguas residuales se refieren a procesos avanzados diseñados para eliminar contaminantes específicos que no han sido completamente eliminados en las etapas anteriores de tratamiento (primario, secundario y terciario). Estos tratamientos se centran en la eliminación de micro-contaminantes emergentes, como productos farmacéuticos, pesticidas y otros compuestos orgánicos persistentes [30].

En la actualidad hay una gran preocupación para buscar los métodos y técnicas más eficientes a la hora de la eliminación de contaminantes en las aguas, por lo que se está comenzando a recurrir a la utilización de inteligencias artificiales (IA) combinada con tecnologías avanzadas [31], con el fin de encontrar el tratamiento más eficiente de manera que se realice de manera que se reduzcan costos, pero se obtengan mejores resultados de eliminación de contaminantes.

Como se ha sido mencionado anteriormente, las principales técnicas de eliminación de contaminantes son físicas, químicas y biológicas. A continuación, se realiza una clasificación y descripción de las tecnologías de tratamiento convencionales siguiendo este criterio:

2.4.1 Técnicas físicas

Los tratamientos físicos se basan en procesos mecánicos o propiedades físicas para separar sólidos del agua residual, sin alterar químicamente los contaminantes. Son empleados en la gran mayoría de casos en las fases de pretratamiento y tratamiento primario de aguas residuales y suelen eliminar gran parte de los sólidos suspendidos, arenas, grasas y flotantes [22].

- Tamizado/Desbaste: En este proceso el agua residual pasa a través de rejillas metálicas para retener los sólidos de mayor tamaño, tras estas rejillas se instalan tamices de malla o placa perforada que retienen sólidos medianos y finos.
- Sedimentación: Es un proceso donde, al reducir la velocidad del flujo en tanques de sedimentación, los sólidos suspendidos más pesados que el agua se hunden por acción de la gravedad y se concentran como lodo en el fondo [23].
- Flotación: Esta técnica separa sólidos o líquidos menos densos que el agua haciendo que asciendan a la superficie. El proceso más extendido es la flotación por aire disuelto (DAF), el agua residual se presuriza con aire, luego al despresurizarla bruscamente, el aire sale en burbujas muy finas que se adhieren a sólidos suspendidos y grasas, disminuyendo su densidad y provocando su ascenso [23].
- Filtración: La filtración consiste en hacer pasar el efluente a través de un medio poroso (arena, grava, antracita, tela, membrana, etc.) que retiene las partículas remanentes por tamaño. Se suele emplear en las fases de tratamiento secundario o terciario, cuando se requiere un efluente muy claro. En filtración convencional se emplean lechos granulares, de distintas granulometrías. Para las partículas más pequeñas en la actualidad se recurre a tecnologías de membranas [32].

Para este proyecto se ha empleado procesos de filtración aplicando filtros de papel, como en el caso de la síntesis de hidrotalcita o para filtrar el agua residual extraída de la fragata. En estos casos se ha empleado un sistema de vacío para acelerar el proceso de filtrado.

2.4.2 Técnicas químicas

Los tratamientos químicos emplean la adición de sustancias o reacciones químicas para eliminar contaminantes del agua residual, ya sea transformándolos, precipitando compuestos indeseados o desinfectando microorganismos. Suelen aplicarse en el tratamiento primario o terciario, o para acondicionar el agua (pH, oxidación) antes o después de los tratamientos biológicos. En industrias, los tratamientos químicos son cruciales para neutralizar pH extremos, precipitar metales pesados, decolorar efluentes (textil, tintes) u oxidar compuestos tóxicos que los métodos biológicos no eliminan.

- Coagulación-Floculación: En la actualidad, el proceso de coagulación-floculación se aplica ampliamente en el tratamiento de aguas con el propósito de agrupar partículas finas y coloides para formar agregados más grandes, lo que permite reducir la turbidez, la materia y otros contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en las aguas residuales. En términos generales, este proceso consiste en la adición de sustancias químicas que modifican el estado físico de los sólidos disueltos y suspendidos, facilitando su eliminación a través de la sedimentación [33]. Este método se divide en dos fases principales: una primera donde se realiza una mezcla rápida del coagulante en el agua residual mediante una agitación intensa, y luego se lleva a cabo la floculación, donde las partículas pequeñas se aglomeran en flóculos bien definidos gracias a una agitación más suave. Posteriormente, los flóculos se sedimentan y se retiran en forma de lodo.

Gracias a su operación sencilla, diseño relativamente simple y bajo consumo energético, este proceso ha sido implementado con éxito en diversos sectores industriales. Además, su versatilidad permite que la coagulación-floculación se utilice como tratamiento preliminar, final o incluso como etapa principal en el manejo de aguas residuales urbanas.



Figura 2-4 Floculante empleado en el buque BAC “Cantabria” (elaboración propia)

- Oxidación química: En este tratamiento se añaden agentes oxidantes al agua residual para destruir o convertir contaminantes mediante reacciones de óxido-reducción. Entre los oxidantes comunes están el cloro y sus derivados, como hipoclorito empleado en las plantas de tratamiento de aguas residuales de la mayoría de los buques de la Armada, el ozono (O_3), empleado en la fragata F-102 (véase Figura 2-5), o el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) empleado junto a la radiación UV que tiene efectos positivos en la eliminación de colorantes en la industria textil [34]. La oxidación química puede cumplir varios objetivos como son, la desinfección, eliminación de compuestos orgánicos tóxicos o no biodegradables, y control de olores y color.



Figura 2-5 Generador de Ozono buque F-105 (elaboración propia)

- Adsorción: Se trata de un proceso en el que ciertos contaminantes disueltos se adhieren a la superficie de un sólido poroso (el adsorbente), eliminándolos del agua. El carbón activado es el adsorbente más usado en tratamiento de aguas residuales a gran escala, debido a su elevadísima superficie específica (700–1500 m²/gramo) y afinidad por compuestos orgánicos. Se presenta en forma granular (GAC) en lechos filtrantes o en polvo (PAC) añadido a tanques. A medida que el agua pasa a través del carbón, contaminantes como compuestos orgánicos disueltos quedan retenidos en los microporos del carbón por fuerzas fisicoquímicas de tipo Van der Waals [35]. Es un método muy eficaz para eliminar contaminantes persistentes en baja concentración, que no se eliminan por otras vías. Tiene un espectro amplio de adsorción: se ha aplicado exitosamente para quitar desde colorantes, fármacos, fenoles y mercaptanos hasta metales pesados en distintas valencias, sin añadir productos químicos nuevos al agua. Sin embargo, la capacidad del carbón es limitada; una vez que sus poros se saturan de contaminante, pierde eficacia y debe regenerarse o reemplazarse. La regeneración térmica del carbón es costosa y provoca algo de pérdida de carbono en cada ciclo [36].

2.4.3 Técnicas biológicas

Los procesos biológicos aprovechan la capacidad de los microorganismos para degradar y transformar la materia orgánica contaminante presente en el agua residual, así como diferentes nutrientes (nitrógeno y fósforo). Mediante procesos metabólicos naturales, las bacterias y otros microorganismos consumen contaminantes orgánicos (medidos como DBO y/o DQO) y los transforman en productos inocuos: principalmente dióxido de carbono, agua, nuevas células microbianas (biomasa) y, en ausencia de oxígeno, gas metano [22].

Los procesos biológicos se dividen en dos:

- Procesos aeróbicos: utilizan microorganismos que necesitan oxígeno disuelto para respirar y descomponer la materia orgánica. Requieren por tanto aireación (natural o forzada) del agua residual. La depuración biológica por fangos activados es un proceso en el que microorganismos degradan la materia orgánica presente. Este proceso ocurre en un biorreactor aireado y agitado, lo que garantiza una buena mezcla y evita la sedimentación prematura. Tras un tiempo de retención adecuado, la mezcla pasa a un tanque de sedimentación, donde se separa el agua tratada de la biomasa generada. Parte de esta biomasa se recircula al reactor para mantener una concentración estable de microorganismos, y el exceso se purga para evitar acumulaciones. El diseño del biorreactor requiere comprender la mezcla del sistema y aplicar modelos como la cinética de Monod, que relaciona el crecimiento microbiano con la disponibilidad de sustrato. Aunque existen muchos tipos de microorganismos y contaminantes, se utilizan valores promedio para modelar el proceso de forma práctica [37].
- Procesos anaeróbicos: en ausencia de oxígeno, ciertos microorganismos pueden degradar la materia orgánica mediante fermentación y otras rutas metabólicas, produciendo principalmente biogás (mezcla de metano y CO₂) y una fracción menor de biomasa celular. Los procesos anaerobios se utilizan típicamente para tratar aguas residuales con altas cargas orgánicas (dado que generan menos biomasa y pueden convertir gran parte de esa carga en energía utilizable, metano) y para estabilizar lodos residuales. Funcionan mejor a temperaturas cálidas (30–37 °C mesofílicas, o hasta 55 °C termofílicas en algunas digestiones), por lo que en climas fríos suelen requerir calentamiento [38].

2.5 Planta de tratamiento de aguas residuales (TAR) en buques de la Armada

La planta de tratamiento de aguas residuales de la fragata F-102 “Juan de Borbón” (véase Figura 2-6) tiene como principal propósito al igual que el resto de las plantas TAR de los buques, recoger las aguas negras y grises generadas en el buque para tratarlas y que puedan ser vertidas al medio marino sin riesgo de contaminación (SGT J. Fernández Ruíz, comunicación personal, 31 enero 2025).



Figura 2-6 Planta TAR F-102 (elaboración propia)

La planta TAR de la F-102 basa su funcionamiento en la decantación y se complementa con aireación (para mejorar el rendimiento del floculante y facilitar la decantación), maceración (reducir el tamaño de los sólidos y mejorar la eficiencia del proceso) y tratamientos químicos. Compuesta por dos tanques donde se producen los procesos de decantación y químicos (tanque colector) y otro de desinfección, siendo este tipo de plantas de tratamiento las más representativas de la Armada.

- Tanque colector: se divide en tres etapas, donde los sólidos se separan por decantación y el trasiego de una etapa a otra se produce por rebose, una vez el agua residual llega a la tercera etapa se añade el coagulante.
- Tanque de desinfección: se divide en dos etapas, una primera que al igual que el tanque colector separa los sólidos por decantación y pasa a la siguiente etapa por rebose atravesando un paquete de lamelas. En la segunda etapa se añade hipoclorito.

La planta TAR cuenta con bombas de vacío (descargan al primer tanque), bombas de proceso (que aspiran del tanque colector al tanque de desinfección o vierten al mar), bombas de efluente (recogen del tanque de desinfección y descargan al mar), bomba de lodo (recoge del tanque recolector y vierten al mar) y bomba de trasiego de lodos (recoge los lodos del tanque de desinfección y los vierte en el tanque colector).

El sistema de tratamiento una vez el agua residual es extraída del tanque colector pasa por una serie de filtros de aspiración de la bomba de proceso. Una vez el agua se encuentra pasando por las bombas de proceso se añade el floculante.

La planta TAR de la fragata cuenta con 2 modos de funcionamiento:

- Recogida y descarga: es cuando una vez el agua recogida del buque pasa por el tanque colector, las bombas de proceso la expulsan al mar sin pasar por ningún tratamiento químico.
- Recogida y tratamiento: es cuando el agua residual pasa por todos los procesos de la planta de tratamiento, y es expulsada por las bombas de efluente al mar.

El agua con el que se ha trabajado para realizar este proyecto se extrajo entre el trasiego del tanque colector al tanque de desinfección, es decir antes de que el agua se mezcle con el floculante en la bomba de proceso representado en Figura 2-7.



Figura 2-7 Toma de agua residual F-102 (elaboración propia)

2.6 Técnicas emergentes de postratamiento de aguas contaminadas

2.6.1 Hidróxidos Dobles Laminares (HDL)

Los hidróxidos dobles laminares (HDL) comúnmente se les relaciona como materiales del tipo hidrotalcita, ya que poseen una gran similitud en cuanto a las propiedades con el mineral de este mismo nombre. Los HDL son nanomateriales laminares inorgánicos también conocidos como arcillas aniónicas, con una estructura de capas, donde se alternan capas de aniones con hidróxidos metálicos de carga positiva. Parte de los cationes divalentes M^{2+} son sustituidos por cationes trivalentes M^{3+} , generando capas de hidróxido con carga positiva que se estabilizan intercalando aniones en el espacio interlaminar [39]. La fórmula general es la siguiente:

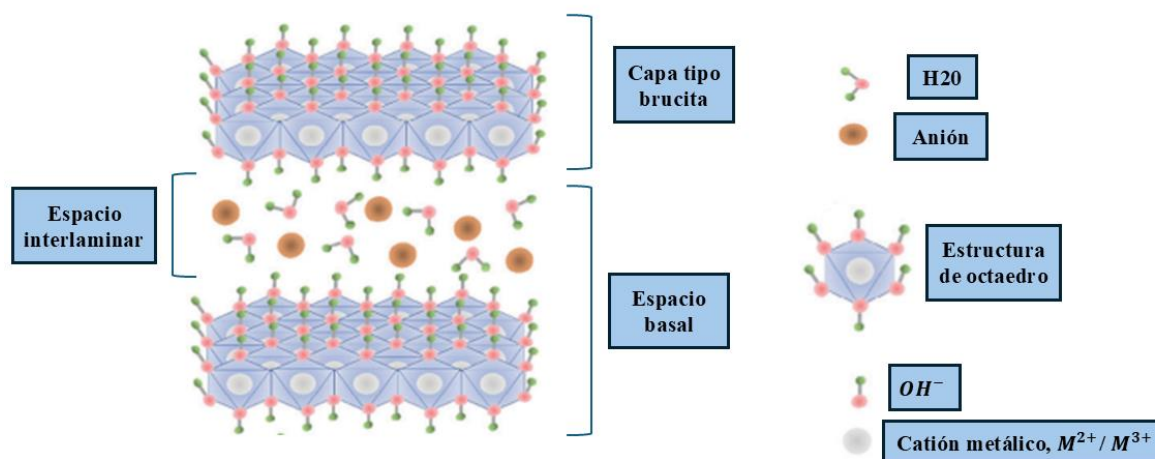
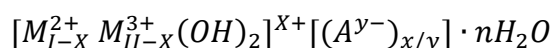


Figura 2-8 Estructura Hidróxidos dobles laminares (tomada de [41])

M_I^{2+} y M_{II}^{3+} representan cationes metálicos bivalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} y Co^{2+}) y cationes metálicos trivalentes (Al^{3+} y Fe^{3+}), por otro lado, A^{y-} representa aniones para ajustar la carga.

- Tipos de HDL: existe una amplia variedad de hidróxidos dobles laminares en función de los precursores empleados para su síntesis [35]:
 - Anión interlaminar, dependiendo del anión en el espacio interlaminar destacan [40]:
 - Carbonatados (CO_3^{2-}): estables y los más comunes.
 - Cloruros (Cl^-): más solubles en agua.
 - Nitratos (NO_3^-): fácilmente intercambiable.
 - Sulfatos (SO_4^{2-}): Menor capacidad de intercambio iónico.
 - Cation metálico, según el metal que forma parte de la estructura, el más destacado por tratarse de la hidrotalcita más sintetizada, son los hidróxidos dobles laminares Magnesio-Aluminio. Sin embargo, existen tantas combinaciones como metales bivalentes y trivalentes anteriormente mencionados.
- Propiedades de la hidrotalcita: al tratarse de hidróxidos dobles laminares calcinados presentan varias propiedades interesantes, derivadas de su estructura y composición química. Al someterse a un proceso de calcinación, los HDL pierden las moléculas de agua presentes en su estructura y sus aniones interlaminares, transformándose en óxidos mixtos con alta reactividad. Entre sus propiedades destacan [41] [42] [40]:
 - Elevada superficie específica, entre valores de 100 y 300 m^2/g .
 - Gran estabilidad química (varía según los cationes).
 - Capacidad de intercambio iónico debido a la naturaleza de su estructura.
 - Efecto memoria, este proceso consiste en restaurar la estructura laminar mediante la rehidratación de HDL calcinados, en presencia de agua y aniones. Esto facilita una rápida regeneración y permite el uso continuo de los compuestos como adsorbentes sin alterar significativamente sus propiedades. Así, los aniones contaminantes del agua quedan incorporados en la estructura regenerada. La reconstrucción es más eficiente cuando la calcinación se ha realizado a temperaturas inferiores a 600°C.
 - Propiedades de ácido-base, que varían en función de la presencia en la lámina de diferentes metales.
- Aplicaciones en el tratamiento de aguas

Debido a las diferentes propiedades de estos compuestos presentan una gran flexibilidad a la hora de emplearse, siendo utilizados para una extensa variedad de propósitos [43] [44] [45].

- Adsorción: Estas sustancias destacan por su eficiencia como adsorbentes en la reducción de la contaminación por plaguicidas en suelos y cuerpos de agua. Son capaces de captar tanto contaminantes orgánicos como inorgánicos. Asimismo, pueden utilizarse en el desarrollo de formulaciones de plaguicidas con liberación controlada, lo que permite un uso más eficiente y menos contaminante de estos productos.
- Catálisis: Las hidrotalcitas son ampliamente utilizadas como catalizadores debido a su estructura en capas y su notable capacidad para intercambiar aniones. Estas características las hacen adecuadas para la síntesis de compuestos como los triazoles, los cuales tienen aplicaciones importantes en las industrias farmacéutica y agrícola.

- Química: En el ámbito químico, las hidrotalcitas son útiles en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, lo cual las convierte en herramientas valiosas para la limpieza de aguas y suelos contaminados. Son capaces de retener metales pesados, plaguicidas y otros agentes tóxicos, contribuyendo de forma significativa a la protección ambiental y la mejora de la salud pública.
- Agricultura: En la agricultura, estas sustancias pueden jugar un rol esencial en la formulación de plaguicidas con liberación controlada. Esta tecnología permite maximizar la eficacia del producto mientras se reduce su impacto sobre el medio ambiente. Al liberar los compuestos activos de forma gradual, se necesita una menor cantidad y se disminuye la exposición del suelo y los cultivos a químicos potencialmente dañinos.

El uso de hidrotalcitas en el tratamiento de aguas residuales se debe a sus propiedades de adsorción e intercambio iónico, que permiten la eliminación eficiente de contaminantes como metales pesados, fosfatos y colorantes. En el tratamiento de aguas, las hidrotalcitas pueden emplearse en diversas etapas del proceso. Una de sus aplicaciones más estudiadas es la eliminación de fosfatos y nitratos [46], lo que ayuda a prevenir la eutrofización de cuerpos de agua. También han demostrado alta eficiencia en la captura de metales pesados como plomo, cadmio, níquel y cromo [47] [48], actuando como adsorbentes regenerables mediante procesos de calcificación-rehidratación. Otro aspecto relevante es su aplicación en la eliminación de colorantes y materia orgánica de efluentes industriales [49]. Su capacidad de adsorción puede optimizarse mediante la modificación de su estructura con tratamientos térmicos o la incorporación de otros compuestos funcionales.

Por otro lado, las hidrotalcitas han sido un campo de estudio importante en los últimos años, donde se demuestra su utilidad en la eliminación de contaminantes en aguas residuales como en los trabajos de fin de grado mencionados anteriormente. Destacando la utilidad de la hidrotalcita en agua contaminadas por colorantes (Hidalgo Serrano) y el análisis de cuál es la hidrotalcita para realizar los tratamientos óptimos (Pozueco Mariño).

2.6.2 Radiación UV

La radiación ultravioleta (UV) es una forma de luz no visible, situada en el espectro electromagnético entre los rayos X y la luz visible, aproximadamente de 100 a 400 nm [50]. Dentro de este rango, el UV de onda corta (UV-C) que se encuentra en un rango entre 200 y 280 nm posee un efecto germicida, en particular, la longitud de onda de 254 nm ha demostrado ser muy efectiva para la desinfección de aguas [51]. En los procesos de desinfección el agua se hace circular a través de cámaras o reactores donde está expuesta a lámparas UV-C, por lo que los microorganismos presentes en el agua reciben una dosis de UV lo suficientemente grande para dañar su material genético. La luz UV produce una desinfección rápida y física de los patógenos, sin agregar sustancias al agua ni dejar residuos que puedan dañar el medio ambiente, adoptándose la luz UV como método ambientalmente “amigable” y eficaz contra la protección de microorganismos dañinos. Por este motivo, la desinfección mediante UV se aplica en las etapas finales del tratamiento, y así asegurar la calidad microbiológica antes del consumo o vertido. Los métodos de radiación UV han estado en auge los últimos años, reemplazando al cloro para evitar la formación de compuestos en el efluente. Un ejemplo es la planta de tratamiento de aguas residuales de Waldwick (Nueva Jersey, EE. UU.), que en 1989 cambió de cloración a UV para cumplir una normativa de “cero residual” de cloro en el efluente, logrando con UV cumplir más fácilmente los límites de coliformes fecales que con cloro [52].

En aplicaciones industriales, se utiliza para desinfectar aguas de proceso en alimentos y bebidas, ya que a diferencia del cloro no deja sabor. En la industria farmacéutica, se emplea en circuitos de enfriamiento para control de patógenos. En la desinfección de agua para reutilización industrial o riego. En todos los casos, el principio es similar: exponer el caudal de agua a una dosis controlada de UV mediante lámparas.

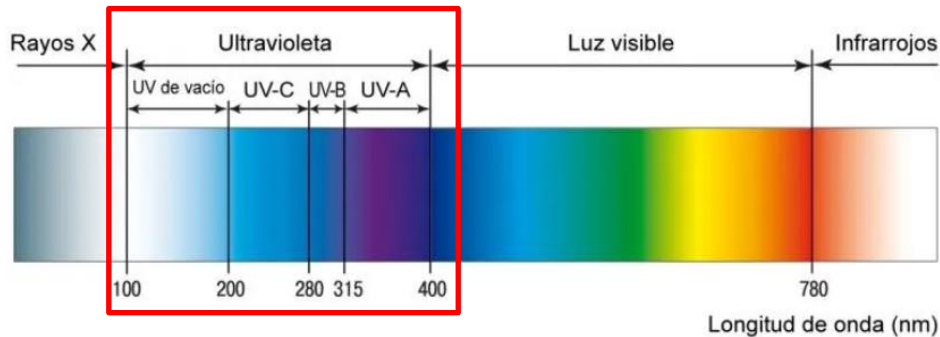


Figura 2-9 Espectro electromagnético de la luz (tomada de [16])

2.6.2.1 Actuación de la radiación UV

La acción germicida de la UV se debe a que sus fotones son absorbidos por los ácidos nucleicos de microorganismos, es decir el ADN o ARN, produciendo daños fotoquímicos irreparables. En particular, la radiación UV-C provoca la formación de *dímeros de timina* u otras lesiones en el ADN, lo que bloquea la replicación y transcripción del material genético. Como resultado, las bacterias, virus y protozoos expuestos quedan inactivados (pierden la capacidad de reproducirse e infectar). Este mecanismo es eficaz contra una amplia gama de patógenos, incluyendo bacterias coliformes, virus entéricos y quistes de protozoos [53].

2.6.2.2 Aplicaciones de la radiación UV

En la actualidad la desinfección por UV se aplica en una gran variedad de contextos como son:

- Aguas potables: la desinfección UV se utiliza en plantas de tratamiento de agua potable para garantizar la potabilidad microbiológica. Debido a las propiedades y capacidades que posee la radiación UV, ofrece una capa de protección sanitaria adicional [54]. Un ejemplo destacado es la ciudad de Nueva York, donde se ha implementado UV de manera masiva para la protección de sus acueductos, otro ejemplo claro es el de la ciudad de Rotterdam, que posee una planta de tratamiento de agua con una capacidad de procesar 470.000 m^3 al día [55]. La radiación UV ofrece una desinfección confiable del agua de consumo humano, mejorando la seguridad sin generar subproductos indeseados como ocurre con el cloro.
 - En el contexto europeo, el uso de cloro como desinfectante en el tratamiento de agua potable está regulado de forma estricta, aunque no está prohibido. La Directiva (UE) 2020/2184 sobre la calidad del agua destinada al consumo humano, que sustituye a la Directiva 98/83/CE, establece límites máximos para los subproductos de desinfección, como los trihalometanos (THMs), fijando su concentración en el agua potable en un máximo de $100 \mu\text{g/L}$. Estos subproductos pueden formarse cuando el cloro reacciona con materia orgánica presente en el agua, y se ha demostrado que su exposición prolongada puede tener efectos negativos para la salud. Este marco normativo ha incentivado a varios países europeos a limitar el uso rutinario del cloro y a buscar alternativas más sostenibles, como la radiación ultravioleta (UV), el ozono o el uso de carbón activado. Por ejemplo, los Países Bajos son uno de los países con una política más restrictiva: no emplean cloro de forma habitual en la desinfección

del agua potable, y en su lugar utilizan barreras físicas múltiples como la filtración por membranas, la ozonización y la desinfección por UV, junto con un estricto control del sistema de distribución. En Alemania, el cloro se emplea únicamente cuando es estrictamente necesario, priorizando tecnologías como el ozono y la radiación UV, especialmente para aguas superficiales. Por su parte, Francia mantiene el uso del cloro, pero bajo regulaciones estrictas, y muchas de sus regiones están adoptando sistemas UV como tecnología complementaria para reducir la necesidad de cloración. Otro ejemplo es Suecia, donde varios municipios han optado por limitar el uso de cloro en favor de tecnologías como la radiación UV, sobre todo en zonas ambientalmente sensibles. En resumen, aunque el uso del cloro no está prohibido en la Unión Europea, existen restricciones importantes relacionadas con sus subproductos, lo que ha fomentado la adopción de tecnologías alternativas más limpias y seguras para la desinfección del agua potable [56].

- Aguas residuales municipales: UV se ha vuelto un método popular para desinfectar efluentes de estaciones depuradoras antes de su vertido a ríos o reutilización. Los sistemas UV se integran típicamente después del tratamiento secundario o terciario, reduciendo coliformes fecales, E. coli, virus y otros patógenos la radiación UV en aguas residuales tiene la ventaja de no dejar residual tóxico ni requerir la posterior decoloración del efluente [57].
- Aguas industriales: en industria farmacéutica y microelectrónica se usa UV en sistemas de agua ultrapura para evitar contaminación biológica; en acuicultura, lámparas UV desinfectan el agua de criaderos de peces para controlar patógenos sin químicos; en torres de enfriamiento, la UV ayuda a minimizar la proliferación de bacterias [58].

Estos campos de empleo de radiación UV son los más comunes, en las últimas décadas han surgido una serie de estudios donde se trata de aplicar los beneficios de la radiación UV para aplicarlos a bordo de buques, como por ejemplo en el tratamiento de aguas de lastre donde la principal amenaza es la carga biológica de estas aguas [59]. Los tanques de lastre no solo almacenan agua, sino también partículas de sedimentos y organismos que logran pasar a través de los sistemas de bombeo y tuberías. Estos pueden ser liberados en el puerto de destino cuando se descarga el agua de lastre. En muchas ocasiones, los organismos liberados con el agua de lastre han encontrado condiciones favorables para su desarrollo y expansión en el nuevo entorno, llegando a convertirse en especies invasoras. La introducción de estas especies representa una amenaza para el ecosistema y las actividades humanas, con el potencial de generar un impacto significativo [60]. Por lo que se ha estudiado con resultados positivos la aplicación de UV para la eliminación de estos microorganismos.

2.6.2.3 Ventajas y desventajas

En este caso se ha realizado una tabla (véase Tabla 2-2) donde se recogen las diferentes ventajas y desventajas de la aplicación de la radiación UV.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Eficacia amplia: afecta mayoría de virus, bacterias y patógenos.	Sensibilidad de la calidad del agua, la turbidez de ésta influye en gran medida (bloqueo de la luz).
No genera compuestos químicos.	Sin efecto residual desinfectante en el agua.
Tiempo de acción corto.	Dosificación y margen de seguridad, una dosis insuficiente de UV no produce los efectos deseados.
Sencillez de empleo y seguridad.	Costes operativos y de mantenimiento, reemplazo de las lámparas una vez al año.

Tabla 2-2 Ventajas y desventajas del empleo de radiación UV (elaboración propia)

Es decir, la radiación UV posee ventajas únicas con respecto a otros procesos para tratar el agua, ya que no genera ningún tipo de compuesto químico tóxico, a diferencia del cloro. Sumado a su sencillez de empleo de las lámparas de UV, lo hacen uno de los principales métodos de tratamiento de aguas residuales, con resultados del 99,99% de eliminación de microorganismos, a diferencia del ozono (O_3) que necesita equipos más complejos. Sin embargo, ya que posee pobres resultados en la eliminación de otros contaminantes, se debe emplear como complemento a otras técnicas o al final del proceso de tratamiento de aguas residuales. Una de las combinaciones más destacables es aplicar de manera simultánea procesos de oxidación avanzada, como el uso de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) [61].

2.6.3 Radiación UV y peróxido de hidrógeno (H_2O_2)

La radiación UV por si sola tiene un efecto limitado, ya que no “destruye” contaminantes orgánicos de manera general como lo hace con microorganismos. Sin embargo, puede romper algunos compuestos específicos mediante fotólisis directa. Más importante, la UV es parte integral de procesos de oxidación avanzada (POA), al combinar UV con oxidantes como son el peróxido de hidrógeno o el ozono, que generan radicales hidroxilos altamente reactivos capaces de oxidar y degradar contaminantes orgánicos persistentes.

Los tratamientos biológicos son los métodos más empleados en la actualidad para la eliminación de contaminantes orgánicos y ciertos nutrientes, como son el nitrógeno y el fósforo. Sin embargo, los sistemas biológicos avanzados, presentan una serie de desafíos a la hora de conseguir la estabilización y optimización de los procesos, especialmente cuando el agua contiene compuestos tóxicos. Además, son tratamientos que suelen tener periodos de actuación largos en comparación con los procesos de oxidación avanzada [62]. Se ha demostrado que los POAs son capaces de eliminar material orgánico no biodegradable sin dejar residuos en el agua, también son procesos eficaces para la eliminación de compuestos químicos y microorganismos. La aplicación de POAs junto con tratamientos biológicos da resultados óptimos en los procesos de limpiezas de aguas tanto residuales como potables.

En este proceso donde se aplica el peróxido de hidrógeno junto a dosis de radiación UV, la longitud de onda perteneciente a la luz UV es absorbida por las moléculas de H_2O_2 , provocando la ruptura de su enlace peróxido y la formación de radicales hidroxilos ($\cdot OH$) que tienen un alto potencial de oxidación y siendo capaces de oxidar casi cualquier contaminante orgánico [63]. Rompen los enlaces químicos y oxidándolos a moléculas más simples. Simultáneamente la luz UV contribuye a la desinfección del agua.

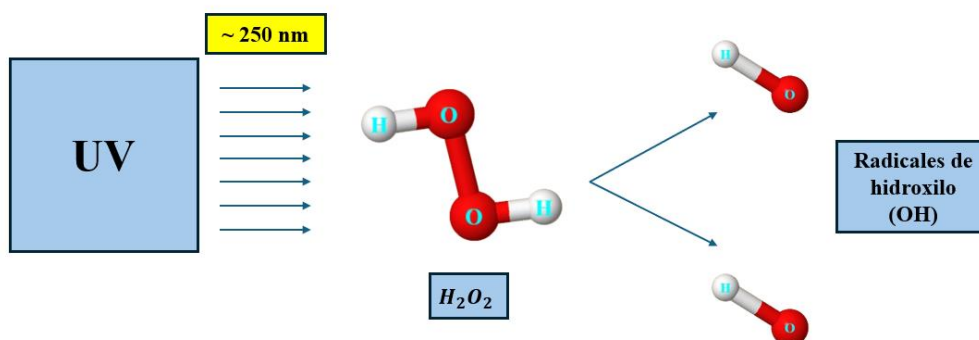


Figura 2-10 Formación radicales de hidroxilo (elaboración propia)

2.6.3.1 Eliminación de contaminantes con UV e hidróxido de hidrógeno

Numerosos estudios han evaluado la eficacia de este método para eliminar contaminantes emergentes y materia orgánica residual en efluentes. Se han obtenido resultados favorables en:

- Eliminación de fármacos y microcontaminantes orgánicos: ya que el UV/ H_2O_2 ha demostrado ser altamente efectivo en la eliminación de contaminantes orgánicos. Un estudio realizado en Japón, en el que se analizaron aguas residuales municipales con 41 tipos de fármacos, incluyendo antibióticos y analgésicos, evidenció las limitaciones del tratamiento con radiación UV sola, ya que solo logró eliminar unos pocos compuestos, como el diclofenaco y el ketoprofeno, incluso con dosis UV elevadas. No obstante, al incorporar peróxido de hidrógeno, la degradación se incrementó significativamente, alcanzando más del 90% de eliminación en 39 de los 41 fármacos analizados, con una menor exposición a la radiación UV. Estos resultados confirman que la combinación con H_2O_2 mejora sustancialmente la eficiencia en la eliminación de fármacos resistentes [64].
- Reducción de materia orgánica: estos procesos reducen la carga orgánica residual, mejorando la calidad del efluente. La oxidación de contaminantes recalcitrantes conlleva a su fragmentación e incluso mineralización parcial, lo que se refleja en descensos de la DQO. En la industria textil se ha llegado a eliminar en torno al 85% de la DQO y decolorar el agua, mediante una dosificación óptima [65].

Cabe mencionar que en este aspecto hay grandes avances para tratar las aguas generadas por diferentes industrias como son la textil o la farmacéutica, asimismo el empleo para potabilizar el agua o su futura reutilización. Sin embargo, la existencia de estudios relacionados con el tratamiento de aguas en buques con el proceso UV/ H_2O_2 es escaso, a pesar de la eficacia que se ha demostrado en los contextos anteriormente mencionados.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Producción de hidrotalcita

3.1.1 Preparación de las disoluciones

Para llevar a cabo la síntesis de la hidrotalcita (HDL), la primera fase consiste en hacer tres disoluciones: una primera formada por nitrato de aluminio ($Al(NO_3)_3$) y otra con nitrato de magnesio ($Mg(NO_3)_2$) y así obtener el anión interlamilar y la tercera disolución formada por carbonato de sodio (Na_2CO_3) para obtener cationes metálicos.

Los materiales que se utilizaron en la preparación de estas disoluciones fueron: nitrato de aluminio $Al(NO_3)_3$, nitrato de magnesio $Mg(NO_3)_2$, carbonato de sodio Na_2CO_3 , hidróxido de sodio $NaOH$, una báscula, agua destilada, vidrios de reloj, dos matraces aforados, agitador magnético, vasos de precipitado y espátulas (Figura 3-1).

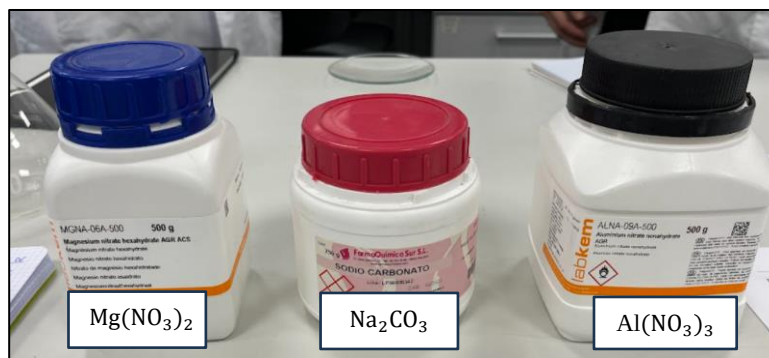


Figura 3-1 Nitrato de magnesio, carbonato de sodio y nitrato de aluminio

El primer paso es preparar la disolución con el anión interlamilar, con una concentración de 0,7 mol/L y con una relación de cationes de 3:1. Para ello se realizó el siguiente cálculo:

$$0,7 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 0,5 \text{ L} = 0,35 \text{ moles totales}$$

Al aplicar la proporción anteriormente nombrada de 3:1 quedaría: 0,2625 moles $Mg(NO_3)_2$ y 0,0875 moles $Al(NO_3)_3$. Con esta proporción el siguiente paso es calcular la cantidad de masa que utilizaremos de cada componente.

$$0,2625 \text{ mol } Mg(NO_3)_2 \times 256,41 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 67,308 \text{ g } Mg(NO_3)_2$$

$$0,0875 \text{ mol } Al(NO_3)_3 \times 375,13 \frac{g}{mol} = 32,824 \text{ g } Al(NO_3)_3$$

Con los valores calculados procederemos a añadir 0,5 L de agua destilada a cada uno de los dos componentes, y así formar las dos disoluciones necesarias. Se añadirán a un matraz y este proceso se apoya con el agitador magnético a 350 rpm durante 5 minutos, para así garantizar que las mezclas sean homogéneas.

El último paso será hacer la tercera disolución (Na_2CO_3), se realizan los cálculos anteriores:

$$0,879 \frac{mol}{L} Na_2CO_3 \times 0,5 L = 0,4395 \text{ moles } Na_2CO_3$$

$$0,4395 \text{ mol } Na_2CO_3 \times 106 \frac{g}{mol} = 46,587 \text{ g } Na_2CO_3$$

Una vez calculada la masa de nitrato de sodio necesaria, se procederá de la misma manera que las disoluciones anteriores, añadiendo la mezcla a un matraz y se agitando durante 5 minutos a 400 rpm, para así obtener una disolución homogénea.

3.1.2 Precipitación – Formación de hidrotalcita

En esta segunda fase de la formación de la hidrotalcita se necesitaron 2 buretas, pinzas metálicas, vasos de precipitado de 1 L, agua destilada, medidor de pH, agitador magnético, barra agitadora, vidrios de reloj, estufa, papel film y equipo de filtración (matraz Kitasato, embudo Büchner, trompa de vacío y filtros). Se emplearán las disoluciones preparadas anteriormente y ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio ($NaOH$) para ajustar la mezcla en un pH de $10 \pm 0,2$.

Para favorecer que se cree la estructura tridimensional de la hidrotalcita, se necesitará realizar un goteo con un caudal de 1ml/min. Este proceso debe ser lento para que se desarrolle de manera óptima. Durante el proceso de goteo la mezcla se agitará de forma continua a 300 rpm, y regulando durante todo el proceso el pH de la mezcla, ya que debe encontrarse entre los valores 9,8 y 10,2.

El montaje (Figura 3-2) queda de tal manera que se coloca el carbonato de sodio en el vaso de precipitado de 1 L, debajo de las buretas que gotean de manera simultánea las disoluciones de nitrato de magnesio y nitrato de aluminio. Esta mezcla se agitará con el agitador magnético a 300 rpm, para así conseguir la correcta homogenización de la hidrotalcita. Para regular el valor del pH se empleará ácido clorhídrico HCl (reduce el pH) e hidróxido de sodio $NaOH$ (eleva el pH). Para medir el pH se emplea el pH-metro de la empresa HANNA modelo EdgePh.



Figura 3-2 Montaje de estación de goteo para formación de la hidrotalcita

Para permitir a nuestra mezcla que tenga lugar el ordenamiento de la estructura laminar, tras la finalización de la agitación se mantendrá en reposo durante al menos 24 horas. La disolución durante este periodo de reposo se mantendrá sellada con parafilm evitando la contaminación y favoreciendo a su buena conservación.

Una vez transcurrido el tiempo necesario de reposo, habrá que realizar el proceso de filtración del sólido, donde se aplicará el vacío con un matraz Kitasato. El montaje es el siguiente: se conecta el matraz Kitasato con una manguera con la que se genera el vacío necesario, se coloca el embudo Büchner con un papel de filtro (para favorecer al vacío se coloca una junta de goma entre el embudo y el matraz). Para evitar pérdidas durante la filtración se empleó un filtro de mayor tamaño al diámetro del embudo, este filtro se dobló de tal manera para formar unas paredes. Tras la filtración se sometió la mezcla a un lavado con agua destilada hasta disminuir el pH a 8,5 y eliminar el exceso de iones hidroxilo formados en la hidrotalcita.

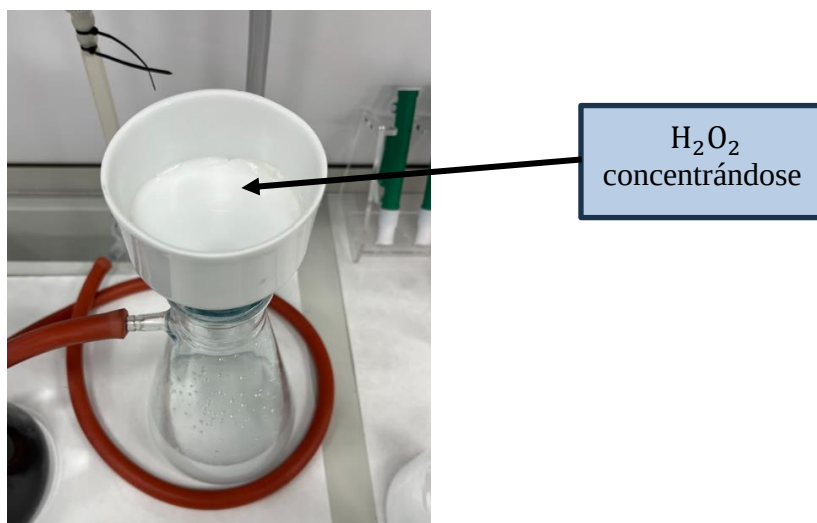


Figura 3-3 Estación de filtrado

Como paso final del proceso es secar la hidrotalcita, se realizó mediante una estufa a 100 °C durante 24 horas. Tras el secado se empleó un mortero para homogeneizar el producto final, obteniéndose así un total de 24,06 g de hidrotalcita.



Figura 3-4 Secado hidrotalcita



Figura 3-5 Hidrotalcita seca

3.2 Lámpara ultravioleta y peróxido de hidrógeno

Para este proyecto se han empleado diversas técnicas para tratar el agua contaminada procedente de los buques. A continuación, se muestran los datos técnicos de la lámpara UV para potabilizar agua y las características del peróxido de hidrógeno H_2O_2 .

- Lámpara UV (Figura 3-6)
 - Potencia: 12 W
 - Material: Acero Inoxidable AISI 304
 - Lámpara de 4 polos
 - Transformador incorporado
 - Vida promedio: 8000 h
 - Entrada/Salida: ¼"
 - Certificado por: CE y RoHs
 - Caudal: 226 L/h

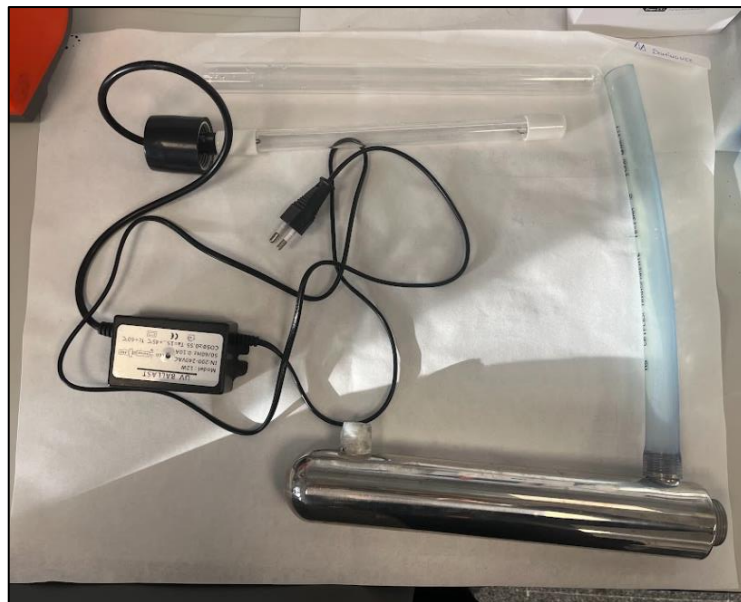


Figura 3-6 Componentes de la lámpara UV (elaboración propia)

- Peróxido de hidrógeno (Figura 3-7)
 - Volumen: 1L
 - Fórmula química: H_2O_2
 - Masa molar: 34,015 g/mol
 - Concentración: 30%
 - Ácidos libres (H_2SO_4), SO_4^{2-} , $Cl^- < 0,01\%$
 - $PO_4^{3-} < 0,003\%$
 - Metales pesados, As, Fe $< 0,00005\%$
 - N $< 0,005\%$



Figura 3-7 Peróxido de hidrógeno (elaboración propia)

3.3 Obtención y preparación del agua residual

El agua contaminada con la que se desarrolla el proyecto procede de la fragata F-102 “Juan de Borbón”. Esta agua se obtuvo el día 31 de enero de 2025. El primer paso previo a la realización de los experimentos es preparar el agua procedente de la fragata. Para ello se realizó una filtración de esta, con técnicas ya mencionadas anteriormente. Se empleó un matraz Kitasato, base de vidrio porosa, filtros de fibra de vidrio ($1,2\ \mu\text{m}$), embudo y pinza de sujeción y botella de vidrio de 1 L.

Se conecta el matraz Kitasato con la trompa de vacío, encima del matraz se coloca el embudo Büchner con un filtro y se sujeta con una pinza, por cuestiones de seguridad. Una vez realizado este montaje se va vertiendo el agua contaminada poco a poco, para no saturar el filtro, sustituyendo el filtro cuando se pare la filtración. Con este proceso se continua hasta filtrar 1 L de agua residual. Una vez el agua residual ha sido filtrada, se conservará en nevera, manteniendo así sus propiedades originales y evitar que su alteración.

Esta filtración tiene diversos motivos:

- Para el proyecto se asume que entraría a la etapa de desinfección sin sólidos, por lo que se realiza la filtración para reducir los sólidos presentes en el agua ya que estos podrían distorsionar los datos medidos de los experimentos.
- El agua filtrada mantiene mejor las propiedades a lo largo del tiempo, por lo que la diferencia de tiempo entre la realización de experimentos y la toma de datos, alterarían en menor medida los análisis.

3.4 Experimentos de tratamiento de aguas contaminadas

Para poder optimizar el tratamiento de aguas residuales se realizaron una serie de experimentos preliminares con cada uno de los métodos de descontaminación propuestos en este proyecto. El propósito de realizar estos experimentos es averiguar la capacidad que tienen estas técnicas por separado en función del tiempo de descontaminar el agua y fijar los valores mínimos de cada variable para la optimización.

3.4.1 Experimento preliminar con hidrotalcita

Para realizar este experimento se utilizó el siguiente material: agua residual, hidrotalcita, matraz, agitador magnético, medidor de pH, turbidímetro, jeringa de 20 ml y filtros de jeringa (0,45 μm).

Se crea una disolución con 100 ml del agua filtrada y 0,5 g de HDL (5 mg/mL), una vez hecha la mezcla se agita a 250 rpm para homogeneizar la mezcla. Se tomarán muestras de 15 ml en los siguientes tiempos: 0 min, 15 min, 30 min, 1 h, 3h, 6h y 24h. Estas muestras pasan a través de un filtrado con jeringa, para separar la HDL de la muestra.

Una vez obtenidas las muestras se toman las medidas de pH, turbidez, DQO, fósforo (alto rango) total y nitrógeno (alto rango) total.

El análisis del nitrógeno se realizó mediante disoluciones 1:2 para las muestras 0, 1, 2, 3 y 4, las muestras 5 y 6 se realizaron con disolución 1:1.

Para el estudio de la DQO se hicieron disoluciones 1:2 y 1:1.

3.4.2 Experimento preliminar con UV y H_2O_2

El segundo experimento se requirió el siguiente material: agua residual, lámpara UV potabilizadora de agua, H_2O_2 pinzas.

Se disuelven 7,5 mL de peróxido de hidrógeno en 150 mL de agua residual (5% v/v). Se toma una muestra inicial a tiempo 0 min, y se vierte en reactor que contiene la lámpara. Durante el montaje se coloca la lámpara en posición horizontal, para aumentar la superficie de contacto con la luz UV (véase Figura 3-8). A continuación, se tomarán muestras de 15 mL en los siguientes tiempos: 0 min, 15 min, 30 min, 1 h, 3h y 24h.

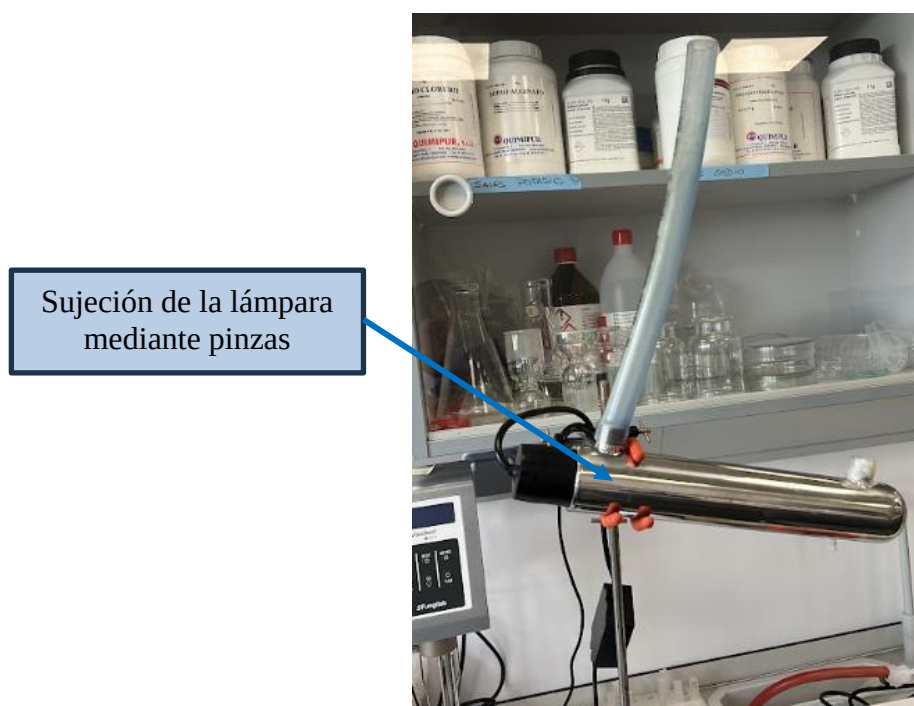


Figura 3-8 Montaje lámpara UV en horizontal

Una vez recogidas las muestras se toman las medidas de pH, turbidez, DQO, fósforo (alto rango) total y nitrógeno (alto rango) total.

3.4.3 Diseño experimental Box-Behnken (BBD)

Una vez analizados los resultados de los experimentos anteriormente descritos, se plantea la combinación de las variables aplicando el método de diseño Box-Behnken, que es un tipo de diseño experimental utilizado para optimizar procesos químicos y físicos y para planificar los experimentos. Forma parte de los conocidos diseños de superficie de respuesta y se emplea para modelar y analizar la relación entre múltiples variables independientes y una o más variables de respuesta.

Funciona de tal manera que para cada variable independiente se aplican tres niveles: bajo (-1), medio (0) y alto (+1), ya que está basado en una combinación de diseños factoriales fraccionarios. Reduce al mínimo los experimentos necesarios optimizándose así recursos y tiempo. Además, la ubicación de los puntos experimentales no está en los vértices del cubo experimental, haciéndolo más seguro en los estudios donde los valores extremos sean poco factibles. Las variables se codifican para eliminar la influencia de su magnitud.

Por tanto, en un diseño experimental de 3 variables independientes, se realizan un total de 15 experimentos que combinen 3 valores de dichas variables.

En este proyecto para el diseño experimental se tienen en cuenta las siguientes variables independientes: la dosis de hidrotalcita (mg/mL), la concentración de peróxido de hidrógeno (% volumétrico) y el tiempo (minutos) que pasa el experimento en la lámpara UV. Según los resultados obtenidos en la fase de experimentación preliminar, se estudiarán los siguientes valores para cada variable (Tabla 3-1):

BBD	-1	0	1
X1 - HDL	2,5 mg/mL	5 mg/mL	7,5 mg/mL
X2 - H ₂ O ₂	0	5%	10%
X3 - UV (t)	30 min	105 min	180 min

Tabla 3-1 Combinaciones de los adsorbentes del proyecto

En la siguiente tabla se puede observar los diferentes experimentos propuestos aplicando Box-Behnken (véase Tabla 3-2):

EXP	X1	X2	X3	HDL (mg/mL)	H ₂ O ₂ (% Vol)	UV - t (min)
1	-1	-1	0	2,5	0	105
2	1	-1	0	7,5	0	105
3	-1	1	0	2,5	10	105
4	1	1	0	7,5	10	105
5	-1	0	-1	2,5	5	30
6	1	0	-1	7,5	5	30
7	-1	0	1	2,5	5	180
8	1	0	1	7,5	5	180
9	0	-1	-1	5	0	30
10	0	1	-1	5	10	30
11	0	-1	1	5	0	180
12	0	1	1	5	10	180
13	0	0	0	5	5	105
14	0	0	0	5	5	105
15	0	0	0	5	5	105

Tabla 3-2 Experimentos propuestos por el método de diseño Box-Behnken

3.4.4 Experimentos lámpara UV, H_2O_2 e hidrotalcita

Para realizar los experimentos 1-15 obtenidos con el diseño experimental BBD explicado anteriormente se emplean los siguientes materiales: agua residual, lámpara UV, peróxido de hidrógeno, hidrotalcita, pipeta de volumen variable, agua filtrada y cámara de incubación.

Todos los experimentos se realizaron con un volumen de 50 mL a temperatura ambiente. El primer paso es hacer la disolución de H_2O_2 y HDL con las proporciones que indica el experimento escogido del BBD. Una vez hecha la mezcla se introduce en la lámpara UV y, se coloca en el agitador de la cámara de incubación lo más horizontal posible para mantener la mayor superficie de la lámpara en contacto con el agua contaminada. La mezcla estará agitada a 150 rpm durante el tiempo que corresponda, montaje mostrado en la Figura 3-9.



Figura 3-9 Montaje del experimento UV/ H_2O_2

3.5 Métodos de análisis

Para el estudio de las muestras experimentales se han empleado diversos procedimientos para analizar los contaminantes existentes en el agua. A continuación, se detallarán los procedimientos y materiales que se emplean para el análisis de las muestras:

3.5.1 Medición del pH

El pH es una medida que indica el grado de acidez o alcalinidad (basicidad) de una solución acuosa. Se expresa en una escala numérica que va de 0 a 14 y para su medición en el presente proyecto se ha empleado material de Hanna Instruments, el pHmetro HI2002 (véase Figura 3-10).

- Modo de empleo:
 - Primero, encender el dispositivo, cuenta con un botón de “POWER” en la parte superior.
 - Segundo paso introducir el electrodo en la disolución acuosa.
 - En la pantalla se mostrará en grande el valor del pH.



Figura 3-10 Medidor de pH Hanna Instruments (elaboración propia)

3.5.2 Turbidez

La turbidez del agua es una medida de la cantidad de partículas suspendidas en el agua que afectan a su claridad. Estas partículas pueden ser arcillas, limos, materia orgánica, microorganismos, algas o residuos. Se mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez, conocido como NTU.

En este proyecto se ha empleado el turbidímetro XS TN3024 de PCE Instruments, que se trata de un equipo portátil que aplica una fuente luminosa LED de 830 nm de longitud de onda. Cuenta con un rango de medición de 0-50 NTU y de 50-1000 NTU.

- Modo de empleo:

- Lo primero es encender el aparato presionando el botón “POWER”
- Se debe calibrar el aparato con las dos muestras que ofrece el contenido de la caja del turbidímetro, una de 0 NTU y otra de 100 NTU.
- Una vez calibrado se introduce la muestra a examinar en el vial de 10 mL, una vez lleno se coloca el vial en el hueco correspondiente y se cierra la tapa, se presiona el botón “TEST/CAL”.
- Tras unos segundos de espera dará un resultado.



**Figura 3-11 Turbidímetro
(elaboración propia)**

3.5.3 Nitrógeno Total

Para realizar las mediciones de nitrógeno total de rango alto en el presente trabajo se emplea un fotómetro multiparamétrico de Hanna Instruments hi83399 y el kit de test Nitrógeno total (HI94767B-50), que ofrece viales HI94767B-B y HI94766V-OLR, sobres de bisulfito, persulfato y de reactivos HI93767-0. El procedimiento que seguir es el siguiente:

- El primer paso es introducir el sobre de persulfato en el vial HI94767B-B (rojo).
- Añadir 0,5 ml de la muestra a analizar y se agita vigorosamente.
- Se calientan los viales a 105°C durante 30 minutos.
- Una vez hayan reposado hasta temperatura ambiente, se añade el sobre de bisulfito y se agita suavemente durante 20 segundos.
- Esperar 3 minutos e introducir el sobre de reactivo HI93767-0 y se agita suavemente durante 20 segundos.
- Tras esperar 2 minutos se transfieren 2 ml del vial rojo al vial verde (HI94766V-OLR), y se invierte al menos 10 veces (los viales se calientan).
- Esperar 5 minutos.
- Introducir el vial en el espectrofotómetro y presionar “READ” *.

*Previamente hay que hacer un vial de blanco (con agua destilada) de igual manera que se haría una muestra de agua residual, y en el último paso presionar el botón “ZERO”

3.5.4 Fósforo Total

Para medir el fósforo total de rango alto en el proyecto se emplea un fotómetro multiparamétrico de Hanna Instruments HI83399 y el kit de test Fósforo Total (HI94763B-50), que ofrece viales de HI94763B-50, reactivos y polvos de persulfato para medir en el rango de 0-32,6 mg/L. El procedimiento es el siguiente:

- El primer paso es introducir 5 mL de la muestra en un vial HI94758V-0HR.
- Se añade un sobre de PERSULFATE/P y se agita suavemente.

- Se calienta los viales a 150°C durante 30 minutos.
- Dejar reposar hasta alcanzar temperatura ambiente.
- Se añaden 2 mL de HI93758C-0 y se invierte el vial varias veces suavemente.
- Se añaden 0,5 mL de HI93763B-0 y se invierte el vial varias veces suavemente.
- Esperar 7 minutos.
- Introducir el vial en el espectrofotómetro y presionar “READ” *.

* Previamente hay que hacer un vial de blanco (con agua destilada) de igual manera que se haría una muestra de agua residual, y en el último paso presionar el botón “ZERO” (véase Figura 3-12).



Figura 3-12 Blanco para medición de fósforo total (elaboración propia)

3.5.5 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno se trata de la cantidad de oxígeno que hace falta para oxidar químicamente los compuestos oxidables que se encuentran en una muestra de agua, sus unidades son $\text{mg O}_2/\text{l}$. Para realizar las mediciones de DQO se requiere el siguiente material:

- Materiales: tubos de ensayo (con tapón), agitador magnético, bureta de 50 ml, matraz Erlenmeyer de 50 ml, dosificadores de 5 ml, cinta de teflón, bloque de digestión a 150 °C, guantes, gafas y campana extractora.
- Reactivos: $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{HgSO}_4$, $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ag}_2\text{SO}_4$, $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_3$, ferroína, agua residual y agua destilada.

Para analizar la DQO se sigue el siguiente procedimiento:

- Se toma un tubo, y se colocan 2,5 ml de la muestra.
- Se añaden 1,5 ml de disolución digestora ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{HgSO}_4$) y 3,5 ml de disolución catalítica ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ag}_2\text{SO}_4$), de manera cuidadosa. Este proceso se realizará con EPIS y en la campana extractora.
- Se coloca cinta de teflón y se cierra el tubo, se agita suavemente para homogeneizar la mezcla (se produce un aumento de la temperatura).
- Se introducen los tubos en el bloque de digestión a 150 °C durante 2 horas.

- Valoración del exceso de dicromato. Se vierte el contenido del tubo en el matraz Erlenmeyer y se lava el interior del tubo con agua destilada (2/3 del tubo) y se vierte en el matraz.
- Se añaden 2 gotas de ferroína y se agita suavemente.
- Se valora con una disolución de sulfato amónico ferroso (FAS) de concentración conocida. El punto de valoración se alcanza cuando la disolución toma un color rojizo (véase Figura 3-13).
- Siempre hay que seguir los mismos pasos, pero en vez de agua residual, con agua destilada, ya que será nuestro blanco. Imprescindible para realizar la valoración.

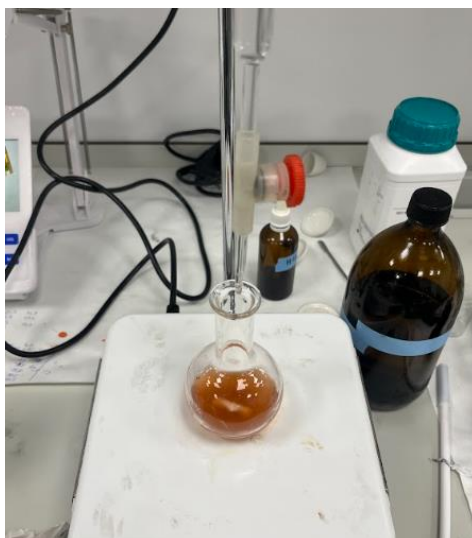


**Figura 3-13 Valoración de DQO,
tomando color rojizo (elaboración
propia)**

Para hallar los valores de DQO, una vez obtenidos los volúmenes de la disolución valoradora consumida, se realiza el siguiente cálculo:

$$DQO \left(\frac{mg O_2}{l} \right) = \frac{(B - A) \times N_{FAS} \times 8 \times 1000}{V_{muestra}}$$

Siendo:

- B: volumen de la solución valoradora consumida por el blanco.
- A: volumen de la solución valoradora consumida por la muestra de agua residual.
- N_{FAS} : normalidad de la disolución de FAS.

3.5.6 Nitrógeno total, carbono orgánico total e inorgánico

El análisis de del carbono se realizó en el servicio de análisis (CACTI) de la Universidad de Vigo, donde se empleó el analizador analytikjena multi N/C 3100 para obtener los datos de carbono total (TC), carbono orgánico total (TOC) y nitrógeno total (TN), que se basa en la descomposición termocatalítica de la muestra. El CO_2 se detecta mediante el NDIR (detector de infrarrojo no dispersivo).

Por otro lado, para obtener datos del carbono inorgánico total (TIC), se determina mediante la inyección directa en medio ácido, por lo que genera CO_2 siendo este detectado por el NDIR.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterización agua residual

La caracterización del agua residual en su estado inicial es un paso importante para conocer los valores iniciales y definir los tratamientos necesarios para su depuración. En este estudio, se analizó una muestra de agua residual extraída de la fragata F-102. Los parámetros evaluados incluyen pH, turbidez, nitrógeno (N), fósforo (P), demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (TOC) y carbono inorgánico (IC). Estos parámetros se analizan a lo largo del trabajo para evaluar la eficacia de los tratamientos propuestos, cabe mencionar que los datos de pH, N, TOC e IC han sido tomados tras ser el agua residual filtrada.

La caracterización inicial del agua extraída de la fragata se muestra en la Tabla 4-1:

MUESTRA DE AGUA FRAGATA F-102 “ALMIRANTE JUAN DE BORBÓN”							
PARÁMETROS	pH	TURBIDEZ (NTU)	DQO (mg O ₂ /l)	N (mg/l)	P (mg/l)	TOC (mg/l)	IC (mg/l)
SIN FILTRAR	7,64	68	1269,33	-	1,4	-	-
FILTRAD	7,89	20,33	899,73	164,54	1,5	123,79	198,5

Tabla 4-1 Caracterización agua F-102

El pH mostró un valor ligeramente alcalino, aunque dentro del rango esperable para aguas residuales. Este valor depende del tipo de residuo que se genera, por lo que puede variar entre muestra y muestra. La turbidez mostró un valor de 68 NTU, lo que indica un alto valor de partículas en suspensión y es un indicador de la necesidad de aplicar un tratamiento de depuración al agua, cabe mencionar que para este análisis el agua no ha pasado por un filtro de 0,45 μ m, por lo que se genera una diferencia sustancial a la hora de analizar, ya que como se verá más adelante en el presente trabajo, el valor inicial de turbidez cuando el agua pasa a través de un filtro es de 20,33.

El agua mostró también una cantidad elevada de compuestos nitrogenados (164,54 mg/l), que pueden encontrarse en forma de amoníaco, nitratos o nitritos. Este valor de nitrógeno fue analizado en el CACTI, sin embargo, los valores analizados en laboratorio siguieron siendo elevados, con una cantidad de compuestos nitrogenados de 220 mg/l. La concentración de fósforo mostró una carga menor, comparada con otros contaminantes, de 1.4 mg/l, lo que lo sitúa en un rango de contaminación moderado. En cambio, la carga orgánica de la muestra fue muy elevada, con valores de DQO de 1269.33 mg O₂/l, un valor de TOC de 123.79 mg/l y un valor de IC de 198.5 mg/l, que sugiere la presencia de bicarbonatos que puede influir en el valor de pH del agua.

4.1.1 Cumplimiento de la normativa

En la Tabla 4-2 se muestra que parámetros cumplen con las normativas. Como se puede observar, es necesario seguir tratando el agua para cumplir la mayor parte de límites.

PARÁMETRO	VALOR F-102	LÍMITES	CUMPLE
pH	7,89	6.0-9.0	SÍ
N (mg/ml)	164,54	< 20 (cuando aplica)	NO
P (mg/ml)	1,4	< 1.0 (cuando aplica)	NO
DQO (mg O ₂ /l)	1269,33	< 125	NO

Tabla 4-2 Comparativa valores F-102 vs límites MARPOL

4.2 Experimentos preliminares

4.2.1 Evaluación del efecto de la hidrotalcita en la recuperación de aguas residuales en buques

En este experimento se evaluó el efecto de la hidrotalcita en la depuración de las aguas residuales. Se extrajeron 7 muestras en diferentes intervalos de tiempo: una muestra inicial, 15 min, 30 min, 1 h, 3 h, 6 h y 24 y se filtraron por 0,45 µm para eliminar los sólidos en suspensión ocasionados por la Hidrotalcita. En las muestras se analizó pH, turbidez, fósforo y nitrógeno (Tabla 4-3):

MUESTRA	pH	TURBIDEZ (NTU)	FÓSFORO (mg/L)	NITRÓGENO (mg/L)
$t_{0 \text{ min}}$	7,89	20,33	1,5	> 150
$t_{15 \text{ min}}$	8,34	0,89	0,4	> 150
$t_{30 \text{ min}}$	8,34	0,91	0,3	> 150
$t_{1 \text{ h}}$	8,34	1,02	0,2	> 150
$t_{3 \text{ h}}$	8,34	0,85	0,0	> 150
$t_{6 \text{ h}}$	8,34	0,0	0,0	> 150
$t_{24 \text{ h}}$	8,34	0,0	0,0	> 150

Tabla 4-3 Experimento preliminar con hidrotalcita

Mediante los datos mostrados en esta tabla (Tabla 4-3) se extrae el efecto que tiene la hidrotalcita en el agua residual. Comenzando con el pH se observa que la muestra posee un pH de 7,89, que tras los primeros 15 minutos se estabiliza en 8,34 esto se debe a que la hidrotalcita posee cierto efecto alcalinizante, debido a su estructura de tipo aniónico anteriormente mencionada. Siguiendo con la turbidez, esta comienza con un valor muy elevado de 20,33 NTU que, en las primeras horas disminuye rápidamente a valores alrededor de 0,90 NTU y es tras 6 horas de agitación que el agua no presenta ningún tipo de turbidez, por tanto, extraemos que la hidrotalcita es un adsorbente muy eficaz, ya que en las primeras horas elimina la mayor parte de las partículas en suspensión. El mismo comportamiento se

observa para el fósforo, que disminuye de 1,5 mg/l a 0 en las primeras 3 horas, por lo que la hidrotalcita es un excelente adsorbente. Sin embargo, su capacidad adsorbente no se pudo observar con el nitrógeno, cuyo alto valor inicial provocó que se saliese de rango, dificultando su estudio.

Cabe mencionar que la turbidez inicial se aleja de la tomada para la caracterización del agua, ya que ha pasado por el filtro de 22 µm.

En la siguiente tabla se muestran los diferentes valores de DQO medidos por replicado a lo largo del experimento (Tabla 4-4):

MUESTRA	DQO 1:1 (mg O ₂ /L)	DQO 1:2 (mg O ₂ /L)	DQO 1:2 (mg O ₂ /L)
$t_0 \text{ min}$	795,2	1030,4	873,6
$t_{15 \text{ min}}$	728	873,6	761,6
$t_{30 \text{ min}}$	526,4	784	739,2
$t_1 \text{ h}$	772,8	761,6	761,6
$t_3 \text{ h}$	750,4	716,8	582,4
-	DQO 1:1 (mg O ₂ /L)		DQO 1:1 (mg O ₂ /L)
$t_6 \text{ h}$	515,2	302,4	
$t_{24 \text{ h}}$	571,2	212,8	

Tabla 4-4 Resultados DQO experimento preliminar

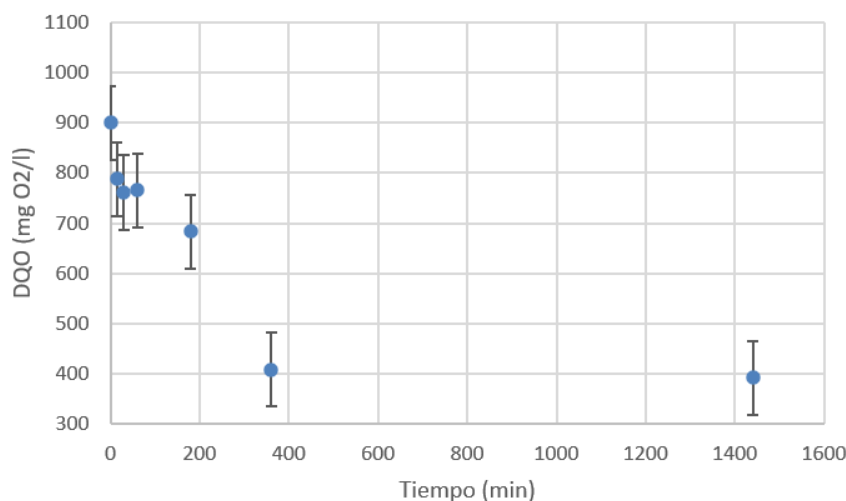


Figura 4-1 Evolución de la DQO en el experimento preliminar

De la se analiza cómo afecta la hidrotalcita a la materia orgánica presente en el agua residual. Como se puede observar la hidrotalcita tiene efectos positivos en la eliminación de materia orgánica, llegando a eliminar hasta un 57% de la DQO como se puede calcular de la siguiente manera:

$$\frac{\bar{t}_0 - \bar{t}_{24 \text{ h}}}{\bar{t}_0}$$

- $\bar{t}_0 = 899,73 \text{ mg } O_2/l$
- $\overline{t_{24h}} = 392 \text{ mg } O_2/l$

Por otro lado, la gráfica ha sido realizada con las medias de los valores de la DQO analizados (descartando el valor de 526,4 a $t_{30 \text{ min}}$ debido a la anomalía que presenta respecto a los otros dos valores), de esta se extrae que la DQO disminuye de manera dependiente del tiempo, pero esta eliminación no es significativa hasta pasadas las 6 h de experimento.

4.2.2 Evaluación del efecto de la aplicación de UV y H_2O_2 en la recuperación de aguas residuales en buques

En el siguiente experimento preliminar se evaluó el efecto combinado de la radiación UV y el peróxido de hidrógeno en la eliminación de contaminantes en aguas residuales en buques. Los resultados, medidos a diferentes intervalos, se muestran en la Tabla 4-5:

MUESTRA	pH	TURBIDEZ (NTU)	NITRÓGENO (mg/l)	FÓSFORO (mg/l)	DQO
$t_0 \text{ min}$	7,89	111	50	f.r.	f.r.
$t_{15 \text{ min}}$	7,89	93	50	f.r.	f.r.
$t_{30 \text{ min}}$	7,91	82	48	f.r.	f.r.
$t_1 \text{ h}$	7,90	58	53	f.r.	f.r.
$t_3 \text{ h}$	7,94	42	63	0,6	f.r.
$t_6 \text{ h}$	7,91	27	67	0,5	f.r.
$t_{24 \text{ h}}$	7,89	7,5	64	0,4	f.r.

Tabla 4-5 Resultados experimento preliminar radiación UV y H_2O_2 . f.r. indica que la medida está fuera de rango.

Durante la realización de este experimento se observó que el pH se mantiene estable durante todo el experimento, por lo que la radiación UV y el peróxido de hidrógeno no influyen significativamente en este parámetro. Por otro lado, la turbidez, muestra una marcada reducción en un intervalo de 24 horas (de 111 a 7.5 NTU) aunque los valores iniciales elevados se deben a que el peróxido de hidrógeno genera gas en las muestras que produce interferencias en la medida del turbidímetro y dificulta el análisis. En cuanto a los nutrientes, fósforo y nitrógeno muestran un comportamiento similar, con tendencia a aumentar en las primeras mediciones, aunque, en el caso del fósforo, se produce una disminución a continuación, alcanzando valores de 0,6 mg/l a partir de las 3 horas. En el caso del nitrógeno, es cierto que desde el inicio el H_2O_2 reduce significativamente los valores de N (164,54 mg/l), pero no se observa una disminución de su concentración lo que parece indicar la liberación de compuestos nitrogenados durante el tratamiento. Durante el análisis de la DQO todas las muestras se salen de rango, lo que no era de esperar pues se conocía previamente su concentración inicial.

En este punto del experimento podemos concluir que el peróxido de hidrógeno afecta al método de análisis del fósforo y de la DQO. Ya que el H_2O_2 genera interferencias positivas lleva a sobreestimar la concentración de materia orgánica en una muestra de agua residual. Esto es debido a que el peróxido actúa como agente reductor frente al dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), que es el reactivo oxidante principal en la prueba de DQO, este comportamiento altera los resultados de varias formas [66]:

- Genera valores falsos de DQO, el peróxido consume parte del reactivo simulando una mayor presencia de materia orgánica.
- Al tratarse de una reacción el color rojizo de referencia puede variar drásticamente.
- En presencia de iones Fe^{2+} , se puede inducir la Reacción de Fenton, generando radicales hidroxilos, que oxidan aún más compuestos orgánicos y modifican su estructura química durante el análisis.

En conclusión, a partir de este experimento preliminar se puede demostrar que la utilización de lámpara UV/ H_2O_2 reduce la turbidez del agua residual, pero dadas las interferencias detectadas en las medidas colorimétricas de la DQO, nitrógeno y fósforo total no se puede concluir cuál es su efecto sobre estos compuestos. Por lo tanto, para el análisis de los experimentos que combinan UV/ H_2O_2 con hidrotalcita se ha recurrido a analizar el carbono total orgánico (TOC) y el nitrógeno total mediante un analizador específico disponible en los servicios centrales de la Universidad de Vigo (ver sección 3.5.6). Para la medida de fósforo no se ha encontrado una alternativa viable, por lo que sólo se podrá determinar en aquellos experimentos donde no se aplique peróxido de hidrógeno.

4.3 Evaluación de la eficacia combinada de la lámpara UV, H_2O_2 e hidrotalcita en el tratamiento de aguas residuales en buques

En este experimento se evaluaron diversas combinaciones de tratamientos aplicando el método Box-Behnken para determinar el efecto de las tres variables en la recuperación de aguas residuales. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4-6:

EXP	Tratamiento realizado	pH	TURBIDEZ (NTU)	TOC (mg/l)	IC (mg/l)	NITRÓGENO (mg/l)
1	2,5 mg/ml HDL, 0% H ₂ O ₂ y 105 min UV	8,08	27,2	55,83	106,18	111,04
2	7,5 mg/ml HDL, 0% H ₂ O ₂ y 105 min UV	8,15	20,65	57,16	93,02	148,55
3	2,5 mg/ml HDL 10 % H ₂ O ₂ y 105 min UV	7,82	57,00	6,56	12,51	13,85
4	7,5 mg/ml HDL, 10% H ₂ O ₂ y 105 min UV	7,97	70,00	9,59	14,96	15,39
5	2,5 mg/ml HDL, 5% H ₂ O ₂ y 30 min UV	7,80	20,15	13,20	20,46	18,00
6	7,5 mg/ml, 5% H ₂ O ₂ y 30 min UV	7,90	10,13	16,23	28,99	32,78
7	2,5 mg/ml HDL, 5% H ₂ O ₂ y 180 min UV	7,86	6,40	32,93	79,00	69,72
8	7,5 mg/ml, 5% H ₂ O ₂ y 180 min UV	7,91	17,30	31,79	84,34	111,51
9	5 mg/ml, 0% H ₂ O ₂ y 30 min UV	8,15	28,60	92,47	144,20	165,84
10	5 mg/ml, 10% H ₂ O ₂ y 30 min UV	7,85	10,00	16,07	15,35	16,86
11	5 mg/ml, 0% H ₂ O ₂ y 180 min UV	8,15	16,60	82,37	108,53	163,25
12	5 mg/ml, 10% H ₂ O ₂ y 180 min UV	7,85	20,50	18,63	41,95	53,24
13	5 mg/ml, 5% H ₂ O ₂ y 105 min UV	7,85	15,00	36,64	75,24	85,94
14	5 mg/ml, 5% H ₂ O ₂ y 105 min UV	7,87	9,60	16,02	42,43	45,90
15	5 mg/ml, 5% H ₂ O ₂ y 105 min UV	7,90	14,15	12,55	33,56	34,01

Tabla 4-6 Combinación lámpara UV, H₂O₂ e HDL

A continuación, se muestran los porcentajes de eliminación del carbono total orgánico, carbono inorgánico y del nitrógeno (Tabla 4-7). El tratamiento de los datos para estas variables se realizará con estos valores. Se debe tener en cuenta que para la estimación de estas eliminaciones se tuvieron en cuenta cuando se añade 5% y 10% H₂O₂ por lo que dos muestras con estas proporciones fueron enviadas al servicio de análisis de la Universidad de Vigo.

EXPERIMENTO	% TOC	% IC	% N
1	54,90	46,50	32,51
2	53,82	53,14	3,64
3	93,03	93,29	89,69
4	89,81	91,98	88,54
5	87,87	90,37	87,70
6	85,09	86,36	77,61
7	69,76	62,83	52,38
8	70,80	60,31	23,84
9	25,30	27,35	0
10	82,93	91,77	87,44
11	33,46	45,32	0,80
12	80,21	77,50	60,36
13	66,35	64,60	41,30
14	85,29	80,03	68,65
15	88,47	84,21	76,77

Tabla 4-7 Porcentajes de eliminación, combinación lámpara UV, H₂O₂ y HDL

Para el analizar la efectividad de combinar la hidrotalcita con UV H₂O₂ y encontrar el tiempo óptimo de tratamiento, se estudian a continuación las diferentes variables dependientes del diseño Box-Behnken (turbidez, COT, CI, N).

4.3.1 Análisis de la turbidez

A continuación, se representa el diagrama de Pareto de efecto estandarizado (Figura 4-2), que nos muestra si las combinaciones de las diferentes variables (el tiempo de experimentación, la HDL y la proporción de H₂O₂ empleada en la lámpara UV) son significativas a la hora de reducir la turbidez del agua residual, y en qué proporción.

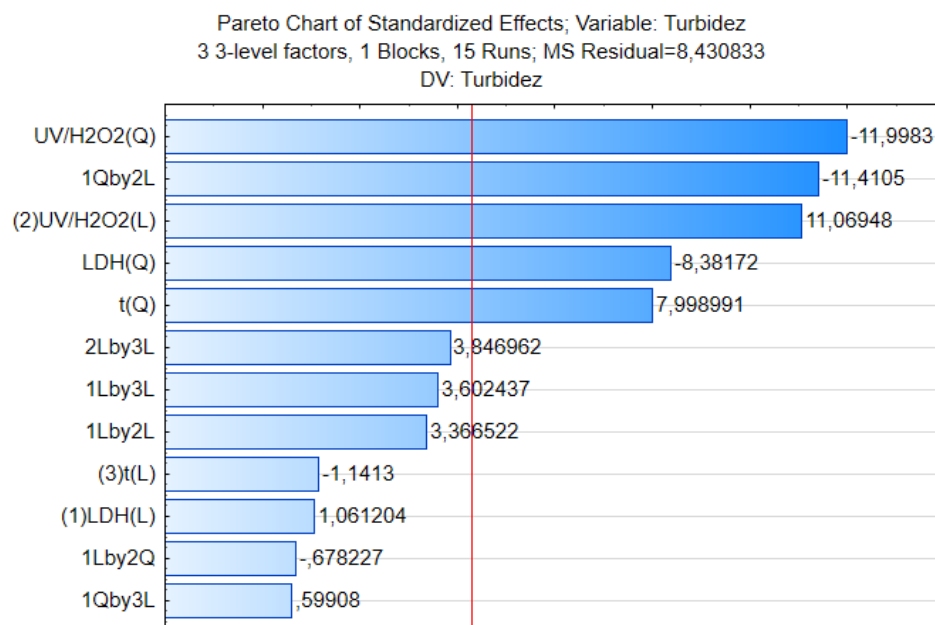


Figura 4-2 Diagrama de Pareto - Turbidez

Para que las variables anteriormente mencionadas posean un impacto significativo en la reducción de la turbidez, el valor debe de encontrarse a la derecha de la línea roja, que depende del parámetro estadístico p , este valor marca un valor de significatividad del 5% ($p < 0.05$). En este caso las tres variables se encuentran a la derecha, siendo la que más ejerce mayor influencia sobre la turbidez la cantidad de peróxido utilizado tanto de manera cuadrática (Q) como lineal (L). Seguida a esta variable sería la hidrotalcita de manera cuadrática (Q) teniendo un efecto muy similar al tiempo de experimentación (Q).

En cuanto a los valores que presentan valor negativo, estos son los que reducen el nivel de turbidez de las muestras, siendo la combinación cuadrática de UV/H₂O₂ y la hidrotalcita (Q) dos de los factores que más contribuyen a reducir la turbidez. En cambio, el tiempo presenta un valor positivo que indica que, en tratamientos prolongados, podrían darse reacciones secundarias que afecten la calidad del agua.

En las siguientes gráficas (Figura 4-3, Figura 4-4 y Figura 4-5) se representa cómo varía el valor absoluto de turbidez (NTU), en función de la hidrotalcita y el peróxido utilizado, con los diferentes tiempos (30, 105 y 180 minutos).

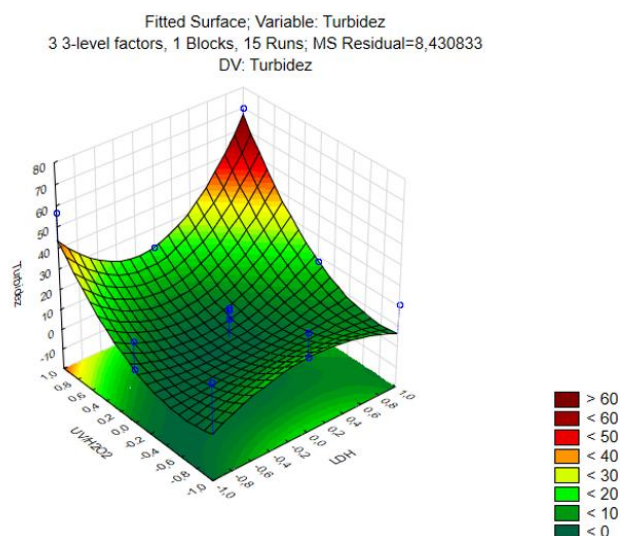


Figura 4-3 TURBIDEZ – HDL vs UV/ H₂O₂ a tiempo 1 (180 min)

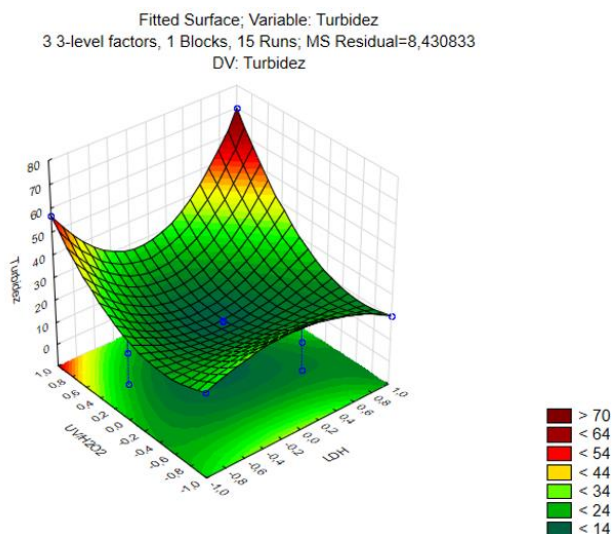


Figura 4-4 TURBIDEZ – HDL vs UV/ H₂O₂ a tiempo 0 (105 min)

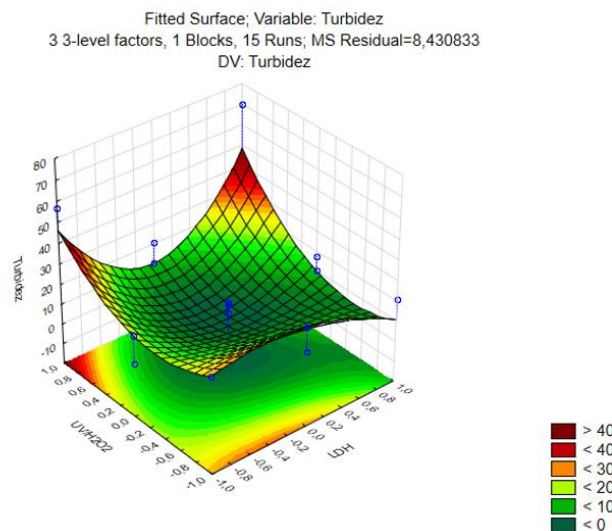


Figura 4-5 TURBIDEZ – HDL vs UV/ H₂O₂ a tiempo -1 (30 min)

Para el análisis de estas gráficas hay que tener en cuenta los valores en los que se comprende, tanto la hidrotalcita como el peróxido de hidrógeno tienen valores entre 1 (7,5 mg/ml HDL y 10% H₂O₂) y -1 (2,5 mg/ml HDL y 0% H₂O₂). Por otro lado, en cuanto a la turbidez solo tiene validez los valores positivos es decir los valores mayores a 0, ya que una turbidez negativa no se puede obtener. Una turbidez de 0 indica que el agua residual es completamente transparente (no influye el color de esta).

Los valores más elevados de eliminación de turbidez se dan para los tiempos de 30 minutos, también se aprecia que no presenta mucha variación entre 105 minutos y 180 minutos.

Como se puede observar los mejores resultados de reducción de la turbidez se dan en los valores intermedios de HDL como de UV/H₂O₂, se puede observar mejor en la Figura 4-6.

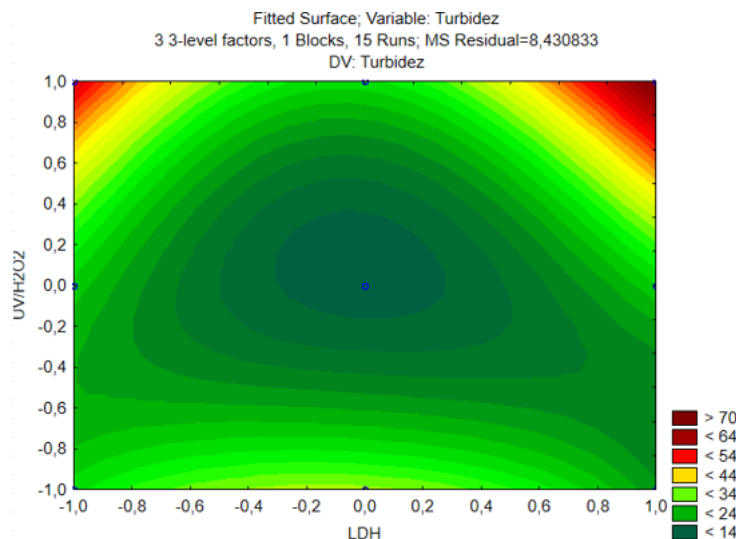


Figura 4-6 TURBIDEZ: HDL vs UV/H₂O₂ a tiempo 0 (superficie)

Este efecto es marcado para tiempos de ensayo cortos y medios. En cambio, para los ensayos a tiempo +1 (180 min) el modelo predice obtenerse un valor cero de turbidez en un rango mayor de las dos variables. Es reseñable cómo los peores resultados se dan cuando el valor de peróxido es mayor (10%), esto se podría deber a que el peróxido reacciona en el agua residual generando burbujas, que producen interferencias en las mediciones del turbidímetro. Se concluye, que el mejor tratamiento para reducir la turbidez es un proceso en el que se aplique tanto hidrotalcita como peróxido en los valores intermedios.

En la siguiente gráfica (Figura 4-7) se muestra cómo afecta la hidrotalcita en función del tiempo, manteniendo el valor de UV/H₂O₂ en su mínimo valor (-1), es decir, 0% de peróxido, pero con radiación UV de la lámpara.

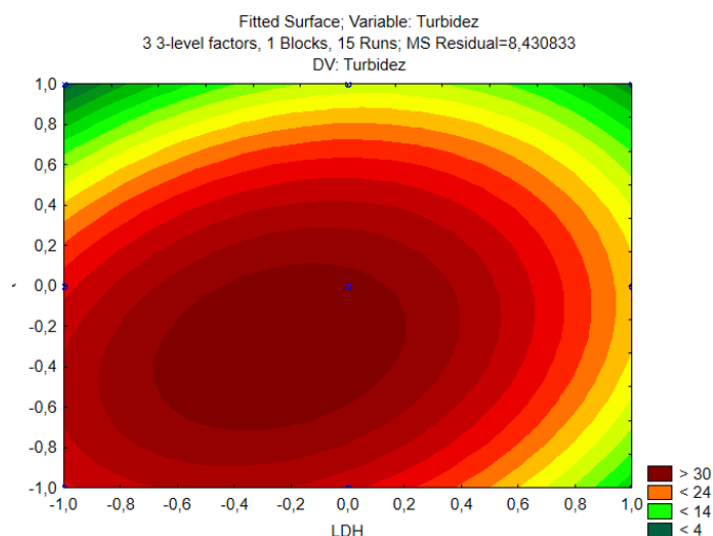


Figura 4-7 TURBIDEZ: HDL vs t

En este caso se ve claramente cómo emplear hidrotalcita con la radiación UV no produce una reducción tan marcada de la turbidez, ya que se predice un valor inferior a 4 NTU en un ensayo a largo tiempo y elevada concentración de hidrotalcita. En ausencia de Hidrotalcita y con tiempos largos (valor +1) se obtiene también un bajo valor de turbidez, pero, en este caso, la reducción del valor parece producirse por un efecto de decantación de los sólidos, más que por un proceso de adsorción o eliminación de los compuestos del medio de reacción.

En la gráfica (Figura 4-8) que se muestra a continuación, aparece cómo afecta la utilización de una lámpara UV con H₂O₂ en función del tiempo, en el caso de que se utilicen 2,5 mg/ml de hidrotalcita (valor -1).

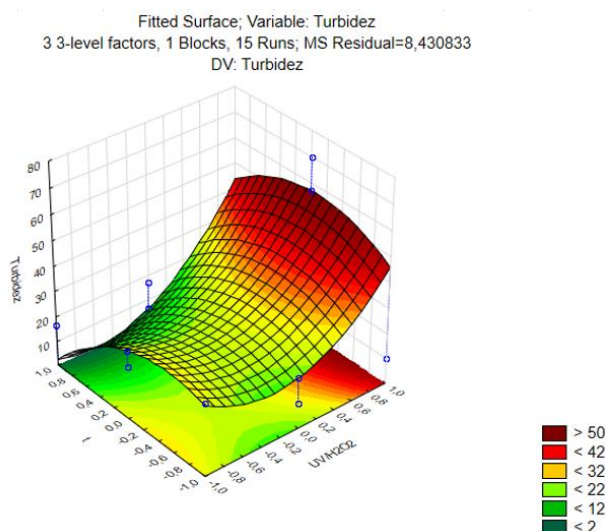


Figura 4-8 TURBIDEZ: UV/ H2O2 vs t

En este caso, el modelo predice una turbidez de 2 NTU cuando se trabaja a largo tiempo, independientemente de los valores de UV/H₂O₂ (10% de H₂O₂), lo que de nuevo parece indicar que en tiempos largos de experimentos la decantación es el mecanismo predominante. De los análisis realizados

se concluye que, a tiempos de reacción de 30 minutos, la combinación de LDH con UV/H₂O₂ en sus valores medios predicen un valor de turbidez de 0 NTU, lo que refuerza el uso de ambas variables.

Para validar el análisis realizado se hizo una comprobación del ajuste del modelo con la gráfica de valores predichos frente a observados (Figura 4-9):

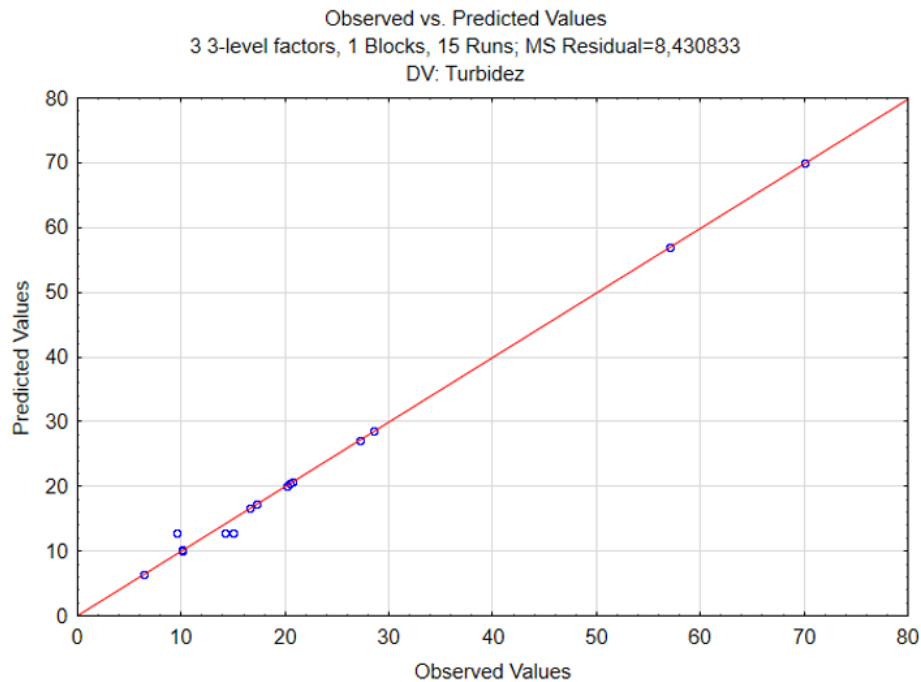


Figura 4-9 Turbidez: Predicción vs resultados

La línea roja indica la predicción de valores calculados por el programa de todas las combinaciones posibles de HDL, radiación UV con H₂O₂ y del tiempo, en sus diferentes valores. Por otro lado, los círculos azules indican los resultados de los experimentos, es decir, cuanto más cercanos a la línea roja menos error se ha cometido y la simulación del modelo está bien ajustada.

Como se puede apreciar, salvo tres puntos que se encuentran próximos a la línea roja, el resto se sitúan prácticamente sobre ella. Esto permite concluir que el margen de error es mínimo y que la predicción de resultados generada por el programa es altamente precisa, ajustándose de forma fiable a la realidad.

No obstante, para poder obtener los resultados predichos, se aplica una fórmula que considera únicamente los valores de regresión cuyo valor de p es inferior a 0,05 (es decir, aquellos destacados en rojo en la Tabla 4-8). Las variables son las siguientes:

- A= Nivel de turbidez (NTU)
- X= HDL
- Y= UV/H₂O₂
- Z= tiempo

Fórmula:

$$A=12,92 + 12,67x^2 + 18,13y^2 - 12,09z^2 + 23,43x^2y$$

De esta fórmula podemos averiguar cuál sería la combinación óptima para alcanzar el mínimo de turbidez, en este caso, haciendo el cambio de variables codificadas a sus valores reales, sería:

$$\text{HDL}=5,0 \text{ mg/ml} \quad \text{UV/H}_2\text{O}_2= 5\% \text{ H}_2\text{O}_2 \quad \text{tiempo}= 30 \text{ min}$$

Factor	Regr. Coefficients; Var.:Turbidez; R-sqr=,9962; Adj.,97339 (3 factor Box-Behnken design, 1 block , 15 runs)					
	Regressn	Std.Err.	t (2)	p	-95,00 %	+95,00 %
Mean/Interc.	12,9167	1,676388	7,70506	0,016430	5,7037	20,12958
(1) LDH (L)	0,2200	1,451795	0,15154	0,893457	-6,0266	6,46657
LDH (Q)	12,6654	1,511076	8,38172	0,013937	6,1638	19,16705
(2) UV/H2O2(L)	-3,6400	1,451795	-2,50724	0,129003	-9,8866	2,60657
UV/H2O2(Q)	18,1304	1,511076	11,99835	0,006875	11,6288	24,63205
(3)t (L)	-0,4150	1,451795	-0,28585	0,801878	-6,6616	5,83157
t (Q)	-12,0871	1,511076	-7,99899	0,015272	-18,5887	-5,58545
1L by 2L	4,8875	1,451795	3,36652	0,078045	-1,3591	11,13407
1L by 2Q	1,3925	2,053148	0,67823	0,567578	-7,4415	10,22648
1Q by 2L	23,4275	2,053148	11,41053	0,007593	14,5935	32,26148
1L by 3L	5,2300	1,451795	3,60244	0,069158	-1,0166	11,47657
1Q by 3L	-1,2300	2,053148	-0,59908	0,609941	-10,0640	7,60398
2L by 3L	5,5850	1,451795	3,84696	0,061413	-0,6616	11,83157

Tabla 4-8 Datos para la ecuación generadora de resultados

4.3.2 Análisis carbono orgánico total

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto de efectos estandarizados (Figura 4-10), el cual permite identificar qué combinaciones de variables, como el tiempo de experimentación, la HDL y la proporción de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en la lámpara UV, tienen un impacto significativo en el porcentaje de eliminación de carbono orgánico presente en el agua residual, así como la magnitud relativa de su influencia, es decir la variable que se analiza es % de eliminación de TOC.

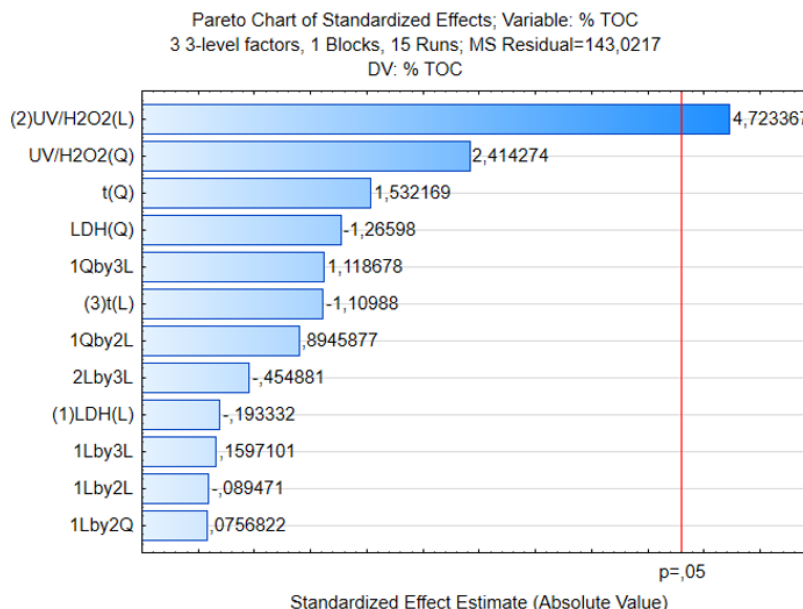


Figura 4-10 Diagrama de Pareto para efecto estandarizado - TOC

Como se explicó con la turbidez, para que el valor sea significativo debe encontrarse a la derecha de la línea roja, que depende del valor $p=0,05$. En este caso el único valor significativo se trata del valor lineal de la radiación UV con cierto porcentaje de H₂O₂. El resto de los valores se alejan bastante de la línea roja, siendo el siguiente más significativo el valor cuadrático de la misma variable.

A partir del análisis del diagrama de Pareto se concluye que el factor con mayor influencia en la reducción del TOC es la interacción lineal entre la radiación UV y la proporción de peróxido de

hidrógeno (UV/H_2O_2). Esta combinación presenta un efecto altamente significativo, lo que indica que su correcta dosificación resulta determinante para mejorar la eficiencia del proceso de tratamiento. Asimismo, el efecto cuadrático del mismo factor (UV/H_2O_2) sería el siguiente más significativo, pero se encuentra a la izquierda de la línea roja, lo que evidencia cierta relación no lineal entre la concentración de peróxido y la reducción del TOC, sugiriendo que existen niveles óptimos intermedios que maximizan el rendimiento del tratamiento.

Por otro lado, factores como el tiempo de exposición a la radiación UV y el parámetro LDH muestran una influencia moderada, pero no estadísticamente significativa, por lo que su efecto no puede considerarse concluyente bajo las condiciones del presente estudio. De igual forma, varias interacciones entre factores presentan valores de efecto bajos, indicando que su impacto sobre la variable de respuesta es limitado o nulo.

En conjunto, los resultados permiten afirmar que la optimización de la relación UV/H_2O_2 es clave para lograr una reducción eficaz del carbono orgánico total en el agua residual tratada, mientras que otros factores o combinaciones podrían requerir estudios adicionales para confirmar su relevancia.

Seguidamente se muestran gráficas (Figura 4-11, Figura 4-12 y Figura 4-13) donde se representan los porcentajes de eliminación del TOC en función de la combinación de la radiación UV y la proporción de peróxido de hidrógeno (UV/H_2O_2) y el HDL con tiempos establecidos de 30, 105 y 180 minutos.

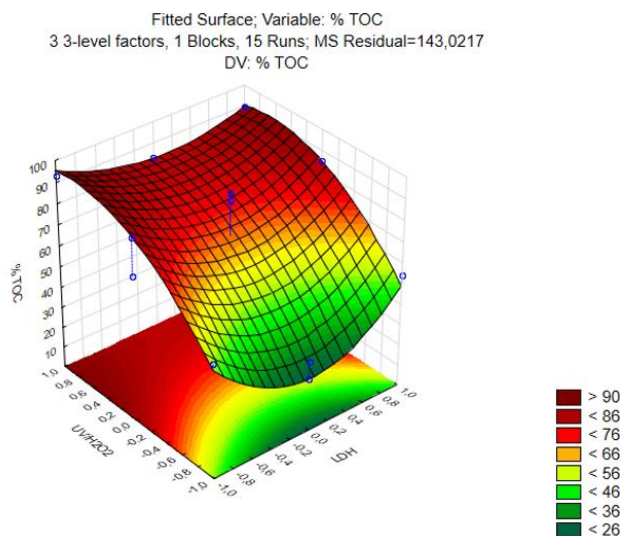


Figura 4-11 TOC – HDL vs UV/ H2O2 a tiempo -1 (30 min)

En esta gráfica (Figura 4-11) se da a tiempo -1, es decir, cuando el experimento tiene una duración de 30 minutos, los valores más altos representados en rojo indican una mayor eficiencia del proceso de tratamiento, mientras que los valores más bajos, en verde, corresponden a menores porcentajes de eliminación, es decir, a zonas de menor efectividad.

Se observa que la zona de máxima eficiencia se alcanza cuando el factor UV/H_2O_2 se encuentran en niveles elevados (1). En esta región, el sistema logra eliminar alrededor del 90 % del TOC en casi todos los niveles de HDL, lo que demuestra que no existe una dependencia entre estas dos variables.

En general, la gráfica muestra una tendencia ascendente desde las zonas de baja eficiencia (verde) hacia las de alta eficiencia (rojo), lo que confirma que para lograr una remoción óptima del TOC es necesario operar el sistema en condiciones donde los valores de la radiación UV y la proporción de peróxido de hidrógeno deben ser elevados.

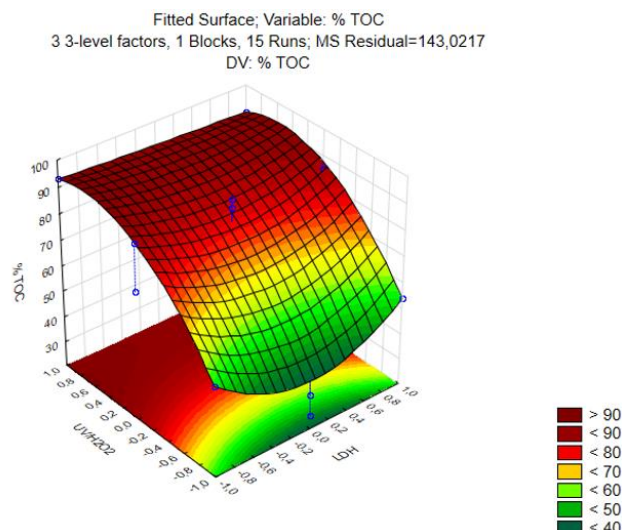


Figura 4-12 TOC – HDL vs UV/ H_2O_2 a tiempo 0 (105 min)

Por otro lado, en la gráfica (Figura 4-12) donde el tiempo es de 105 minutos, es muy parecida a la anterior analizada, con la diferencia de que el porcentaje de eliminación de TOC se mantiene más estable, es decir, siempre que el factor de UV/H_2O_2 sea 1 (10%) la eliminación del TOC es cercana al 100%. Quedando así demostrado que en la eliminación del TOC la influencia del tiempo y de la HDL queda en un segundo plano, donde el principal protagonista es la radiación UV y la proporción de peróxido.

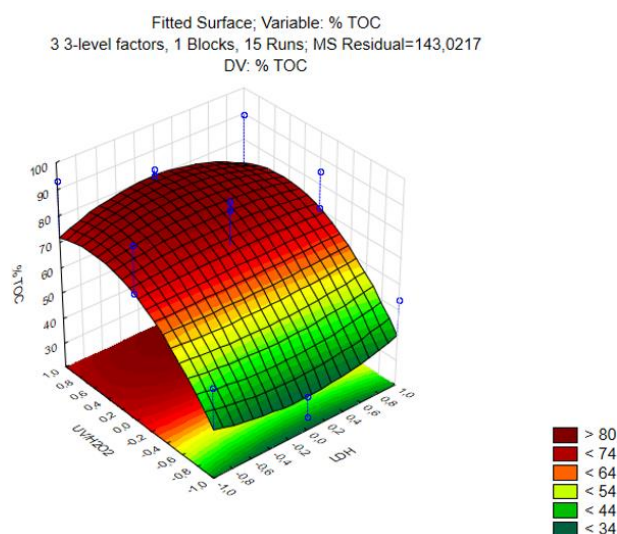


Figura 4-13 TOC – HDL vs UV/ H_2O_2 a tiempo 1 (180 min)

Esta gráfica (Figura 4-13) se da a un tiempo de 180 minutos, es destacable como a pesar de que los tiempos sean mayores, los resultados son menos favorables que en los casos anteriores, es cierto que el valor más significativo es el UV/H_2O_2 pero se logra menor porcentaje de eliminación entre 70% y 80%, siendo los resultados óptimos cuando la HDL se encuentra en los valores medios.

En la siguiente gráfica (Figura 4-14) representa el porcentaje de eliminación TOC en función de dos variables: la concentración de HDL y el tiempo de exposición, manteniéndose constante la condición de 0 % de UV/H_2O_2 , es decir, sin aplicar peróxido de hidrógeno, pero si a la exposición a la radiación UV.

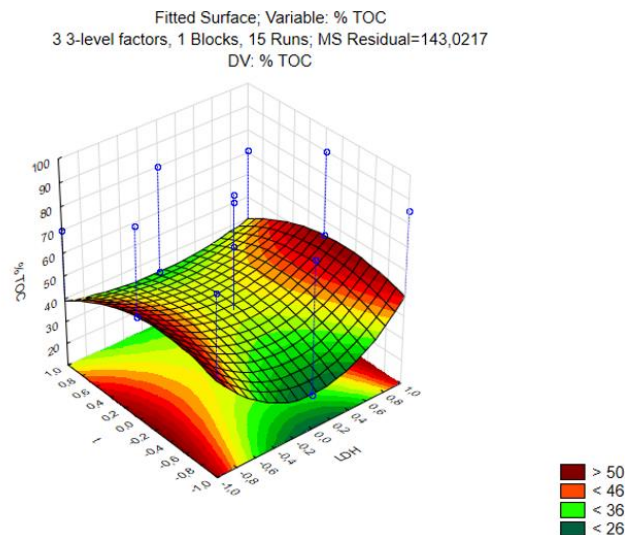


Figura 4-14 TOC – HDL vs t a 0% UV/H₂O₂

En esta condición, el tratamiento se basa exclusivamente en los efectos combinados de HDL y el tiempo bajo el efecto de una lámpara UV, sin la ayuda de oxidantes avanzados. Se observa en la gráfica una zona central en tonos verdes oscuros, donde el porcentaje de eliminación de TOC es bajo (< 26 %), lo que evidencia que, con tiempos cortos y bajas concentraciones de HDL, el proceso es poco eficiente. Por el contrario, se identifican zonas periféricas en colores rojos y anaranjados, donde se alcanzan porcentajes de eliminación superiores al 50 %. Estas regiones se sitúan en los extremos del plano, es decir, cuando se combinan tiempos prolongados con concentraciones altas o bajas de HDL. Esto sugiere que, incluso sin H₂O₂ es posible mejorar la eficiencia del proceso aumentando el tiempo de tratamiento y ajustando adecuadamente la dosis de HDL.

La forma de la superficie indica un comportamiento no lineal, con una depresión central que representa una zona de mínima eficiencia. Este patrón muestra que los niveles intermedios de HDL y tiempo no favorecen significativamente la eliminación de TOC, y que es necesario salir de esa zona de equilibrio para alcanzar mejores resultados.

La última gráfica (Figura 4-15) muestra el comportamiento del porcentaje de eliminación TOC en función de dos variables: la proporción de radiación ultravioleta y proporción de peróxido y el tiempo de exposición, manteniéndose constante la concentración de HDL en 2,5 mg/mL.

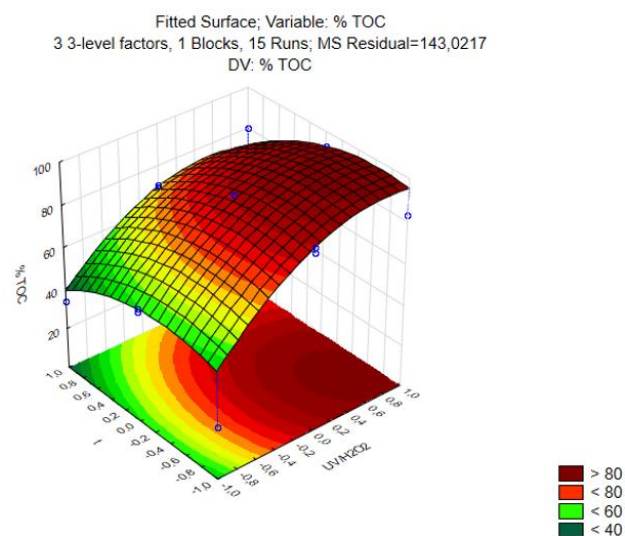


Figura 4-15 TOC – UV/H₂O₂ vs t a HDL constante (2,5 mg/ml)

A partir de la forma de la superficie, se observa que el máximo rendimiento del proceso se alcanza cuando la proporción de UV/H_2O_2 es alta (1) y el tiempo de exposición es bajo (-1). En esta combinación específica, se obtienen porcentajes de eliminación de TOC superiores al 80 % y cercanos al 100%, lo que representa la condición óptima de operación dentro del diseño experimental evaluado.

Este comportamiento indica que no es necesario aplicar largos tiempos de tratamiento para lograr una alta eficiencia, siempre que la proporción de UV/H_2O_2 sea suficiente para generar la cantidad adecuada de oxidantes. Por el contrario, a medida que el tiempo de exposición aumenta, incluso con una elevada dosis de UV/H_2O_2 se observa una ligera disminución en la eficiencia, posiblemente atribuible a la formación de productos secundarios menos reactivos.

En la región opuesta de la superficie, donde ambos factores se encuentran en niveles bajos, se presentan los menores valores de eliminación de TOC (por debajo del 60 %), reflejando la ineficacia del sistema cuando no se aplica una dosis adecuada de oxidante ni se brinda el tiempo necesario para la reacción.

En resumen, se concluye que el factor más determinante en la eficiencia del proceso es la proporción UV/H_2O_2 y que una combinación de alta dosificación con tiempos cortos resulta en un tratamiento altamente eficaz, optimizando así recursos sin comprometer el rendimiento.

Siguiendo con el análisis de la reducción de TOC, a continuación, se comprueba si los datos obtenidos en la fase de experimentación se corresponden a las predicciones calculadas por el programa, véase Figura 4-16.

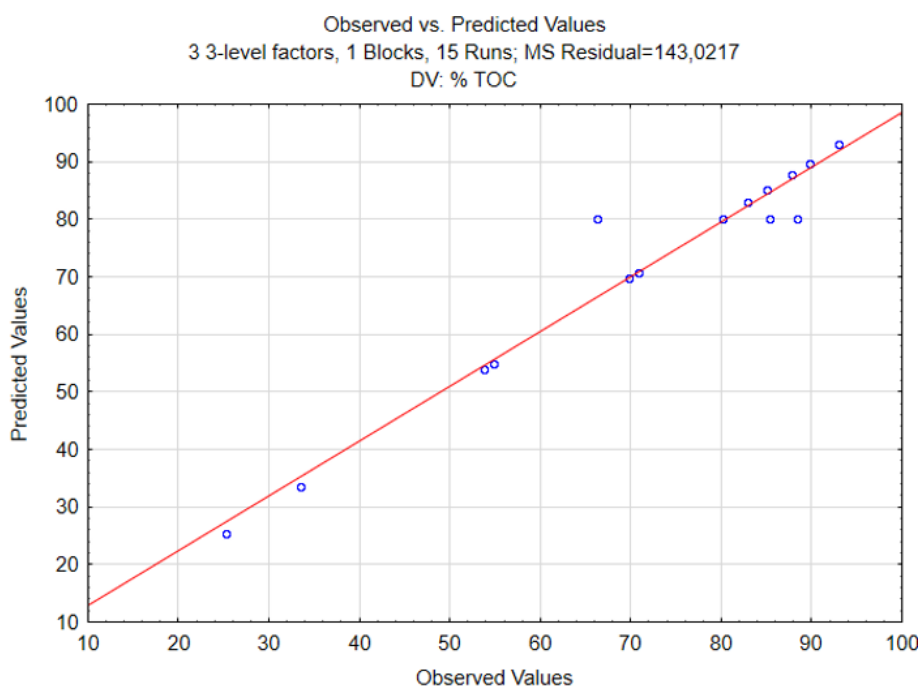


Figura 4-16 Predicción vs Resultados - TOC

Al igual que en el análisis de la turbidez, la línea roja representa los valores predichos por el programa en función de todas las combinaciones posibles entre HDL, radiación UV con peróxido de hidrógeno y tiempo, considerando sus diferentes niveles. En contraste, los círculos azules corresponden a los datos experimentales obtenidos en el laboratorio. Cuanto más cercanos estén estos puntos a la línea roja, menor será el error de predicción, lo que indica un buen ajuste del modelo.

Como se observa en la gráfica, la mayoría de los puntos experimentales coinciden prácticamente con la línea de predicción, salvo tres que se desvían ligeramente. Esto evidencia que el modelo presenta un margen de error muy bajo, y que la capacidad del programa para simular el comportamiento real del sistema es altamente precisa y confiable.

Sin embargo, los tres puntos separados de la recta se tratan de los valores de las réplicas, que al tener diferentes valores da cierto error al programa para calcular su predicción.

En esta ocasión también hay una fórmula que predice los resultados, teniendo en cuenta únicamente los valores de regresión con un valor de “p” menores a 0,05 de la siguiente Tabla 4-8. Las variables son las siguientes:

- A= % Eliminación TOC
- X= HDL
- Y= UV/H₂O₂
- Z= tiempo

Fórmula:

$$A = 80,04 + 26,10y$$

De esta fórmula podemos averiguar cuál sería la combinación óptima para alcanzar el mayor porcentaje de eliminación de TOC, en este caso, haciendo el cambio de variable a su valor real, sería:

$$UV/H_2O_2 = 8,8 \% H_2O_2$$

Factor	Regr. Coefficients; Var.: % TOC; R-sqr=,95337; Adj.,67356 (3 factor Box-Behnken design, 1 block , 15)					
	Regressn	Std.Err.	t (2)	p	-95,00 %	+95,00 %
Mean/Interc.	80,0367	6,904630	11,59174	0,007360	50,3284	109,7449
(1) LDH (L)	-0,4350	5,979585	-0,07275	0,948628	-26,1631	25,2931
LDH (Q)	7,8792	6,223749	1,26598	0,333019	-18,8995	34,6578
(2) UV/H2O2(L)	26,0950	5,979585	4,36402	0,048704	0,3669	51,8231
UV/H2O2(Q)	-15,0258	6,223749	-2,41427	0,137138	-41,8045	11,7528
(3) t (L)	1,3600	5,979585	0,22744	0,841216	-24,3681	27,0881
t (Q)	-9,5358	6,223749	-1,53217	0,265174	-36,3145	17,2428
1L by 2L	-0,5350	5,979585	-0,08947	0,936861	-26,2631	25,1931
1L by 2Q	-0,6400	8,456410	-0,07568	0,946561	-37,0250	35,7450
1Q by 2L	-7,5650	8,456410	-0,89459	0,465409	-43,9500	28,8200
1L by 3L	0,9550	5,979585	0,15971	0,887781	-24,7731	26,6831
1Q by 3L	-9,4600	8,456410	-1,11868	0,379607	-45,8450	26,9250
2L by 3L	-2,7200	5,979585	-0,45488	0,693800	-28,4481	23,0081

Tabla 4-8 Datos para la ecuación generadora de resultados -TOC

4.3.3 Análisis de carbono inorgánico

Seguidamente se expone el diagrama de Pareto de efectos estandarizados (Figura 4-17), mediante el cual es posible determinar qué combinaciones de variables, como el tiempo de tratamiento, la concentración de HDL y la proporción de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) aplicada con la lámpara UV, influyen de manera significativa en la eliminación del carbono inorgánico presente en el agua residual, así como evaluar la intensidad relativa del efecto de cada una de ellas sobre el proceso.

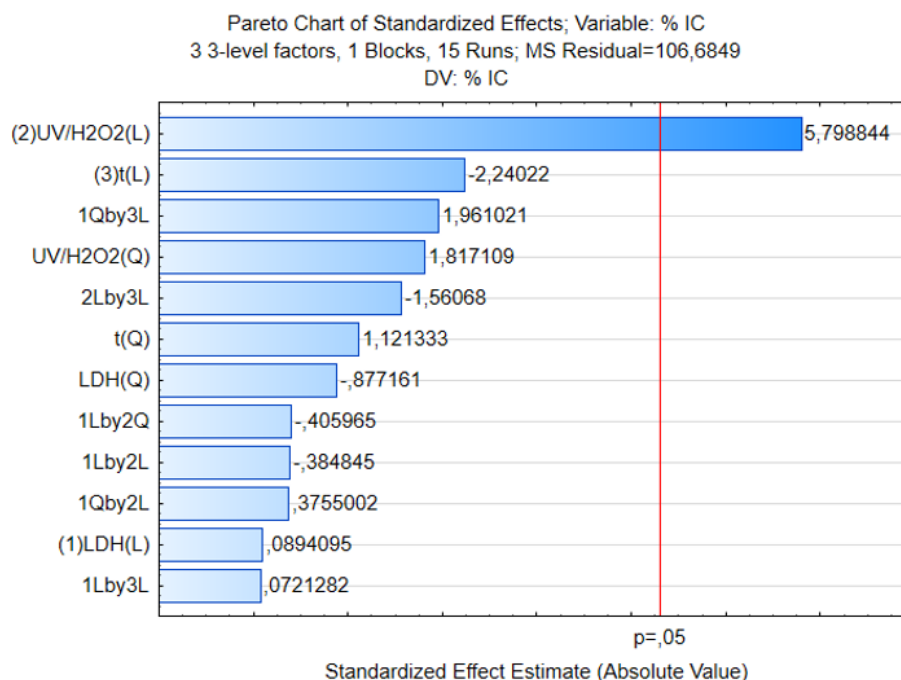


Figura 4-17 Diagrama de Pareto para efecto estandarizado - IC

Al igual que con la turbidez y el carbono orgánico total, el diagrama de Pareto funciona de la misma forma. En este caso los resultados son muy parecidos al caso del TOC, donde el factor que más influye en la variable de respuesta es la interacción lineal UV/H_2O_2 (L), con un efecto estandarizado muy superior al umbral (5,80), lo que indica que la proporción de radiación UV con peróxido de hidrógeno aplicada tiene un impacto directo y significativo en la eliminación del carbono inorgánico. Este resultado destaca la importancia de una dosificación adecuada de este agente oxidante en el tratamiento.

El resto de las variables y combinaciones mostradas en el gráfico no cruzan la línea de significancia, por lo tanto, su efecto sobre la eliminación de carbono inorgánico es estadísticamente no significativo dentro del diseño experimental considerado.

El análisis confirma que la proporción de UV/H_2O_2 es el factor más determinante en la eliminación de carbono inorgánico en el agua residual, seguido por el tiempo de tratamiento. Las demás variables y combinaciones estudiadas tienen un efecto secundario o nulo en comparación, lo que orienta hacia la necesidad de optimizar principalmente estos dos parámetros para mejorar la eficiencia del proceso.

A continuación, se muestran gráficas (Figura 4-18, Figura 4-19 y Figura 4-20) donde se representan los porcentajes de eliminación del IC en función de la combinación de la radiación UV y la proporción de peróxido de hidrógeno y el HDL con tiempos establecidos de 30, 105 y 180 minutos.

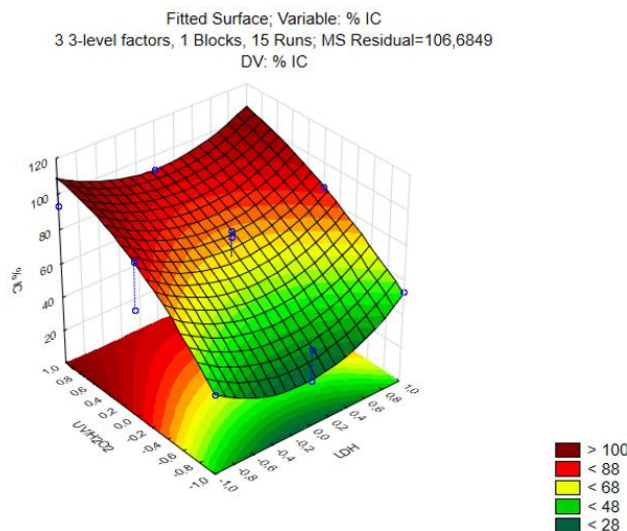


Figura 4-18 IC – HDL vs UV/H2O2 a tiempo -1 (30 min)

La gráfica (Figura 4-18) representa cómo varía el porcentaje de reducción de carbono inorgánico (% IC) en función de la concentración de HDL y la proporción UV/ H_2O_2 manteniéndose constante el tiempo de tratamiento en 30 minutos. Al igual que las gráficas anteriormente analizadas el rango de valores va de 1 (7,5 mg/ml HDL y 10% H_2O_2) a -1 (2,5 mg/ml HDL y 0% H_2O_2).

En este caso se observa que al igual que con el TOC, la reducción del carbono inorgánico depende en su mayoría del factor UV/ H_2O_2 . Cabe destacar que en los valores extremos sobrepasan la eliminación de 100%, por lo que se asume que se produce una eliminación total del carbono inorgánico. También es destacable la interacción con los valores medios de HDL, donde se reduce la eficiencia en la eliminación del IC.

Por tanto, se confirma que al igual que con el TOC para lograr una reducción óptima del IC hay que desarrollar un sistema donde los valores de la radiación UV y la proporción de peróxido de hidrógeno deben ser elevados.

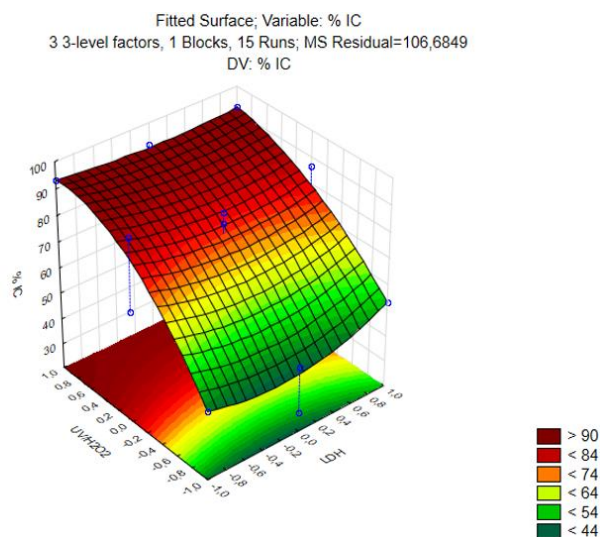


Figura 4-19 IC – HDL vs UV/H2O2 a tiempo 0 (105 min)

En esta gráfica (Figura 4-19) el tiempo es de 105 minutos, y se puede observar una eliminación más estable para los valores más elevados de UV/ H_2O_2 . Se demuestra otra vez la poca dependencia en la eliminación de carbono inorgánico de la hidrotalcita y el tiempo, siendo factores que quedan en segundo plano.

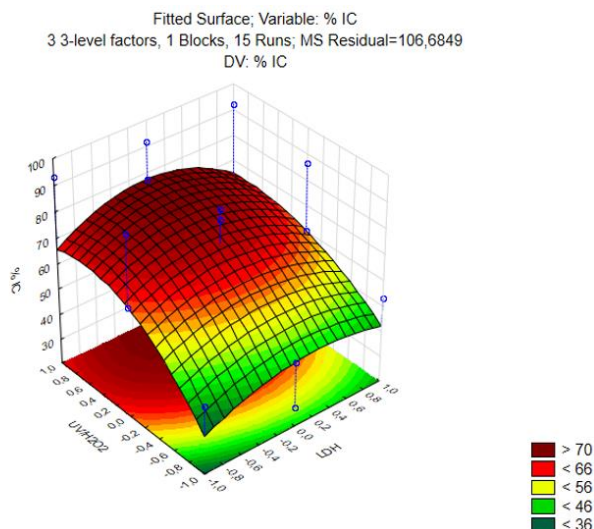


Figura 4-20 IC – HDL vs UV/H₂O₂ a tiempo 1 (180 min)

En la última gráfica (Figura 4-20) donde se analiza la eliminación de IC, ocurre de manera similar al caso del TOC, donde a mayor tiempo la eficacia en la reducción de carbono inorgánico se ve reducida.

También los máximos de eliminación son menores rondando una eliminación entre el 70% y el 80%, siendo en casos anteriores cercanas al 95%. También en este caso los mejores resultados se dan en los valores intermedios de HDL, pero el factor más influyente sigue siendo la proporción de peróxido hidrógeno con radiación UV.

En las siguientes gráficas (Figura 4-21) representa el porcentaje de eliminación de carbono inorgánico (IC) en función de dos variables: la concentración de HDL y el tiempo de exposición, manteniéndose constante la condición de 0 % de UV/H₂O₂ (no hay peróxido de hidrógeno pero si exposición a la lámpara UV).

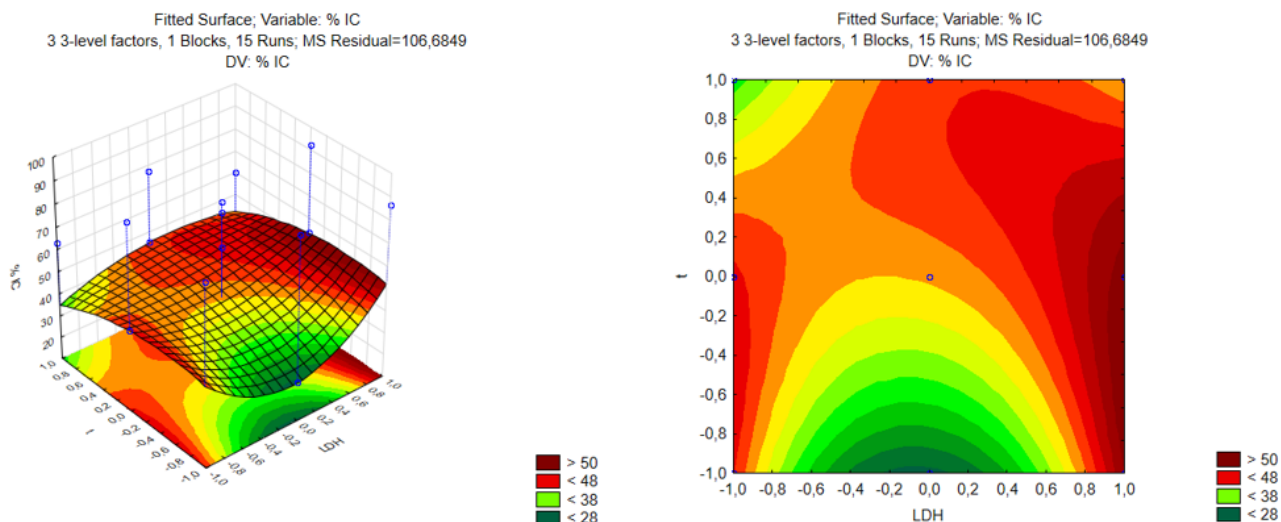


Figura 4-21 IC – HDL vs t a 0% UV/H₂O₂

Las gráficas presentadas muestran el comportamiento del porcentaje de eliminación de carbono inorgánico (% IC) en función de las variables concentración de HDL y tiempo de tratamiento, manteniendo constante la condición de 0 % de UV/H₂O₂, es decir, sin la aplicación de peróxido.

En ambos casos se observa que los valores más bajos de eliminación, inferiores al 28 %, se concentran en la zona central de la superficie, lo que corresponde a niveles intermedios de ambas

variables. Por el contrario, las zonas de mayor eficiencia (superiores al 50 %) aparecen en los extremos de los planos, especialmente cuando tanto el HDL como el tiempo se encuentran en niveles altos o bajos.

Este comportamiento sugiere una respuesta no lineal del sistema, donde las condiciones intermedias no favorecen una eliminación efectiva del carbono inorgánico. A pesar de que es posible obtener valores más altos de remoción en condiciones extremas, el rendimiento general del sistema bajo estas circunstancias sigue siendo limitado.

La ausencia de peróxido de hidrógeno se hace evidente en los resultados, ya que ni la hidrotalcita ni el tiempo por sí solos logran inducir una eliminación significativa del IC. Esto pone en manifiesto que, en este tipo de tratamiento, los procesos de oxidación avanzada son cruciales para alcanzar eficiencias superiores.

En resumen, se concluye que el tratamiento combinado únicamente con HDL y tiempo no es suficiente para lograr una alta eliminación de carbono inorgánico. Por tanto, resulta necesario incorporar agentes oxidantes como el peróxido de hidrógeno activado por radiación UV para mejorar la eficacia del proceso.

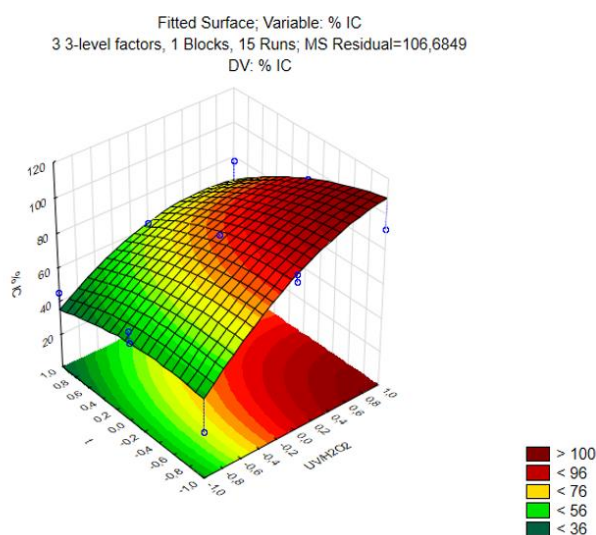


Figura 4-22 IC - UV/H₂O₂ vs t a HDL constante (2,5 mg/ml)

En la presente gráfica (Figura 4-22) donde la dosis de HDL se mantiene constante, permitiendo observar con claridad el impacto de la radiación UV con peróxido de hidrógeno. Se observa que los valores más altos de eliminación de IC se alcanzan cuando la proporción de UV/H₂O₂ es elevada y el tiempo de exposición es corto ($t = -1$). Esto indica que una dosis alta del agente oxidante permite alcanzar altos niveles de remoción en un período reducido, lo cual representa una ventaja operativa en términos de eficiencia y tiempo.

En cambio, cuando el tiempo de exposición aumenta, incluso manteniendo una dosis alta de peróxido, se aprecia una disminución en la eficiencia del proceso. Asimismo, en las zonas donde ambos factores se encuentran en niveles bajos, la eliminación de IC es mínima, con porcentajes inferiores al 36 %.

Este comportamiento evidencia que el efecto del UV/H₂O₂ es más determinante que el tiempo, y que no necesariamente un mayor tiempo de exposición se traduce en una mayor eficiencia. Por el contrario, una dosificación adecuada del oxidante permite obtener resultados óptimos en tiempos reducidos, lo que resulta favorable desde el punto de vista técnico y económico.

Continuando con el análisis de la reducción de IC, se comprueba si los resultados empíricos se corresponden a las predicciones calculadas por el programa, véase Figura 4-23.

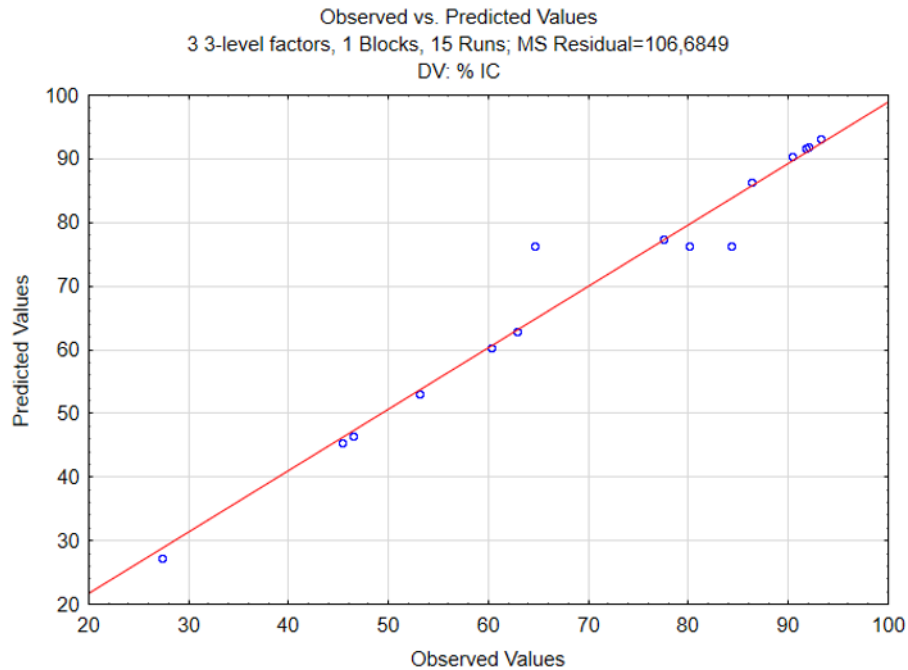


Figura 4-23 Predicción vs Resultados - IC

Como se ha analizado con anterioridad, la línea roja representa los valores predichos por el programa en función de todas las combinaciones posibles entre HDL, radiación UV con peróxido de hidrógeno y tiempo, considerando sus diferentes niveles. En contraste, los círculos azules corresponden a los datos experimentales obtenidos en el laboratorio. Cuanto más cercanos estén estos puntos a la línea roja, menor será el error de predicción, lo que indica un buen ajuste del modelo.

Este caso es muy parecido al anterior donde la mayoría de los puntos experimentales coinciden con la línea roja, salvo tres que se desvían ligeramente. Por lo que el modelo presenta un margen de error muy bajo, y que la capacidad del programa para simular el comportamiento real del sistema es altamente precisa y confiable.

En cuanto a los tres puntos que se alejan de la recta pertenecen a las réplicas, como ha sido mencionado anteriormente tienen valores diferentes y el programa calcula cierto error.

En esta ocasión también hay una fórmula que predice los resultados, teniendo en cuenta únicamente los valores de regresión con un valor de “p” menores a 0,05 de la siguiente Tabla 4-9. Las variables son las siguientes:

- A= % Eliminación IC
- X= HDL
- Y= UV/H₂O₂
- Z= tiempo

Fórmula:

$$A = 76,28 + 24,15y$$

De esta fórmula podemos averiguar cuál sería la combinación óptima para alcanzar el mayor porcentaje de eliminación de TOC, en este caso, haciendo el cambio de variable a su valor real, sería:

$$UV/H_2O_2 = 9,9 \% H_2O_2$$

Factor	Regr. Coefficients; Var.: % IC; R-sqr=,96431; Adj.,75015 (3 factor Box-Behnken design, 1 block , 15 runs)					
	Regressn	Std.Err.	t(2)	p	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	76,2800	5,963358	12,79145	0,006056	50,6217	101,9383
(1) LDH (L)	-1,6325	5,164419	-0,31611	0,781863	-23,8532	20,5882
LDH (Q)	4,7150	5,375298	0,87716	0,472909	-18,4130	27,8430
(2)UV/H2O2(L)	24,1500	5,164419	4,67623	0,042815	1,9293	46,3707
UV/H2O2(Q)	-9,7675	5,375298	-1,81711	0,210839	-32,8955	13,3605
(3) t (L)	0,9250	5,164419	0,17911	0,874354	-21,2957	23,1457
t (Q)	-6,0275	5,375298	-1,12133	0,378702	-29,1555	17,1005
1L by 2L	-1,9875	5,164419	-0,38484	0,737422	-24,2082	20,2332
1L by 2Q	2,9650	7,303592	0,40596	0,724083	-28,4598	34,3898
1Q by 2L	-2,7425	7,303592	-0,37550	0,743373	-34,1673	28,6823
1L by 3L	0,3725	5,164419	0,07213	0,949064	-21,8482	22,5932
1Q by 3L	-14,3225	7,303592	-1,96102	0,188913	-45,7473	17,1023
2L by 3L	-8,0600	5,164419	-1,56068	0,258977	-30,2807	14,1607

Tabla 4-9 Datos para la ecuación generadora de resultados - IC

4.3.4 Análisis del nitrógeno

Se representa el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, el cual permite identificar si las diferentes combinaciones de variables como el tiempo de tratamiento, la concentración de HDL y la proporción de peróxido de hidrógeno aplicado mediante radiación UV, tienen un impacto significativo en la reducción de nutrientes presentes en el agua residual, específicamente en la eliminación de nitrógeno, así como la magnitud relativa de su influencia en el proceso.

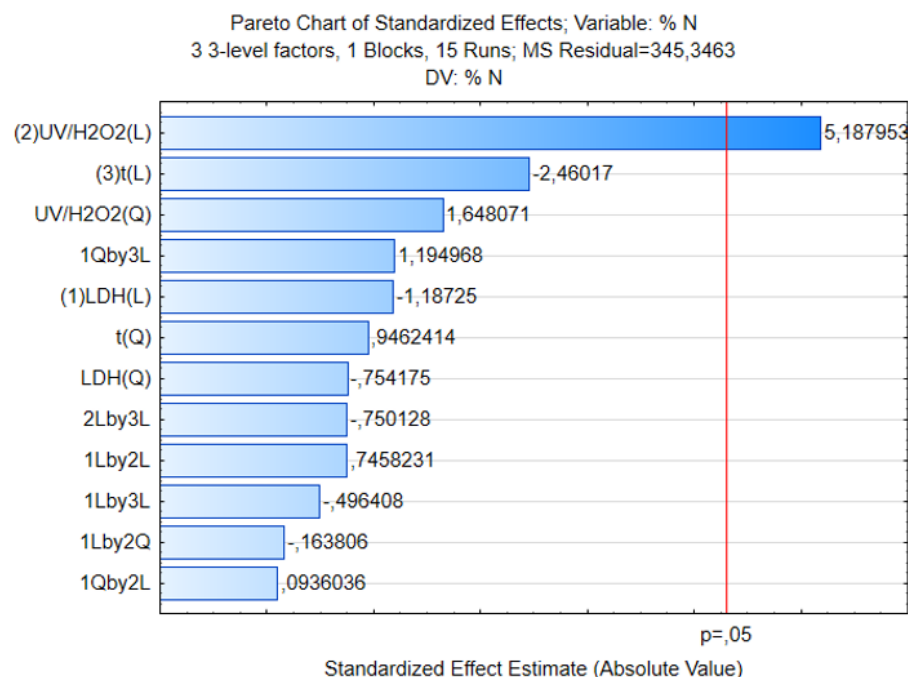


Figura 4-24 Diagrama de Pareto para efecto estandarizado - N

En el diagrama de Pareto (Figura 4-24) como se ha explicado con anterioridad, para que el valor sea significativo tiene que estar a la derecha de la línea roja, que depende del valor $p=0,05$. En este caso el valor más significativo se trata del valor lineal de la radiación UV con cierto porcentaje de H_2O_2 . El resto de los valores se alejan bastante de la línea roja, siendo el siguiente más significativo el valor lineal del tiempo de exposición, que en este caso afecta de manera negativa (-2,46).

Este resultado indica que la aplicación de este sistema de oxidación avanzada es altamente efectiva para remover nitrógeno, por lo que su presencia en el proceso es clave para maximizar la eficiencia del

tratamiento. Por otro lado, el tiempo de tratamiento (t) presenta un efecto negativo significativo en su nivel lineal. Esto sugiere que, en las condiciones evaluadas, un aumento en el tiempo no necesariamente mejora la eliminación de nitrógeno; de hecho, podría disminuirla. Por lo que se recomienda optimizar el tiempo de exposición para evitar efectos contraproducentes.

El resto de los factores y combinaciones evaluadas no presentan efectos estadísticamente significativos sobre la eliminación de N. Si bien algunos muestran cierta influencia, su impacto no supera el umbral de significancia, por lo que no se consideran determinantes dentro de las condiciones experimentales estudiadas.

En resumen, para mejorar la eficiencia del proceso de eliminación de nitrógeno en aguas residuales, se recomienda priorizar y ajustar adecuadamente el sistema UV/H_2O_2 , y controlar cuidadosamente el tiempo de tratamiento, evitando incrementos innecesarios que podrían afectar negativamente el rendimiento.

En las siguientes gráficas (Figura 4-25, Figura 4-26 y Figura 4-27) se representan los porcentajes de eliminación de nitrógeno en función de la combinación de la radiación UV y la proporción de peróxido de hidrógeno (UV/H_2O_2) y el HDL con tiempos establecidos de 30, 105 y 180 minutos.

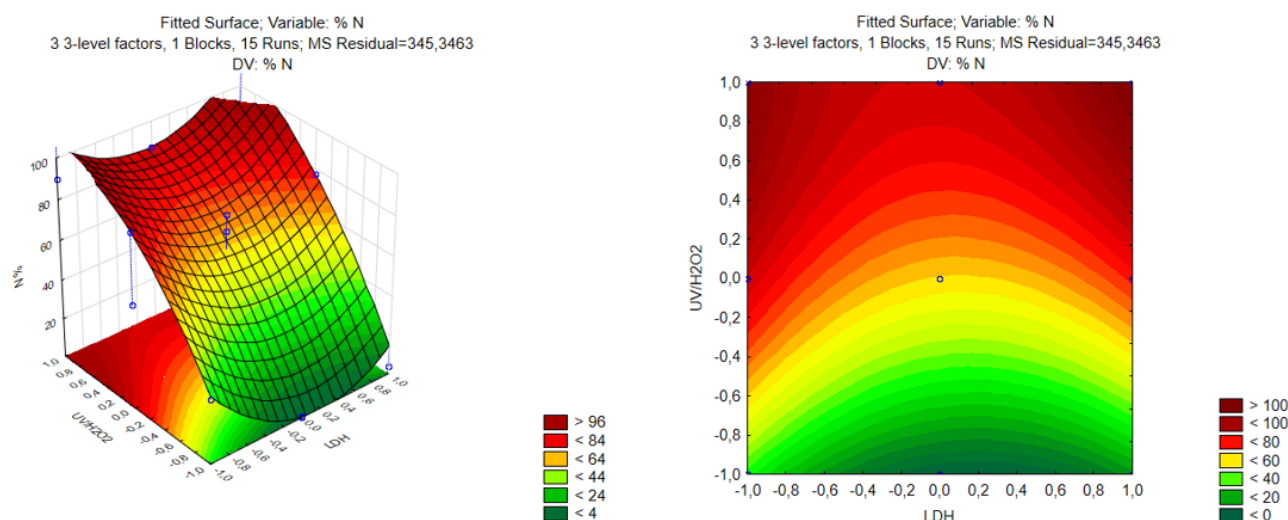


Figura 4-25 N – HDL vs UV/H2O2 a tiempo -1 (30 min)

Respecto a las gráficas (Figura 4-25) a tiempo -1 (t=30 minutos) ocurre como los anteriores parámetros analizados, donde la mayor influencia depende del UV/H_2O_2 , siempre que tiene valores elevados, cercanos a 1 (10% peróxido de hidrógeno) la eliminación es cercana al 100% independientemente de la hidrotalcita. Hay cierta interacción con los niveles medios de HDL, ya que se da un peor rendimiento.

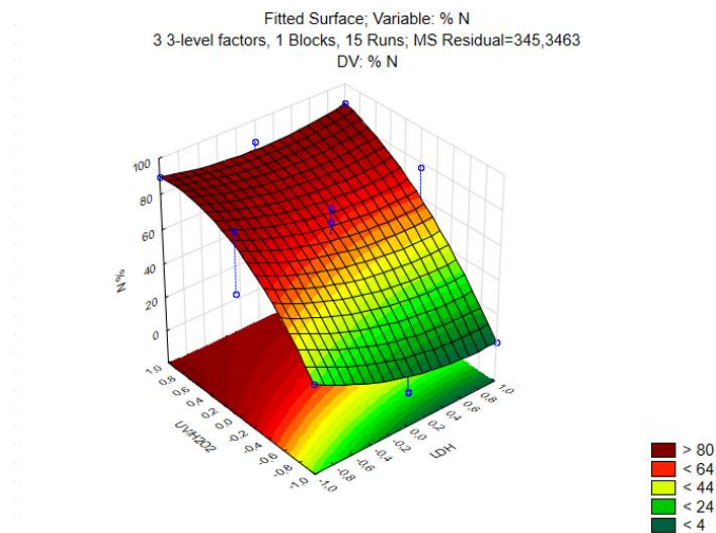


Figura 4-26 N – HDL vs UV/H2O2 a tiempo 0 (105 min)

Al igual que en el caso anterior, cuando el tiempo es de 105 minutos, como se puede observar en la gráfica (Figura 4-26) el mejor rendimiento de eliminación de N se da para los valores más elevados de radiación UV con peróxido de hidrógeno, en este caso, la eliminación es más estable y sufre menos variación con las proporciones de HDL empleadas.

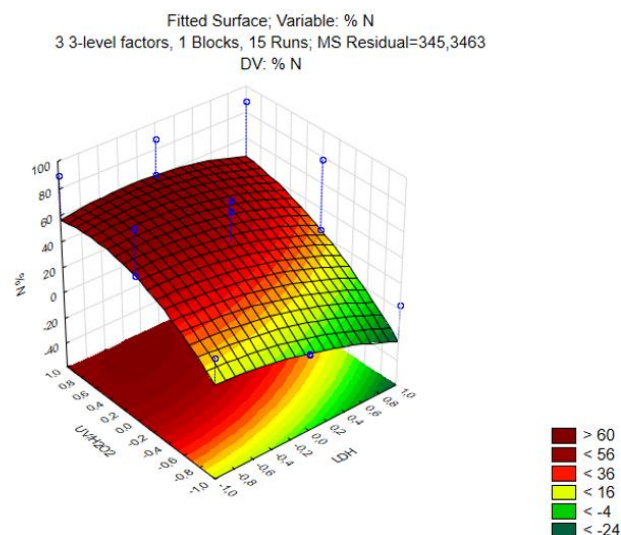


Figura 4-27 N – HDL vs UV/H2O2 a tiempo 1 (180 min)

En esta gráfica (Figura 4-27) a tiempo 180 minutos, como en los casos de eliminación de carbono orgánico total y de carbono inorgánico, se muestra como a pesar de estar expuestos a mayores tiempos el rendimiento disminuye. En este caso pasa de valores de alrededor del 90% de eliminación, a valores del 60%. Una reducción del rendimiento drástica.

Son resultados que una vez más ponen en evidencia que el efecto del sistema UV/H2O2 tiene un impacto más significativo que el tiempo de exposición y la hidrotalcita en la eliminación de nitrógeno. Además, demuestra que prolongar el tiempo de tratamiento no garantiza una mayor eficiencia. Por el

contrario, una dosificación adecuada del oxidante permite alcanzar altos niveles de eliminación en periodos más cortos, lo cual representa una ventaja tanto en términos técnicos como económicos.

Seguidamente se estudiará como afectan los experimentos en los que se les aplica los valores más bajos de HDL y de proporción de H_2O_2 en la radiación UV.

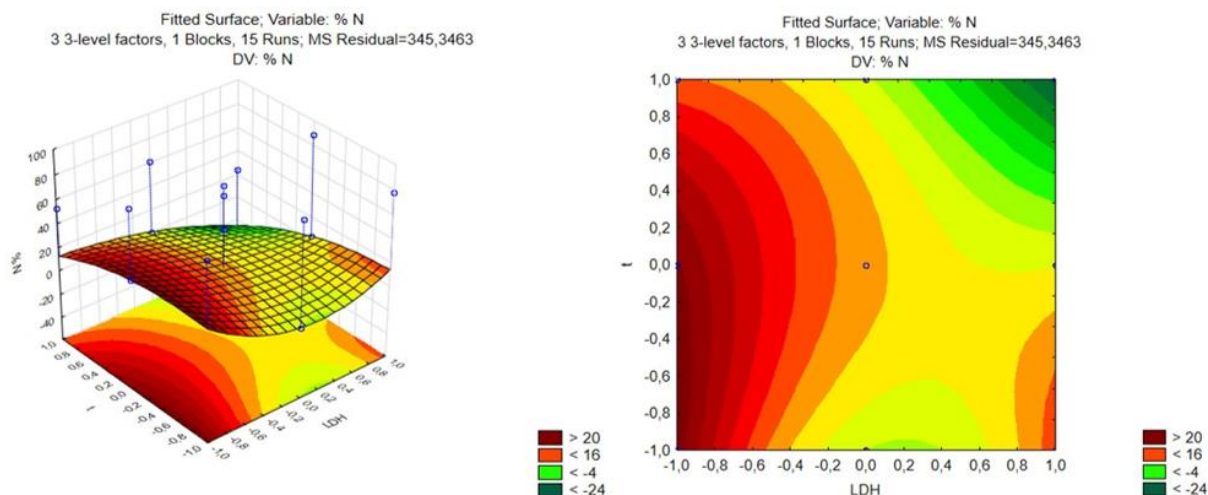


Figura 4-28 N – HDL vs t a 0% UV/H2O2

En las presentes gráficas (Figura 4-28) como en las anteriores se muestra en rojo las zonas donde se ha producido una mayor eliminación de N y en verde donde ha sido menor esa reducción, sin embargo, en este caso cabe mencionar que la mayor eliminación producida apenas alcanza el 20%, por lo que las variables de HDL y de tiempo tienen un efecto mínimo en la reducción de nitrógeno en el agua residual. La mayor eliminación se produce con los valores más bajos de HDL y en el menor tiempo (2,5 mg/ml y 30 min).

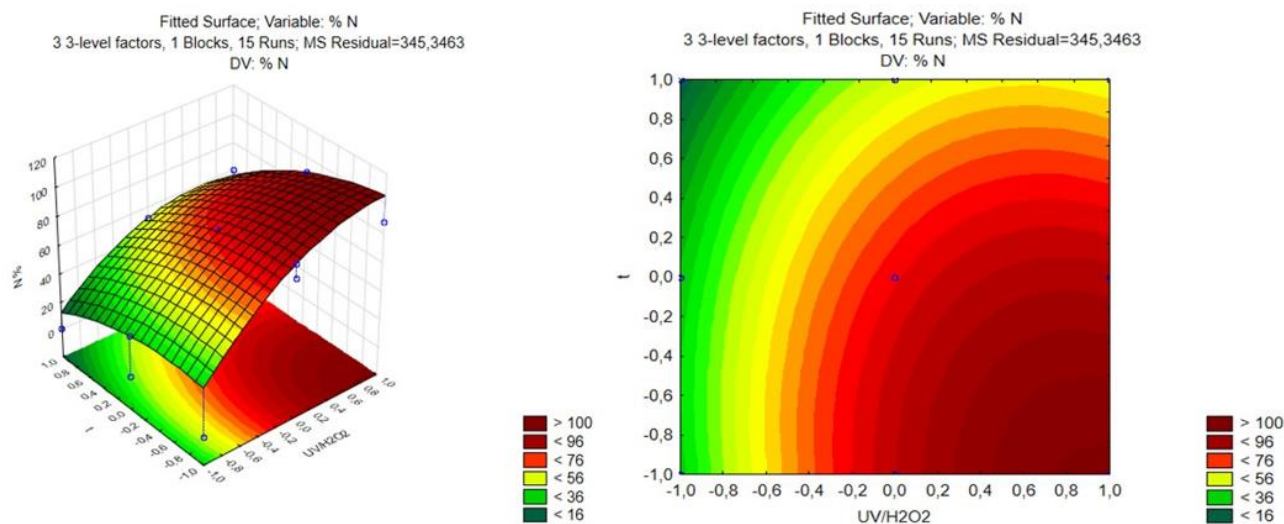


Figura 4-29 N - UV/H2O2 vs t a HDL constante

En esta última gráfica (Figura 4-29) donde se mantiene constante la hidrotalcita empleada en un valor más bajo (2,5 mg/ml) se observa como las zonas rojas de mayor eliminación de nitrógeno se producen con los valores más elevados de radiación UV con peróxido de hidrógeno (10% H_2O_2), llegando a producir niveles cercanos al 100%. También es destacable como influye el tiempo, donde las mayores tasas de eliminación son en los tiempos más bajos ($t=-1$, 30 minutos), quedando demostrado

una vez más como aumentar los tiempos de experimento no lleva a mejores resultados de experimentos, sino a que se reduzca esta eficiencia.

En conclusión el factor que más influye en la eliminación del N es el UV/H_2O_2 , en los sistemas de tratamientos de aguas residuales hay que encontrar el equilibrio entre tiempos cortos y proporciones altas de H_2O_2 .

A continuación se comprueba si los resultados empíricos coinciden con las predicciones realizadas por el programa, en la siguiente Figura 4-30.

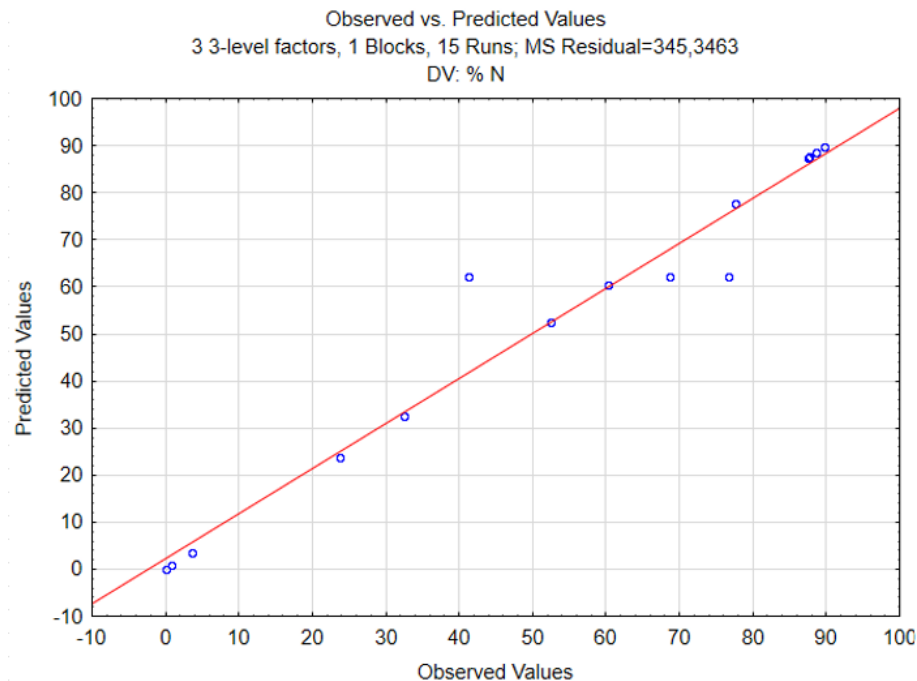


Figura 4-30 Predicción vs Resultados - N

Como también ocurría en los casos anteriores, esta gráfica indica si el modelo está bien ajustado y que el error cometido a la hora de la realización de los experimentos sea bajo. Los puntos azules están prácticamente todos sobre la línea roja exceptuando los tres que están desplazados, por lo que se puede afirmar que el error cometido es mínimo y que la predicción de los resultados realizados por el programa corresponde de manera bastante precisa a la realidad.

Como en los anteriores dos casos los puntos que se alejan de la recta son las réplicas ya mencionadas.

Para poder obtener los resultados predichos, se aplica una fórmula que considera únicamente los valores de regresión cuyo valor de p es inferior a 0,05 (es decir, aquellos destacados en rojo en la Tabla 4-). Las variables son las siguientes:

- A= % Eliminación N
- X= HDL
- Y= UV/H_2O_2
- Z= tiempo

Fórmula:

$$A = 62,24 + 36,75y$$

De esta fórmula podemos averiguar cuál sería la combinación óptima para alcanzar el mayor porcentaje de eliminación de TOC, en este caso, haciendo el cambio de variable a su valor real, sería:

$$UV/H_2O_2 = 10,2 \% H_2O_2$$

Factor	Regr. Coefficients; Var.: % N; R-sqr=,95641; Adj:,69488 (3 factor Box-Behnken design, 1 block , 15 runs) DV: % N					
	Regressn	Std.Err.	t (2)	p	-95,%	+95,%
Mean/Interc.	62,2400	10,72919	5,80100	0,028454	16,0760	108,4040
(1) LDH (L)	-9,6575	9,29175	-1,03936	0,407794	-49,6367	30,3217
LDH (Q)	7,2938	9,67116	0,75418	0,529447	-34,3179	48,9054
(2) UV/H ₂ O ₂ (L)	36,7500	9,29175	3,95512	0,048384	-3,2292	76,7292
UV/H ₂ O ₂ (Q)	-15,9388	9,67116	-1,64807	0,241103	-57,5504	25,6729
(3) t (L)	-6,5700	9,29175	-0,70708	0,552800	-46,5492	33,4092
t (Q)	-9,1513	9,67116	-0,94624	0,443904	-50,7629	32,4604
1L by 2L	6,9300	9,29175	0,74582	0,533519	-33,0492	46,9092
1L by 2Q	2,1525	13,14052	0,16381	0,884941	-54,3866	58,6916
1Q by 2L	-1,2300	13,14052	-0,09360	0,933957	-57,7691	55,3091
1L by 3L	-4,6125	9,29175	-0,49641	0,668798	-44,5917	35,3667
1Q by 3L	-15,7025	13,14052	-1,19497	0,354585	-72,2416	40,8366
2L by 3L	-6,9700	9,29175	-0,75013	0,531416	-46,9492	33,0092

Tabla 4-10 Datos para la ecuación generadora de resultados - N

4.3.5 Análisis del fósforo

En el presente proyecto, a la hora de realizar el estudio del fósforo nos daban resultados fuera de rango, por lo que concluimos que el aplicar peróxido de hidrógeno afecta al análisis de las muestras. Se estudió el efecto en los experimentos donde no se aplica H_2O_2 , recogido en la siguiente Tabla 4-11:

EXPERIMENTO		FÓSFORO (mg/l)
1	2,5 mg/ml HDL, 0% H_2O_2 y 105 min UV	0,0
2	7,5 mg/ml HDL, 0% H_2O_2 y 105 min UV	0,0
9	5 mg/ml, 0% H_2O_2 y 30 min UV	0,0
11	5 mg/ml, 0% H_2O_2 y 180 min UV	0,0

Tabla 4-11 Resultados del fósforo

En todos estos experimentos donde no se aplica peróxido se observa que el fósforo se reduce en su totalidad. El valor mínimo de hidrotalcita aplicada nos indica que en el resto de los experimentos a pesar de utilizar H_2O_2 también supondría una eliminación total del fósforo.

En conclusión, la hidrotalcita en su valor mínimo (2,5 mg/l) es un óptimo adsorbente de fósforo.

4.3.6 Propuesta de tratamiento óptimo y discusión global de resultados

Tras analizar los resultados obtenidos en los diferentes experimentos realizados con hidrotalcita, radiación UV y peróxido de hidrógeno, se puede observar que el tratamiento combinado ha demostrado una mejora significativa en la eliminación de los principales contaminantes presentes en las aguas residuales de buques: nitrógeno total, turbidez, carbono orgánico total e inorgánico total.

Los mejores resultados de eliminación se obtuvieron en condiciones específicas de tiempo de exposición a UV, concentración de peróxido de hidrógeno y dosis de hidrotalcita, siendo especialmente eficaces las combinaciones en las que se utilizó tiempos de no excesivamente largos, concentraciones intermedias de HDL y elevado porcentaje de UV/ H_2O_2 .

Por lo que, en función de los datos, un posible tratamiento sería donde se aplique lo siguiente:

- Tiempo: 70 minutos (tiempo entre 30 y 105 minutos)
- HDL: 5 mg/ml (concentraciones intermedias)
- H_2O_2 : 10%
- Radiación UV: Sí

Este tratamiento cumpliría con los límites establecidos en la Resolución MEPC.227 (64) ya que:

- Nitrógeno: reducción >70% (véase Figura 4-31)
- DQO: se mantendría por debajo 125 mg/l, los experimentos donde se aplica 10% UV/ H_2O_2 tienen valores de DQO comprendidos entre 15 y 50 mg O_2 /l.
- Fósforo (experimentos sin peróxido de hidrógeno): su eliminación es del 100%. No se esperan valores superiores al emplear H_2O_2 .

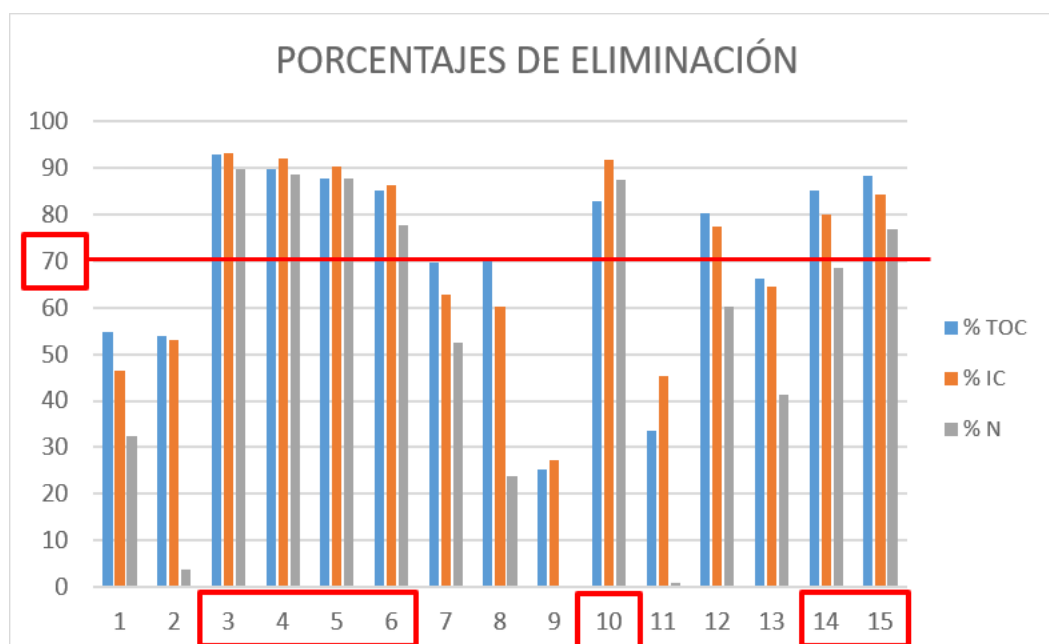


Figura 4-31 Porcentajes de eliminación en los 15 experimentos realizados según el diseño Box-Behnken

4.3.7 Viabilidad de implementación en la Armada

La viabilidad de incorporar un sistema de postratamiento basado en radiación UV, peróxido de hidrógeno e hidrotalcita en las plantas de tratamiento de aguas residuales de los buques de la Armada se evalúa desde tres dimensiones fundamentales: técnica, operativa y económica.

Desde el punto de vista técnico, los tres componentes del sistema propuesto han sido ampliamente utilizados de forma individual en el tratamiento de aguas residuales, tanto a nivel industrial como urbano. La radiación ultravioleta es ya una tecnología empleada en buques de la Armada (A-62 “Cartagena”). La hidrotalcita, debido a su capacidad de regeneración mediante el efecto memoria la convierte en un material reutilizable y adecuado para entornos donde el abastecimiento de consumibles puede estar limitado, como es el caso de un buque durante navegación prolongada.

Desde el punto de vista operativo, las plantas TAR de los buques de la Armada actualmente basan su funcionamiento en procesos fisicoquímicos tradicionales. La introducción del nuevo tratamiento podría realizarse como una etapa terciaria complementaria, sin necesidad de modificar la infraestructura principal. El sistema propuesto puede integrarse aguas abajo del tratamiento primario y secundario, antes del vertido final. El mantenimiento de lámparas UV es sencillo y la dosificación de peróxido puede automatizarse con equipos dosificadores compactos. Incluso podría ser viable utilizar el propio tanque de desinfección ya existente en los buques, y para la dosificación de H_2O_2 se emplearían las bombas que

dosifican hipoclorito La manipulación de hidrotalcita podría realizarse de forma segura si se emplean cartuchos o lechos adsorbentes intercambiables, o bien sistemas de regeneración a bordo en caso de que se opte por un sistema cerrado.

Económicamente la implementación inicial conllevaría una inversión en equipamiento (reactores UV, sistemas de dosificación y preparación de hidrotalcita) aunque se podría estudiar el emplear los tanques y bombas de dosificación ya existentes, los costes operativos serían relativamente bajos. La energía necesaria para UV puede ser asumida por el sistema eléctrico del buque, y el consumo de peróxido de hidrógeno es bajo si se aplica en concentraciones diluidas (5-10%). El uso de materiales desarrollados internamente en laboratorio también podría suponer un ahorro frente a soluciones comerciales. Además, hay ciertos buques de la Armada que ya cuentan con equipos de radiación UV, lo que supondría una menor inversión inicial. Por otro lado, uno de los retos que existen actualmente es el empleo de HDL, ya que actualmente no se puede obtener de manera comercial, y su desarrollo en laboratorios sería lento y poco viable.

La implementación del sistema propuesto sustituyendo a los sistemas actuales de hipoclorito es técnicamente viable, operativamente compatible con las TAR actuales y económicamente asumible, especialmente si se enfoca como una solución modular adaptable a diferentes tipos de buques. Se comenzaría con la implementación de los tratamientos de radiación UV con peróxido de hidrógeno, y en un futuro para reforzar la eliminación de contaminantes aplicar HDL. Este tratamiento permite mejorar la calidad del efluente, alcanzar los estándares del convenio MARPOL y reforzar el compromiso ambiental de la Armada, alineándose con sus políticas de sostenibilidad operativa.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Este trabajo aborda el problema de la contaminación marina causada por las aguas residuales generadas a bordo de buques, proponiendo una alternativa de postratamiento innovadora que combina tecnologías avanzadas de oxidación y adsorción. A través del diseño, implementación y análisis de un sistema basado en la aplicación conjunta de radiación ultravioleta (UV), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) e hidrotalcita sintetizada en laboratorio, se ha evaluado su eficiencia en la eliminación de diversos contaminantes presentes en aguas residuales provenientes de la fragata F-102 “Almirante Juan de Borbón”.

Los resultados experimentales han demostrado que esta combinación de técnicas puede mejorar sustancialmente la calidad del efluente tratado. En concreto:

- La radiación UV en combinación con H_2O_2 ha potenciado los procesos de oxidación avanzada, favoreciendo la degradación de compuestos orgánicos difíciles de eliminar por métodos convencionales, detergentes o restos biológicos. Se observó una notable reducción del carbono orgánico total (TOC), parámetro clave para evaluar la materia orgánica disuelta.
- La hidrotalcita actuó con eficacia como adsorbente, especialmente en la reducción de nutrientes como el fósforo, que son responsables del fenómeno de eutrofización.
- El uso del diseño experimental tipo Box-Behnken permitió optimizar las condiciones operativas (tiempo de tratamiento, exposición a radiación UV con cierta concentración de H_2O_2 , cantidad de HDL), proporcionando una herramienta estadística robusta para modelar el sistema y prever su comportamiento.
- A lo largo de los experimentos realizados, se observó que tiempos de exposición más prolongados, especialmente en los tratamientos que combinaban radiación UV con peróxido de hidrógeno, permitieron una mayor eliminación de la materia orgánica. Sin embargo, también se evidenció un punto de saturación, donde la eliminación de contaminantes se estabiliza, lo que sugiere que existe un umbral óptimo de tiempo más allá del cual el tratamiento pierde eficiencia en términos de coste-beneficio. En el caso del empleo de hidrotalcita, el tiempo influye principalmente en la capacidad de adsorción y en la interacción con el fósforo. Al igual que en los procesos de oxidación avanzada, no necesariamente mayores tiempos implican mejores resultados una vez alcanzado el equilibrio. Por tanto, se concluye que para diseñar un sistema de tratamientos adecuados no solo hay que optimizar las cantidades de agentes empleadas sino también el tiempo de exposición, favoreciendo los tiempos cortos a un ahorro energético y de costos.

- El análisis de los datos experimentales ha permitido identificar unos valores óptimos de optimización. Los mejores resultados en la eliminación de turbidez, TOC, IC y nitrógeno se alcanzaron con tiempos de exposición relativamente cortos, una concentración intermedia de hidrotalcita y concentraciones elevadas de peróxido de hidrógeno, bajo el efecto de lámparas UV. Obteniendo los siguientes resultados:
 - % Eliminación de TOC > 90%.
 - % Eliminación de IC > 90%.
 - % Eliminación de N > 80%.
 - % Eliminación de P = 100% (casos donde no se aplicó H_2O_2).

Se podría hacer un sistema de tratamiento eficaz, compacto y viable para su posible implementación a bordo, con las siguientes características:

- Tiempos de tratamiento aproximado 1 hora.
- Concentraciones de 5,0 mg/ml de HDL.
- 10% H_2O_2 .
- Radiación UV: sí

Desde un punto de vista técnico, la metodología desarrollada puede integrarse como una mejora en las actuales plantas de tratamiento de aguas residuales a bordo, contribuyendo a reforzar el compromiso ambiental de la Armada, incluso cuando sus buques están exentos del cumplimiento obligatorio del Convenio MARPOL.

Desde el punto de vista científico, el trabajo aporta conocimiento adicional sobre el comportamiento sinérgico entre procesos de oxidación avanzada y materiales, abriendo nuevas posibilidades de aplicación más allá del ámbito naval, como en el tratamiento de aguas industriales o urbanas en condiciones complejas.

En conjunto, este proyecto pone de manifiesto la importancia de seguir explorando soluciones innovadoras para la depuración de aguas en contextos estratégicos como el marítimo, donde el impacto ambiental es especialmente sensible y donde cada avance técnico puede traducirse en beneficios significativos para el medioambiente.

5.2 Líneas futuras

A raíz de los resultados obtenidos y del análisis realizado en este proyecto, se abren múltiples posibilidades para continuar investigando y desarrollando este campo de investigación. El sistema propuesto ha demostrado ser prometedor, pero su validación a mayor escala y en condiciones reales de operación plantea nuevos retos que deben ser abordados para una implementación efectiva en buques de la Armada u otros entornos similares.

- Aplicación en planta piloto o entorno real: evaluar el comportamiento del sistema en un entorno controlado a bordo de un buque, permitiendo observar cómo influyen variables reales como salinidad, presión, temperatura o cargas variables de contaminantes. Para así estudiar la viabilidad de aplicar estos tratamientos en el entorno naval, donde las limitaciones de espacio, energía y mantenimiento requieren soluciones compactas, eficientes y sostenibles
- Evaluación del efecto sobre microorganismos patógenos: estudiar en detalle la eficacia del sistema combinado (UV + H_2O_2 + hidrotalcita) en la eliminación de bacterias, virus y otros patógenos presentes en aguas residuales. Cuantificar su efecto sobre coliformes fecales, *E. coli* y otros indicadores microbiológicos relevantes. Este análisis permitiría validar el sistema no solo desde un enfoque químico, sino también sanitario.

- Mejora en la fase experimental:
 - Aislamiento del efecto individual de cada variable: realizar ensayos experimentales específicos que analicen por separado el efecto de la radiación UV sin la presencia de peróxido de hidrógeno, así como el de la hidrotalcita actuando de forma independiente. Esto permitiría cuantificar con mayor exactitud el aporte individual de cada técnica en la eliminación de contaminantes y validar posibles sinergias en el tratamiento combinado. Esta mejora en el diseño experimental proporcionaría datos más robustos para futuras optimizaciones del sistema.
 - Optimización del diseño experimental añadiendo valores mínimos igual a cero: diseño experimental utilizando un enfoque Box-Behnken modificado que contemple valores mínimos igual a 0 para ciertos factores (como la dosis de hidrotalcita, en este proyecto el valor mínimo era de 2,5 mg/l). Esto permitiría evaluar condiciones de control donde uno de los tratamientos no está presente, facilitando el análisis del efecto individual de cada variable, así como la identificación de posibles interacciones sinérgicas. Con esta modificación, se lograría una caracterización más completa del sistema.
 - Rango de aplicación de H_2O_2 : evaluar concentraciones superiores, ya que podrían incrementar significativamente la generación de radicales hidroxilos y, por tanto, la capacidad de oxidación del sistema UV/ H_2O_2 . Futuros experimentos deberían estudiar el comportamiento del sistema con soluciones al 15%, 20% e incluso superiores, analizando su efecto sobre la eliminación de TOC, nutrientes y otros contaminantes emergentes.
 - Lámparas de UV de mayores prestaciones: la lámpara empleada en este trabajo presentó una potencia limitada, lo cual puede haber condicionado el rendimiento de los procesos de oxidación avanzada. Sería recomendable explorar el uso de fuentes de radiación UV de mayor intensidad, con el objetivo de incrementar la eficiencia de fotólisis del peróxido de hidrógeno y la generación de especies reactivas. Permitiría reducir los tiempos de tratamiento o las dosis de reactivos necesarias.
 - Efectos en la eliminación de contaminantes emergentes: el sistema propuesto ha mostrado eficacia en la eliminación de contaminantes “clásicos” (nutrientes, TOC y de la turbidez), por lo que se podría estudiar su comportamiento frente a contaminantes emergentes, como fármacos, hormonas, productos de cuidado personal o microplásticos. Este tipo de compuestos representa un desafío creciente en el tratamiento de aguas residuales, y su eliminación requiere procesos avanzados de oxidación y adsorción.
- Integración en sistemas actuales de tratamiento naval: estudiar cómo incorporar esta tecnología en las actuales plantas TAR de los buques, teniendo en cuenta aspectos como consumo energético, espacio disponible, mantenimiento y operatividad.
- Automatización y control inteligente: explorar la aplicación de algoritmos de control y herramientas de inteligencia artificial para la monitorización continua y la optimización automática del proceso de tratamiento.
- Evaluación de sostenibilidad y costes: realizar estudios comparativos entre los sistemas convencionales y el propuesto, analizando parámetros como la huella de carbono, coste por metro cúbico tratado, consumo energético y vida útil de los materiales empleados.

6 BIBLIOGRAFÍA

- «National Ocean Service,» [En línea]. Available:
1] <https://oceanservice.noaa.gov/facts/oceanwater.html>. [Último acceso: 28 Enero 2025].
- O. Hoegh-Guldberg, P. J. Mumby, A. J. Hooten y R. S. Steneck, «Coral Reefs Under Rapid
2] Climate Change and Ocean Acidification,» *American Association for the Advancement of Science*, vol. 318, pp. 1737-1742, 2007.
- R. R. Robert J. Diaz, «Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems,»
3] *American Association for the Advancement of Science*, vol. 321, pp. 926-929, 2008.
- M. J. Behrenfeld, R. T. O'Malley, D. A. Siegel y C. R. McClain, «Climate-driven trends in
4] contemporary,» *nature*, vol. 444, pp. 752-755, 2006.
- C. R. J. Lisbeth Van Cauwenberghe, «Microplastics in bivalves cultured for human
5] consumption,» *ELSEVIER*, vol. 193, pp. 65-70, 2014.
- J. R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox y T. R. Siegler, «Plastic waste inputs from land into the
6] ocean,» *American Association for the Advancement of Science*, vol. 347, pp. 768-771, 2015.
- «UNOPS,» [En línea]. Available: <https://www.unops.org/es/news-and-stories/insights/to-clean-our-oceans-fight-land-pollution#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20marina%20y%20los%20pl%C3%A1sticos&text=La%20basura%20que%20se%20genera,que%20detengamos%20los%20vertidos%20marinos..> [Último acceso: 28 Enero 2025].
- Á. S. P. P.-C. Franchescoli D. Velázquez-Herrera, «Retención de contaminantes aromáticos
8] líquidos mediante hidrotalcitas, óxidos mixtos derivados e hidrotalcitas reconstruidas,» *Revista Internacional Contaminantes Ambientales*, vol. 38, pp. 1-10, 2020.
- H. Serrano, *Tratamiento combinado de adsorción y oxidación para la eliminación de
9] compuestos coloreados en aguas*, Marín: Universidad de Vigo, 2023.
- P. Mariño, *Dopaje de una hidrotalcita de Mg/Al con surfactantes aniónicos para el
10] tratamiento de aguas*, Marín: Universidad de Vigo, 2024.

- 11] D. Pérez, *Preparación de arcillas sintéticas para el tratamiento de aguas contaminadas*, Marín: Universidad de Vigo, 2021.
- 12] A. F. Celine Vaneekhaute, «Management of ship-generated food waste and sewage on the Baltic Sea;», *ELSEVIER*, vol. 102, nº 2020, p. 9, 22 Octubre 2019.
- 13] AQUA ESPAÑA, *AGUAS GRISES: ORIGEN, COMPOSICIÓN Y TECNOLOGÍAS PARA SU RECICLAJE*, Asociación Española de Empresas del Sector del Agua, 2018.
- 14] «Express Wastewater Solutions,» [En línea]. Available: <https://www.expresswastewater.com.au/wastewater-treatment/information/what-is-greywater-and-wastewater>. [Último acceso: 26 Febrero 2025].
- 15] «Waterandwastewater,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.waterandwastewater.com/blackwater-in-wastewater-treatment-understanding-the-challenges-and-solutions/>. [Último acceso: 26 Febrero 2025].
- 16] J. P. Cabral, «Water Microbiology. Bacterial Pathogens and Water,» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 7, p. 47, 210.
- 17] H. Muñoz, G. Mejía, M. Chaverra y E. Vázquez, «Una aproximación al estimativo la DBO y la DBQ de aguas residuales por medio de la medida del carbono orgánico total,» *Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquía*, nº 20, pp. 20-28, 2000.
- 18] «hach,» [En línea]. Available: <https://es.hach.com/parameters/toc>. [Último acceso: 17 Marzo 2025].
- 19] V. Smith, «Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem,» *Environmental Science and Pollution Research* , vol. 10, pp. 126-139, 2003.
- 20] M. Wilewska-Bien, L. Granhag, J.-P. Jalkanen, L. Johansson y K. Andersson, «Phosphorus flows on ships: Case study,» *Engineering for the maritime environment*, vol. 233, nº 2, p. 12, 2019.
- 21] H. Dai, H. Zhang, Y. S. H. N. Abassi, Z. Guo, L. Chen, Y. Chen, X. Wang y S. Zhang, «An integrated process for struvite recovery and nutrient removal from ship domestic sewage,» *Elsevier*, vol. 228, nº 2023, p. 10, 2022.
- 22] M. &. Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, McGraw-Hill Education, 2014.
- 23] Tchobanoglous, B. G. y F. L. &. S. H. D., *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, Metcalf & Eddy, Inc, 2003.
- 24] C. A. Miriam, S. d. C. Daynet, R. B. Omar y B.-A. Milton, «Presencia de productos farmacéuticos en el agua y su impacto en el ambiente,» *Revista Bionatura*, vol. 6, nº 1, p. 10, 2021.
- 25] H. Valdés, M. Sánchez-Polo y C. A. Zaror, «Impacto del tratamiento con ozono sobre las propiedades superficiales del carbón activado,» *Ingeniare - Revista Chilena de ingeniería*, vol. 19, nº 2, pp. 174-185, 2010.
- 26] O. M. Internacional, *Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques* (Convenio MARPOL), Londres, 1973.
- 27] O. M. Internacional, *Resolución MEPC.227(64): Directrices para la aprobación de sistemas de tratamiento de aguas residuales a bordo*, Londres, 2012.

- J. J. S. Juan Ramón Pidre, Guía sobre tratamientos de aguas urbanas para pequeños núcleos de población. Mejora de la calidad de los efluentes., Canarias: Daute Diseño, 2006.
- R. Rojas, «Conferencia Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales,» 2002.
- D. Prats, Los contaminantes emergentes en la reforma de la directiva de aguas residuales, Alicante: Universitat d'Alacant, 2023.
- J. Asensio, «La Inteligencia Artificial puede ayudarnos a eliminar contaminantes emergentes de las aguas depuradas,» *SER*, p. 1, 23 Noviembre 2024.
- S. Judd, *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*, ELSEVIER, 2011.
- C. Y. Teh, P. M. Budiman, K. P. Y. Shak y T. Y. Wu, «Recent Advancement of Coagulation–Flocculation and Its Application in Wastewater Treatment,» *ACS Publications*, pp. 4363-4389, 2016.
- J. E. D.-H. Laura Castro-Peña, «Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada,» *Tecnología en marcha*, vol. 27, nº 2, pp. 40-50, 2014.
- S. J. Valero, *TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES*, Zaragoza, Zaragoza: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, 2011, p. 133.
- S. Tuset, «Condorchem Enviro Solutions,» Condorchem, [En línea]. Available: <https://condorchem.com/es/blog/adsorcion-en-carbon-activado-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales/#:~:text=La%20aplicaciones%20de%20la%20operaci%C3%B3n,todos%20sus%20estados%20de%20oxidaci%C3%B3n>. [Último acceso: 1 Marzo 2025].
- M. Hezen, M. C. v. Loosdrecht y G. A. Ekama, *Biological Wastewater Treatment Principles, Modelling and Design*, Cambridge University Press, 2008.
- A. A. R. S. R. P. Sandra Crombet Grillet, «Evaluación del tratamiento anaeróbico de las aguas residuales en una comunidad universitaria,» *Revista Colombia Biotecnología*, vol. XVIII, nº 1, pp. 49-56, 2015.
- D. Gao, W. Zhang, H. Dong, Y. Yu, W. L. H. Luo, Z. Jing, B. Liang, L. Peng, B. Wu, T. Huang y H. Cheng, «Phosphorus removal from water by the layered double hydroxides (LDHs)-based adsorbents: A review for structure, mechanism, and current progress,» *ELSEVIER*, vol. 37, 2024.
- Carbajal, D. R. Martínez y G. G, «Hidróxidos dobles laminares: arcillas sintéticas con aplicaciones en nanotecnologías,» *Avances en Química*, vol. 7, nº 1, p. 14, 2012.
- O. Zarceño, *Síntesis de hidrotalcitas y materiales derivados aplicación en catálisis básica*, Madrid: Departamento de ingeniería química de la Universidad Complutense, 2005.
- G. Millán, *Eliminación de herbicidas y metales pesados en aguas mediante el uso de hidróxidos dobles laminares*, Córdoba: Servicio de publicaciones de la Universidad de Córdoba, 2016.

- B. González, *Aplicación de hidrotalcitas como adsorbentes para la reducción de la contaminación por plaguicidas de aguas y suelos*, Córdoba: Departamento de química inorgánica e ingeniería química de la Universidad de Córdoba, 2010.
- M. C. I. Karina, R. R. Viridiana y Á. B. Deyanira, «Síntesis de hidrotalcitas Cu/Al y su uso como catalizadores en la síntesis de triazoles,» *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, n° 2, 2016.
- J. R. Ruiz, A. P. Payares y E. M. Fuentes, «Síntesis y caracterización estructural de hidrotalcitas de Cu-Zn-Al,» *Revista Colombia Química*, vol. 45, n° 3, pp. 33-38, 2016.
- M. Tao, Z. Jing, Y. Shen, S. Cao y Y. Li, «Nitrogen and phosphorus removal in microbial fuel cell-constructed wetland integrated with layered double hydroxides coated filter for treating low carbon wastewater,» *Water Process Engineering*, vol. 70, n° 106907, 2025.
- N. Xiao, A. Zhang, T. Li, B. Hu, Y. Yang, Y. Dong, Z. Chen, W. Wang y M. Liu, «Modulated fenton-like activity via peroxymonosulfate activation by synergy and application of catalytic membrane,» *Separation and Purification Technology*, vol. 362, n° 131807, 2025.
- M. Mahmoud, R. El-Sharkawy, E. Allam, G. Nabil, F. Louka, M. Sillanpää y S. Elsayed, «Layered double hydroxide nanocomposites as promising nanomaterials for removal of inorganic pollutants from aquatic systems: A review,» *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 346, n° 125289, 2025.
- W. Sun, C. Liu, L. S. Z. J., H. Chen y Z. Qiu, «Effective adsorption of Congo red by an innovative biochar/LDH-derived MIL-100(Al): Investigation of coexisting pollutants and mechanism revelation,» *Separation and Purification Technology*, vol. 359, n° 130670, 2025.
- Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana, «Hispagua,» CEDEX, 28 Febrero 2009. [En línea]. Available: <https://hispagua.cedex.es/documentacion/noticia/51154#:~:text=La%20radiaci%C3%B3n%20ultravioleta%20,del%20cloro%20y%20sus%20derivados>. [Último acceso: 26 Febrero 2025].
- E Vila Projects, «evilaprojects,» 14 Junio 2023. [En línea]. Available: <https://www.evilaprojects.com/2023/06/14/tratamientos-de-aguas-para-bodegas/#:~:text=La%20A0desinfecci%C3%B3n%20por%20radiaci%C3%B3n%20ultravioleta%20se%20basa,muy%20efectiva%20para%20la%20desinfecci%C3%B3n>. [Último acceso: 26 Febrero 2025].
- EPA, «Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales. Desinfección con luz ultravioleta,» Washington D.C, 1999.
- «carbotecnia,» Carbotecnia, 24 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/desinfeccion/como-funciona-la-luz-uv-para-desinfeccion-de-agua/#:~:text=Los%20fotones%20emitidos%20por%20las,si%20previene%20su%20reproducci%C3%B3n%20exitosa>. [Último acceso: 26 Febrero 2025].
- «ULTRAQUA,» ULTRAQUA, 5 Abril 2024. [En línea]. Available: <https://ultraaqua.com/es/blog/desinfeccion-uv-agua-potable/#:~:text=Como%20resultado%20C%20ULTRAQUA%20ha%20desarrollado,org%C3%A1nicos%20como%20MIB%20%26%20Geosmin>. [Último acceso: 26 Febrero 2025].
- «Ultra Bio Ozone,» [En línea]. Available: https://ultra-bio-ozone.com/es/donde-y-quien-usa-la-esterilizacion-de-agua-uv/?utm_source=chatgpt.com. [Último acceso: 29 Marzo 2025].

56] C. Europea, *Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo*, Diario Oficial de la Unión Europea., 2020.

57] W. Hijnen, E. Beerendonk y G. Medema, «Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: A review,» *ELSEVIER*, vol. 40, nº 1, pp. 3-22, 2006.

58] Z. JL, «Potential Repair of Escherichia coli DNA following Exposure to UV Radiation from Both Medium- and Low-Pressure UV Sources Used in Drinking Water Treatment.,» *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 68, nº 7, pp. 3293-3299, 2002.

59] T. Brey, C. Müller-Wiegmann, Z. M. Zittier y W. Hagen, «Body composition in aquatic organisms — A global data bank of relationships between mass, elemental composition and energy content,» *Journal of Sea Research*, vol. 64, nº 3, pp. 334-340, 2010.

60] J. M. Andrés, «Tratamientos basados en luz ultravioleta para aguas de lastre como opción viable hacia el control de especies,» *Almoraima. Revista de Estudios Campogibraltareños*, vol. 47, p. 14, 2017.

61] K. J. C., M. B. J. y B. M., «UV and ozone in disinfection of drinking water: Comparison and combination,» *Water Science & technology*, vol. 55, pp. 165-172, 2007.

62] T. Yonar, K. Kestioglu y N. Azbar, «Treatability studies on domestic wastewater using UV/H₂O₂ process,» *ELSEVIER*, vol. 67, nº 2006, p. 6, 206.

63] X. Hu, X. Wang, Y. Ban y B. Ren, «A comparative study of UV–Fenton, UV–H₂O₂ and Fenton reaction treatment landfill leachate,» *Taylor and Francis*, vol. 32, nº 9, pp. 945-951, 2011.

64] I. Kim, N. Yamashita y H. Tanaka, «Performance of UV and UV/H₂O₂ processes for the removal of pharmaceuticals detected in secondary effluent of a sewage treatment plant in Japan,» *ELSEVIER*, vol. 166, 2008.

65] H.-Y. Shu, M.-C. Chang y W.-P. Hsieh, «Remedy of dye manufacturing process effluent by UV/H₂O₂ process,» *ELSEVIER*, vol. 128, pp. 60-66, 2006.

66] G. A. I. Talinli, «Interference of hydrogen peroxide on the standard cod test,» *ELSEVIER*, vol. 26, nº 1, pp. 107-110, 2003.

67] «Naciones Unidas,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>. [Último acceso: 29 Marzo 2025].

68] J. Rodríguez y V. Fernández, *Cómo redactar el estado del arte de un trabajo*, Editorial Genios, 2010.

69] P. Martínez y A. García, *Cómo escribir una buena memoria de TFG*, Publicaciones del 2000, 2013.

70] Priscilla, «greentechno,» 15 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://greentechnosl.com/tratamiento-de-las-aguas-de-lastre-de-barcos/>. [Último acceso: 24 Febrero 2025].

71] ADVANZAR SAC, «ADVANZAR,» ADVANZAR SAC, 2025. [En línea]. Available: <https://advanzar.net/uv-c/>. [Último acceso: 26 Febrero 2025].

72] I. S. E. W. y P. v. R. Lei Li, «Layered Double Hydroxides: Recent Progress and Promising Perspectives Toward Biomedical Applications,» *Advanced Science*, vol. 11, pp. 1-38, 204.

L. Li, I. Soyhan, E. Warszawik y P. v. Rijn, «Layered Double Hydroxides: Recent Progress
73] and Promising Perspectives Toward Biomedical Applications,» *Advance Science*, vol. 11, pp. 1-38, 2023.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El presente proyecto está profundamente relacionado con la conservación del medio ambiente, destacando la relevancia de tener en cuenta los efectos ambientales en los procesos de investigación científica y en el avance de nuevas tecnologías en este campo. La implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en buques basado en la combinación de radiación ultravioleta (UV), peróxido de hidrógeno e hidrotalcitas presenta una serie de implicaciones significativas en el ámbito social, económico y ambiental.

Desde el punto de vista social, este tipo de tecnología contribuye de manera directa a la mejora de la salud y la calidad de vida, tanto de las personas que trabajan a bordo de los buques ya que no se expondrían a productos tóxicos, como de las comunidades costeras afectadas por los vertidos al mar. Al reducir la presencia de contaminantes en las aguas residuales, se limita la exposición a sustancias tóxicas y se protege el entorno marino. Además, la adopción de soluciones sostenibles promueve una mayor concienciación medioambiental y refuerza la responsabilidad social de la Armada, mejorando su imagen pública y reputación frente a organismos reguladores y consumidores.

En cuanto a las implicaciones económicas, si bien la instalación de este tipo de tratamiento representa una inversión inicial considerable, especialmente en lo que respecta a la integración del sistema con las infraestructuras existentes a bordo, sus beneficios a medio y largo plazo son notables. La eficiencia del proceso combinado permite reducir el consumo de productos químicos y minimizar los costes asociados al manejo de residuos. Por otra parte, la posibilidad de reutilizar las hidrotalcitas empleadas en el tratamiento suponiendo así un ahorro adicional. Asimismo, el uso de tecnologías limpias puede abrir la puerta a incentivos fiscales, subvenciones o certificaciones medioambientales.

Desde una perspectiva ambiental, la aplicación de este sistema permite una mejora significativa en la calidad del efluente tratado, reduciendo la carga de materia orgánica y compuestos potencialmente tóxicos vertidos al mar. Esto contribuye a la preservación de los ecosistemas marinos, al tiempo que se disminuye la presión sobre las aguas receptoras. El enfoque sostenible del tratamiento, que combina métodos físicos y químicos con materiales reutilizables como las hidrotalcitas, minimiza la generación de subproductos peligrosos y reduce la huella ambiental de la actividad naval. Además, aunque de forma indirecta, el uso de tecnologías más eficientes y respetuosas con el medio ambiente contribuye a los esfuerzos globales de mitigación del cambio climático.

Por otro lado, otro aspecto clave en el que este proyecto se ve favorecido son los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que plantea las Naciones Unidas en la Agenda 2030, donde destacan los ODS 6, 12 y 14, por estar estrechamente vinculados con este proyecto:

- ODS 6: Agua limpia y saneamiento: este objetivo busca garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el acceso al saneamiento para todas las personas. Reconoce el agua como un recurso esencial no solo para la salud humana, sino también para el desarrollo económico, la seguridad alimentaria y la preservación de los ecosistemas. Entre sus metas se incluyen la mejora de la calidad del agua, la reducción de la contaminación, el aumento del uso eficiente de los recursos hídricos y la protección de los ecosistemas relacionados con el agua.
- ODS 12: Producción y consumo responsables: promueve un modelo de producción y consumo sostenible que permita hacer más y mejores cosas con menos recursos. Impulsa prácticas que reduzcan el uso de materiales y energía, minimicen los residuos y fomenten el reciclaje y la reutilización. Este objetivo busca desacoplar el crecimiento económico del deterioro ambiental y garantizar que los recursos naturales sean utilizados de forma eficiente y responsable, tanto por los productores como por los consumidores.
- ODS 14: Vida submarina: este objetivo tiene como fin conservar y utilizar de forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos. Los ecosistemas acuáticos desempeñan un papel crucial en la regulación del clima, la producción de oxígeno y el sustento de millones de personas. El ODS 14 aborda problemáticas como la contaminación marina, la sobrepesca, la acidificación de los océanos y la pérdida de biodiversidad marina, promoviendo una gestión responsable que asegure la salud de los ecosistemas acuáticos a largo plazo.

En conjunto, la incorporación de este sistema de tratamiento en buques representa un avance relevante hacia la sostenibilidad en el transporte marítimo, con beneficios tangibles en los ámbitos social, económico y ambiental.

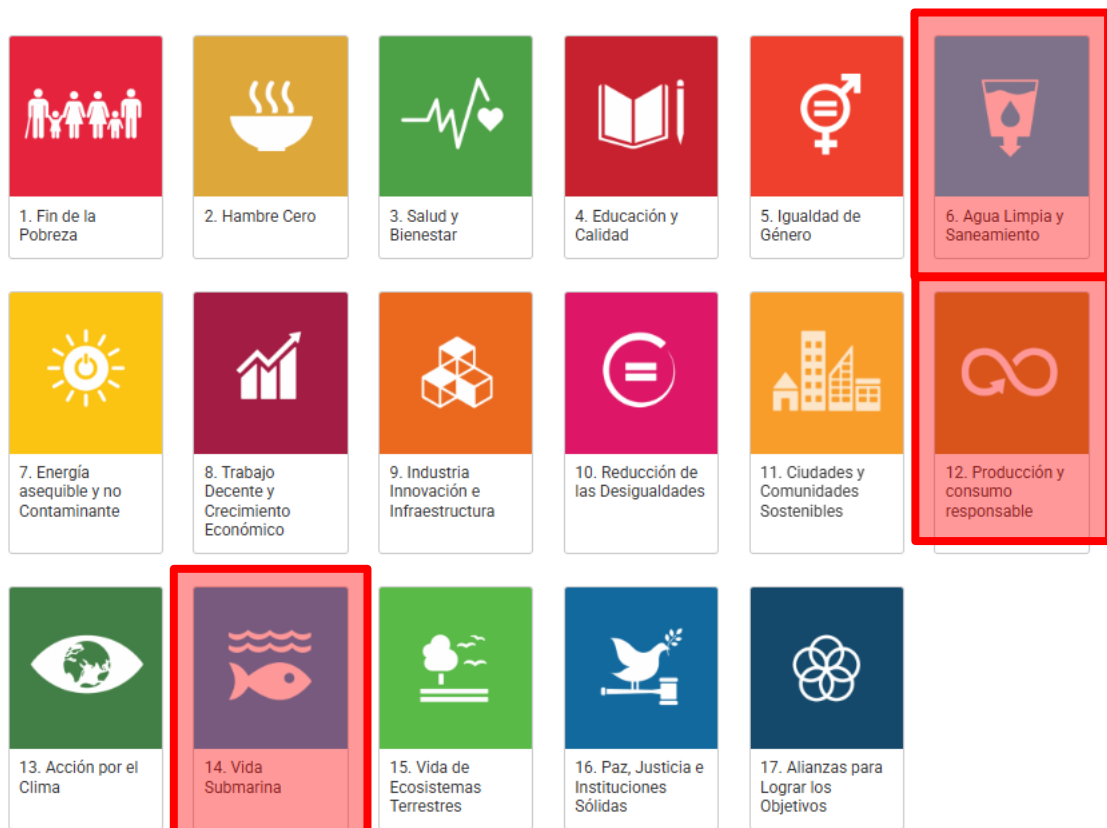


Figura 0-1 ODS Agenda 2030 (tomada de [67])

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo e implementación de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales que son estudiadas en este trabajo conlleva una serie de consideraciones éticas y sociales que deben ser tomadas en cuenta durante todo el proceso de investigación, diseño y aplicación.

Desde una perspectiva ética, este proyecto parte del compromiso de minimizar el impacto ambiental generado por las actividades humanas en los buques. La contaminación del agua representa una amenaza directa para los ecosistemas marinos y para las comunidades que dependen de ellos, por lo que buscar soluciones tecnológicas sostenibles no solo es una responsabilidad científica, sino también moral. Incorporar principios de sostenibilidad y precaución en el diseño del tratamiento, mediante el uso de métodos menos agresivos y materiales reutilizables demuestra un enfoque éticamente consciente que prioriza el bienestar colectivo por encima de intereses puramente económicos o industriales.

Asimismo, el desarrollo de esta tecnología también plantea una reflexión sobre la equidad en el acceso y la aplicación de innovaciones sostenibles. Es importante asegurar que este tipo de avances no queden reservados únicamente a grandes empresas con más recursos, sino que puedan adaptarse para su uso en distintos contextos, incluidos aquellos con menos capacidad económica. Garantizar esta accesibilidad contribuye a una mayor justicia social y ambiental.

En cuanto a las implicaciones sociales, la adopción de prácticas más responsables en el tratamiento de aguas residuales tiene un impacto directo en la protección de la salud pública, especialmente en poblaciones costeras y regiones dependientes de los recursos marinos. Además, promueve una cultura de respeto hacia el medio ambiente dentro del sector marítimo, fomentando una conciencia colectiva sobre la necesidad de preservar los océanos como fuente de vida y bienestar.

Finalmente, este trabajo refuerza la idea de que el progreso científico y tecnológico debe ir acompañado de una reflexión crítica sobre sus consecuencias a largo plazo. La innovación no puede desligarse de los valores éticos que orientan su uso, y solo será verdaderamente transformadora si responde a los desafíos globales desde una perspectiva humana, inclusiva y responsable.