

Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Cuantificación y caracterización de aguas residuales generadas
en buques de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Sofía Garro Martínez

DIRECTORES: Leticia Pérez Rial
Lorena González Gil

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_deVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Cuantificación y caracterización de aguas residuales generadas
en buques de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado aborda la cuantificación y caracterización de las aguas residuales generadas en diferentes buques de la Armada Española. Mediante el análisis experimental de muestras recogidas en siete unidades representativas, se evaluaron parámetros fisicoquímicos clave (pH, turbidez, sólidos, DQO, nitrógeno y fósforo) y contaminantes emergentes (ibuprofeno, naproxeno y diclofenaco), permitiendo conocer la carga contaminante previa al tratamiento. Además, se estimaron los caudales generados a bordo mediante modelos teóricos, dada la falta de datos reales de medición. Los resultados evidencian que las aguas residuales navales presentan una carga contaminante similar o superior a la de buques civiles y sistemas urbanos, destacando especialmente los elevados niveles de nutrientes y materia orgánica. También se observó una gran variabilidad entre buques, condicionada por su tipología, dotación y sistema de recogida. A partir de estos hallazgos, se proponen líneas de mejora en el diseño, mantenimiento y monitorización de los sistemas TAR a bordo, contribuyendo a una gestión más eficiente y sostenible de los efluentes generados en el entorno naval. Este estudio representa una primera aproximación integral a la realidad operativa de la flota y sienta las bases para futuras investigaciones en materia de tratamiento de aguas residuales en buques militares.

PALABRAS CLAVE

Aguas residuales, Buques militares, Contaminantes emergentes, Tratamiento a bordo, Caracterización fisicoquímica

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis profesoras, por su entrega, su cercanía y por animarme durante estos meses a dar lo mejor de mí. Su guía y confianza han sido fundamentales para realizar este trabajo.

La entrega de este TFG representa un momento especialmente significativo: el cierre de cinco años intensos en la Escuela Naval Militar. Ha sido un camino bonito, pero también exigente, lleno de días de estudio, esfuerzo y superación. A lo largo de este tiempo he aprendido a no rendirme, a luchar cada asignatura hasta el final, a crecer con cada dificultad y, sobre todo, a compartir el camino con mis compañeros. Ellos han sido mi familia en este proceso, un apoyo constante y una fuente de fuerza diaria. Juntos hemos aprendido lo más importante: a darnos a los demás de forma desinteresada, sin esperar nada a cambio.

Quiero agradecer también de manera especial a los oficiales que me han apoyado durante la realización de este trabajo, proporcionándome información clave, facilitando el acceso a los datos y enviándome muestras imprescindibles. Sin su colaboración y disposición, este trabajo no habría podido alcanzar el nivel de profundidad que tiene.

Agradezco también a mi familia, que, aunque en la distancia, nunca ha dejado de confiar en mí. Ellos me han transmitido los valores con los que he afrontado y superado estos cinco años: esfuerzo, constancia y fe.

Y, por último, gracias a Edu. Por estar, ayudarme y acompañarme en cada paso.

CONTENIDO

Contenido	9
Índice de Figuras	12
Índice de Tablas.....	14
1 Introducción y objetivos	17
1.1 Contexto y justificación	17
1.2 Marco de actuación	18
1.3 Objetivos	18
1.4 Metodología y enfoque	18
1.5 Estructura	19
2 Estado del arte	21
2.1 Compromiso ambiental y normativo.....	22
2.1.1 Organización de las Naciones Unidas (ONU)	22
2.1.2 Organización Marítima Institucional (OMI)	23
2.1.3 Armada Española.....	24
2.2 Legislación aplicable a las aguas residuales en buques	25
2.2.1 Convenio MARPOL	25
2.2.2 Otras normativas relevantes.....	27
2.3 Clasificación de aguas residuales en buques.....	28
2.3.1 Aguas negras.....	28
2.3.2 Aguas grises.....	29
2.3.3 Aguas de sentina	29
2.3.4 Aguas de lastre.....	30
2.4 Cuantificación de aguas residuales en buques	30
2.4.1 Importancia de la cuantificación.....	31
2.4.2 Factores que afectan los caudales	31
2.4.3 Tecnologías y métodos de estimación y medición de caudales.....	32
2.4.4 Valores reales de caudales en buques	32
2.5 Caracterización de aguas residuales.....	33
2.5.1 Parámetros fisicoquímicos.....	33
2.5.2 Parámetros microbiológicos	38
2.5.3 Contaminantes emergentes en aguas residuales	38
2.6 Tecnologías de tratamiento en buques	40
2.6.1 Métodos convencionales.....	40

2.6.2 Sistemas de tratamiento avanzados	40
2.6.3 Sistemas en la Armada.....	41
2.6.3.2 Predominancia y funcionamiento de la planta fisicoquímica (FQ) en la flota española	41
3 Desarrollo del TFG.....	45
3.1 Gestión de aguas residuales en buques de la Armada Española: recopilación de datos clave	46
3.2 Toma de muestras en buques de la Armada Española	48
3.2.1 Selección de los buques y planificación de muestreo.....	48
3.2.2 Puntos de toma de muestras.....	52
3.3 Caracterización de aguas residuales.....	60
3.3.1 Medición de pH	60
3.3.2 Medición de turbidez	60
3.3.3 Determinación de sólidos	61
3.3.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	63
3.3.5 Cuantificación de nitrógeno.....	66
3.3.6 Análisis de fósforo	68
3.3.7 Análisis de microcontaminantes	70
3.3.7.1 Protocolo SPE fase líquida	70
3.4 Estimación de caudales en buques	73
4 Resultados	75
4.1 Caudales estimados de las aguas residuales en buques de la Armada	75
4.2 Caracterización de las aguas residuales: contaminantes convencionales	77
4.2.1 pH	78
4.2.2 Turbidez	79
4.2.3 Sólidos	79
4.2.4 DQO.....	80
4.2.5 Nitrógeno	81
4.2.6 Fósforo	81
4.2.7 Comparativa con aguas residuales generadas en buques civiles	82
4.2.8 Comparativa con aguas residuales urbanas	87
4.3 Caracterización de las aguas residuales: contaminantes emergentes.....	88
4.3.1 Caracterización de antiinflamatorios no esteroideos (AINEs)	88
4.3.2 Caracterización de antiinflamatorios de uso antibacteriano	90
4.4 Propuestas de mejora en la gestión de las aguas residuales en buques de la Armada Española	91
4.4.1 Problemáticas existentes	91
5 Conclusiones y líneas futuras	95

5.1 Conclusiones	95
5.2 Líneas futuras	95
6 Bibliografía.....	97
Anexo I: Implicaciones sociales, económicas y ambientales	102
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Estructura general del trabajo de fin de grado (elaboración propia)	19
Figura 2-1. Esquema del estado del arte (elaboración propia)	21
Figura 2-2. Objetivos del Desarrollo Sostenible de la ONU [5]	22
Figura 2-3. Situación en España de los ODS en 2023 [2]	23
Figura 2-4 Tabla de vertido de desechos según distancia a costa en el BAA Cantabria.....	24
Figura 2-5. Playa Imperial Beach, California cerrada por contaminación [14]	29
Figura 2-6. Proceso de gestión del agua de lastre a bordo [19].....	30
Figura 2-7. Clasificación de los sólidos en las aguas residuales (elaboración propia) [28]	35
Figura 2-8. Consecuencias de la eutrofización en el Mar Menor [32]	37
Figura 2-9. Vertido de aceites y grasas en el mar [13]	37
Figura 2-10. Proceso de tratamiento fisicoquímico en una planta TAR (elaboración propia).....	42
Figura 3-1. Pasos seguidos en el desarrollo del trabajo (elaboración propia)	45
Figura 3-2. Lámina LOBA 2024	47
Figura 3-3. Fragata F-102 "Almirante Juan de Borbón" de la Armada Española [50].	48
Figura 3-4. Fragata F-105 "Cristóbal Colón" de la Armada Española [51]	49
Figura 3-5. BAC "Cantabria" (A-15) [52].....	49
Figura 3-6. Fragata F-82 "Victoria", perteneciente a la Clase Santa María de la Armada Española [53]	50
Figura 3-7. Buque de Asalto Anfibio "Castilla" (L-52) de la Armada Española [54]	50
Figura 3-8. Patrullero de altura "Vigía" (P-73) [55].....	51
Figura 3-9. Buque multipropósito "Cartagena" (A-62) [57]	52
Figura 3-10. Recogida de muestras en la fragata F-102 "Almirante Juan de Borbón"	53
Figura 3-11. Plano planta TAR de la fragata F-102 "Almirante Juan de Borbón"	54
Figura 3-12. Plano planta TAR del BAC "Cantabria"	55
Figura 3-13. Plano planta TAR de la fragata F-82 "Victoria"	56
Figura 3-14. Plano planta TAR del BAA Castilla.....	57
Figura 3-15. Plano planta TAR del patrullero "Vigía"	58
Figura 3-16. Plano planta TAR de la fragata F-105 "Cristóbal Colón"	59
Figura 3-17. Medición de pH con pH-metro digital.....	60
Figura 3-18. Análisis de turbidez en muestras de agua: muestra de sedimentos y medición.....	61
Figura 3-19. Determinación de sólidos totales (elaboración propia)	62
Figura 3-20. Determinación de sólidos en suspensión (elaboración propia)	63
Figura 3-21. Procedimiento de digestión térmica para la cuantificación de DQO (elaboración propia)	65

Figura 3-22. Proceso seguido para la cuantificación del nitrógeno (elaboración propia)	67
Figura 3-23. Pasos para la cuantificación del fósforo (elaboración propia).....	69
Figura 3-24. Diferencia entre muestras filtradas (izquierda) y sin filtrar (derecha) por 0,45 µm	70
Figura 3-25. Sólidos liofilizados	71
Figura 3-26. Muestras pasando por los cartuchos, donde se quedan retenidos los fármacos.....	72
Figura 3-27. Proceso de elución	73
Figura 4-1. Clasificación del pH y sus efectos en los tratamientos de aguas residuales.....	78
Figura 4-2. Comparativa de valores de pH en las aguas residuales de buques militares y civiles (elaboración propia)	84
Figura 4-3. Comparativa de valores de turbidez en las aguas residuales de buques militares y civiles (elaboración propia)	84
Figura 4-4. Comparativa de valores de SST en las aguas residuales de buques militares y civiles (elaboración propia)	85
Figura 4-5. Comparativa de valores de DQO en las aguas residuales de buques militares y civiles (elaboración propia)	85
Figura 4-6. Comparativa de valores de NT en las aguas residuales de buques militares y civiles (elaboración propia)	86
Figura 4-7. Comparativa de valores de PT en las aguas residuales de buques militares y civiles (elaboración propia)	86
Figura 0-1. Implicaciones sociales, económicas y ambientales del presente TFG (elaboración propia)	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Condiciones para la descarga de aguas sucias al mar [8]	26
Tabla 2-2. Clasificación del pH según sus valores y efectos en el tratamiento de aguas (elaboración propia) [26].....	33
Tabla 2-3. Interpretación de los valores de DQO (elaboración propia) [27].....	34
Tabla 2-4. Interpretación de los valores de SST (elaboración propia) [29]	36
Tabla 2-5. Interpretación de los valores de nitrógeno y fósforo (elaboración propia)	36
Tabla 2-6. Buques de la Armada y sus modelos de planta TAR (elaboración propia a partir de información de la empresa DETEGASA y [6])	44
Tabla 3-1. Características de los buques seleccionados para muestreo (elaboración propia)	52
Tabla 3-2. Volumen de muestra cargado en SPE y volumen de elución por buque (elaboración propia)	71
Tabla 3-3. Peso de muestra sólida extraída y volumen de SPE aplicado por buque (elaboración propia)	72
Tabla 4-1. Datos recopilados de los buques analizados en relación con la gestión de sus aguas residuales (elaboración propia)	76
Tabla 4-2. Caudales estimados de las aguas residuales de buques de la Armada Española (elaboración propia)	77
Tabla 4-3. Valores de pH en las aguas residuales de los buques analizados.....	78
Tabla 4-4. Niveles de turbidez (NTU) en las aguas residuales de los buques analizados (elaboración propia)	79
Tabla 4-5. Contenido de sólidos (g/L) en las aguas residuales de los buques analizados (elaboración propia)	80
Tabla 4-6. Demanda química de oxígeno (DQO) en las aguas residuales de los buques analizados (elaboración propia)	80
Tabla 4-7. Concentración de nitrógeno total (mg/l) en las aguas residuales de los buques analizados (elaboración propia)	81
Tabla 4-8. Concentración de fósforo total (mg/L) en las aguas residuales de los buques analizados (elaboración propia)	81
Tabla 4-9. Valores de los parámetros fisicoquímicos de aguas residuales de buques civiles (elaboración propia a partir de [65] y [6])	83
Tabla 4-10. Comparativa de las aguas residuales de buques de la Armada Española con buques civiles (elaboración propia)	83
Tabla 4-11. Comparativa entre los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales generadas en buques de la Armada y las aguas residuales urbanas convencionales (elaboración propia) [68]	87
Tabla 4-12. Concentración de antibióticos (IBP, NPX, DCF) en la fase líquida de las aguas residuales por buque (elaboración propia)	89
Tabla 4-13. Concentración de antibióticos (IBP, NPX, DCF) en la fase sólida (elaboración propia)	89

Tabla 4-14. Concentración total de antibióticos por buque (elaboración propia)	89
Tabla 4-15. Concentración de antiinflamatorios en la fase líquida de las aguas residuales por buque (elaboración propia)	90
Tabla 4-16. Concentración de antiinflamatorios en la fase sólida de las aguas residuales por buque (elaboración propia)	91
Tabla 4-17. Concentración total de antiinflamatorios en la fase líquida de las aguas residuales por buque (elaboración propia).....	91

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y justificación

Los buques, tanto civiles como militares, generan una serie de impactos ambientales significativos durante su operación. Entre ellos, destacan las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación acústica submarina, la introducción de especies invasoras a través del agua de lastre y la generación de residuos sólidos y líquidos. Dentro de estos últimos, las aguas residuales juegan un papel clave, ya que su inadecuado tratamiento y vertido pueden afectar gravemente los ecosistemas marinos.

Si bien la atención mediática y científica suelen centrarse en la contaminación por plásticos o los derrames de hidrocarburos, las aguas residuales generadas por los buques representan una problemática menos visible pero igualmente relevante. Estas aguas se dividen en aguas negras, procedentes de inodoros y sistemas sanitarios, y aguas grises, derivadas de duchas, lavabos, lavanderías y cocinas. Ambas contienen materia orgánica, nutrientes, metales pesados y microorganismos patógenos que, si no se gestionan adecuadamente, pueden degradar los ecosistemas marinos, alterar la biodiversidad e incluso afectar la salud humana.

A pesar de su importancia, existen pocos estudios enfocados en la cuantificación y caracterización de las aguas residuales de los buques, lo que deja un amplio margen de mejora en su gestión y tratamiento. En el caso de la Armada Española el desafío es aún mayor debido a la elevada dotación de sus barcos, que permanecen operativos durante largos periodos y generan volúmenes significativos de aguas residuales, incluso en puerto. Además, estos buques deben cumplir con normativas internacionales, como el Convenio MARPOL, que establece criterios estrictos para el tratamiento y la descarga de aguas residuales al mar.

Frente a este desafío, la Armada ha implementado sistemas de tratamiento en sus barcos, pero aún persisten interrogantes clave: ¿Son realmente eficientes estos sistemas? ¿Se adaptan a las necesidades operativas de cada buque? ¿Es posible optimizar su funcionamiento para reducir el impacto ambiental? Para abordar estas cuestiones, es esencial realizar un estudio detallado que cuantifique y caracterice las aguas residuales generadas en los buques.

Este Trabajo de Fin de Grado busca contribuir a esta labor, proporcionando datos clave sobre los caudales generados en diferentes buques de la Armada y la calidad de sus aguas residuales. A través de este estudio, se pretende avanzar hacia una gestión más sostenible de los residuos líquidos en los buques militares, minimizando su impacto en el medio marino y garantizando el cumplimiento de los estándares ambientales internacionales.

1.2 Marco de actuación

El tratamiento de aguas residuales en buques está regulado por normativas internacionales como el Convenio MARPOL (Anexo IV), la principal referencia en esta materia. Este convenio establece límites de condiciones para la descarga de aguas residuales al mar, exigiendo la instalación de plantas de tratamiento a bordo en determinados buques.

A nivel nacional, la Armada Española ha adoptado voluntariamente estas regulaciones, desarrollando protocolos internos para la gestión de residuos líquidos en sus unidades navales. Sin embargo, la falta de estudios específicos sobre los caudales generados y la composición química de estas aguas en buques militares ha dificultado la optimización de los sistemas de tratamiento.

Este trabajo se enmarca en la necesidad de obtener datos precisos sobre la cantidad y calidad de las aguas residuales en distintos buques de la Armada, con el fin de mejorar su tratamiento y minimizar su impacto ambiental.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es realizar una cuantificación y caracterización de las aguas residuales generadas en distintos buques de la Armada Española, con el fin de evaluar su carga contaminante, identificar variaciones entre unidades y analizar la adecuación de los sistemas actuales de tratamiento a bordo.

A partir de este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- **Cuantificar los caudales diarios de aguas residuales (grises y negras)** generados en distintos buques, utilizando datos teóricos basados en la dotación y el sistema de recogida instalado.
- **Caracterizar los parámetros fisicoquímicos convencionales** de las aguas residuales (pH, turbidez, sólidos, DQO, nitrógeno y fósforo), evaluando su variabilidad entre buques y su relevancia en los procesos de tratamiento.
- **Comparar los valores obtenidos con los estándares de referencia** en buques civiles y aguas residuales urbanas, para determinar si las aguas generadas a bordo presentan una carga contaminante superior.
- **Valorar la influencia de factores como el tipo de buque, la dotación o el sistema de recogida** sobre la composición de las aguas residuales, estableciendo relaciones que permitan justificar las diferencias observadas.
- **Proponer líneas de mejora y futuras investigaciones**, orientadas a optimizar el diseño, mantenimiento y eficiencia de las plantas TAR en los buques de la Armada, así como a ampliar el conocimiento sobre aspectos no abordados en este estudio, como la caracterización microbiológica o el análisis post-tratamiento.

1.4 Metodología y enfoque

Este trabajo adopta un enfoque práctico y analítico, basado en la recopilación de muestras de aguas residuales en distintos buques de la Armada Española. Se seleccionaron embarcaciones de tipologías diversas y se obtuvieron muestras tanto en puerto como en navegación. Las muestras fueron analizadas en laboratorio para determinar parámetros fisicoquímicos (pH, turbidez, sólidos, DQO, nitrógeno y fósforo) y contaminantes emergentes (ibuprofeno, naproxeno, diclofenaco). Además, se realizó una estimación de caudales generados mediante modelos teóricos (DETEGASA y EPA), dado que no se disponen de registros exactos a bordo. La comparación de resultados con estudios civiles y urbanos permite evaluar la eficiencia de los sistemas TAR actuales y proponer medidas de mejora adaptadas a la realidad operativa de la flota.

1.5 Estructura

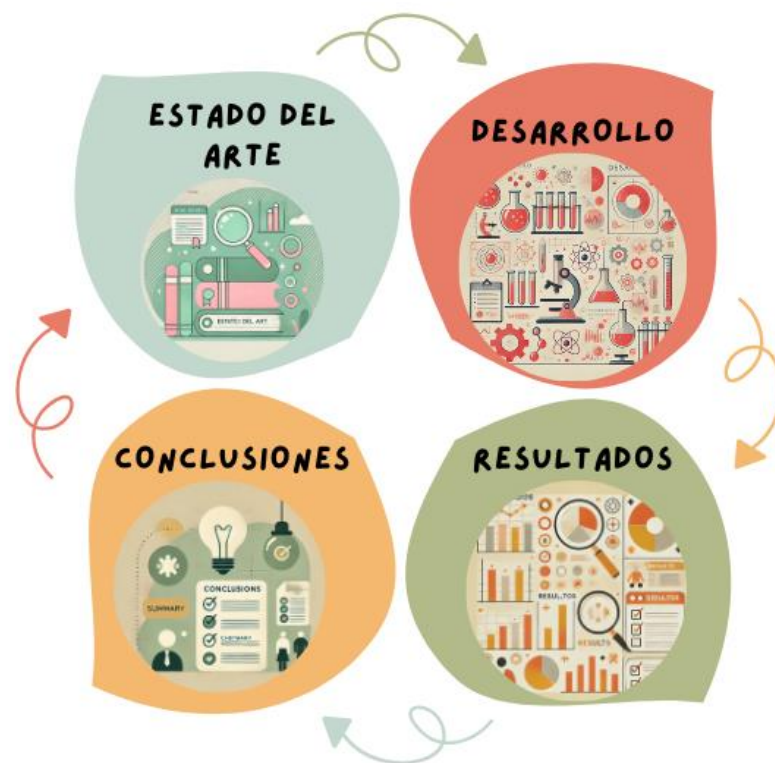


Figura 1-1. Estructura general del trabajo de fin de grado (elaboración propia)

El contenido de la memoria se distribuye en varios capítulos que permiten abordar progresivamente los distintos aspectos del estudio:

- **Estado del arte:** ofrece una revisión del marco normativo y técnico relacionado con la gestión de aguas residuales en buques. Se analiza la legislación internacional y nacional, los tipos de aguas generadas a bordo, sus características y los sistemas de tratamiento existentes, con especial atención a las soluciones implementadas en la Armada Española.
- **Desarrollo del TFG:** detalla las acciones llevadas a cabo durante la investigación, incluyendo la planificación del muestreo, la recogida de muestras en distintos buques, los análisis de laboratorio y la estimación de caudales mediante modelos teóricos.
- **Resultados:** presenta y analiza los datos obtenidos sobre los caudales y la composición de las aguas residuales. Se incluyen comparativas con valores de referencia en otros contextos (buques civiles y aguas urbanas).
- **Conclusiones y líneas futuras:** resume los principales resultados del estudio y plantea posibles líneas de investigación orientadas a optimizar la gestión y tratamiento de aguas residuales en buques militares.
- **Anexos:** contienen consideraciones éticas, sociales, económicas y ambientales, ampliando la perspectiva del trabajo más allá de los aspectos técnicos.

2 ESTADO DEL ARTE

El tratamiento y gestión de aguas residuales en buques es un aspecto clave para garantizar operaciones sostenibles y cumplir con las normativas medioambientales. En este apartado, se estudiará el contexto actual de esta problemática, analizando los compromisos internacionales hasta las soluciones tecnológicas utilizadas en la Armada. En la Figura 2-1 se muestra de forma esquemática los temas a tratar en este apartado.



Figura 2-1. Esquema del estado del arte (elaboración propia)

Para empezar, se verá cómo organismos internacionales, como la ONU y la OMI, han impulsado regulaciones y políticas para minimizar el impacto ambiental de las descargas marítimas. También se

revisará el papel de la Armada Española, que, aunque exenta de algunas normativas civiles, ha adoptado voluntariamente sistemas de tratamiento de aguas para reducir su huella ecológica.

Después, se comentará la legislación vigente, con normativas clave como el Convenio MARPOL, el Convenio de Londres y la Directiva Marco del Agua de la UE, que establecen los estándares de descarga y tratamiento de aguas residuales en buques.

Otro punto esencial es entender qué tipos de aguas residuales se generan a bordo y cómo se gestionan. Se diferenciará entre aguas negras, grises, de sentina y de lastre, cada una con características y necesidades de tratamiento distintas. Para ponerlo en perspectiva, se explicará cómo se mide y cuantifica el volumen de estas aguas a bordo, ya que su correcto manejo es crucial para evitar vertidos ilegales y optimizar su tratamiento.

Además, se analizará la calidad de estas aguas, explorando tanto sus parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, como los contaminantes emergentes, un problema creciente que requiere tecnologías más avanzadas para su eliminación.

Finalmente, se presentarán las tecnologías de tratamiento utilizadas en los buques, desde los métodos más convencionales hasta los sistemas más innovadores, destacando las soluciones implementadas en la Armada Española y comparando distintos buques según sus necesidades operativas.

2.1 Compromiso ambiental y normativo

2.1.1 Organización de las Naciones Unidas (ONU)

A través de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, la ONU asume el compromiso de proteger los recursos hídricos y los océanos, reconociéndolos como pilares esenciales para la vida en el planeta y para garantizar un futuro sostenible. En particular, el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6: “Agua limpia y saneamiento” (véase Figura 2-2, donde se resalta el ODS 6) busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Este objetivo se centra en mejorar la calidad del agua, reduciendo la contaminación y minimizando la liberación de productos químicos y desechos peligrosos en ríos y mares, además de fomentar el tratamiento y la reutilización del agua [1].



Figura 2-2. Objetivos del Desarrollo Sostenible de la ONU [5]

No obstante, el grado de cumplimiento de los ODS aún enfrenta desafíos significativos: solo un 15 % de las metas están bien encaminadas, mientras que un 48 % presentan retrasos y un 37 % están en riesgo de no alcanzarse (véase Figura 2-3, donde se muestra el progreso negativo del ODS 6 en España con respecto a Europa) [2]. Además, entre 2020 y 2023, el ritmo de avance de los ODS en la UE fue más de dos veces inferior al registrado entre 2016 y 2019, agravado por desigualdades entre regiones [3].

En línea con este compromiso, la ONU también trabaja en la protección de los océanos, promoviendo medidas para mitigar los daños causados por vertidos de residuos y aguas no tratadas. Un ejemplo reciente de este esfuerzo es la adopción del Tratado Global de los Océanos en 2023, que promueve la creación de áreas marinas protegidas en aguas internacionales [4].

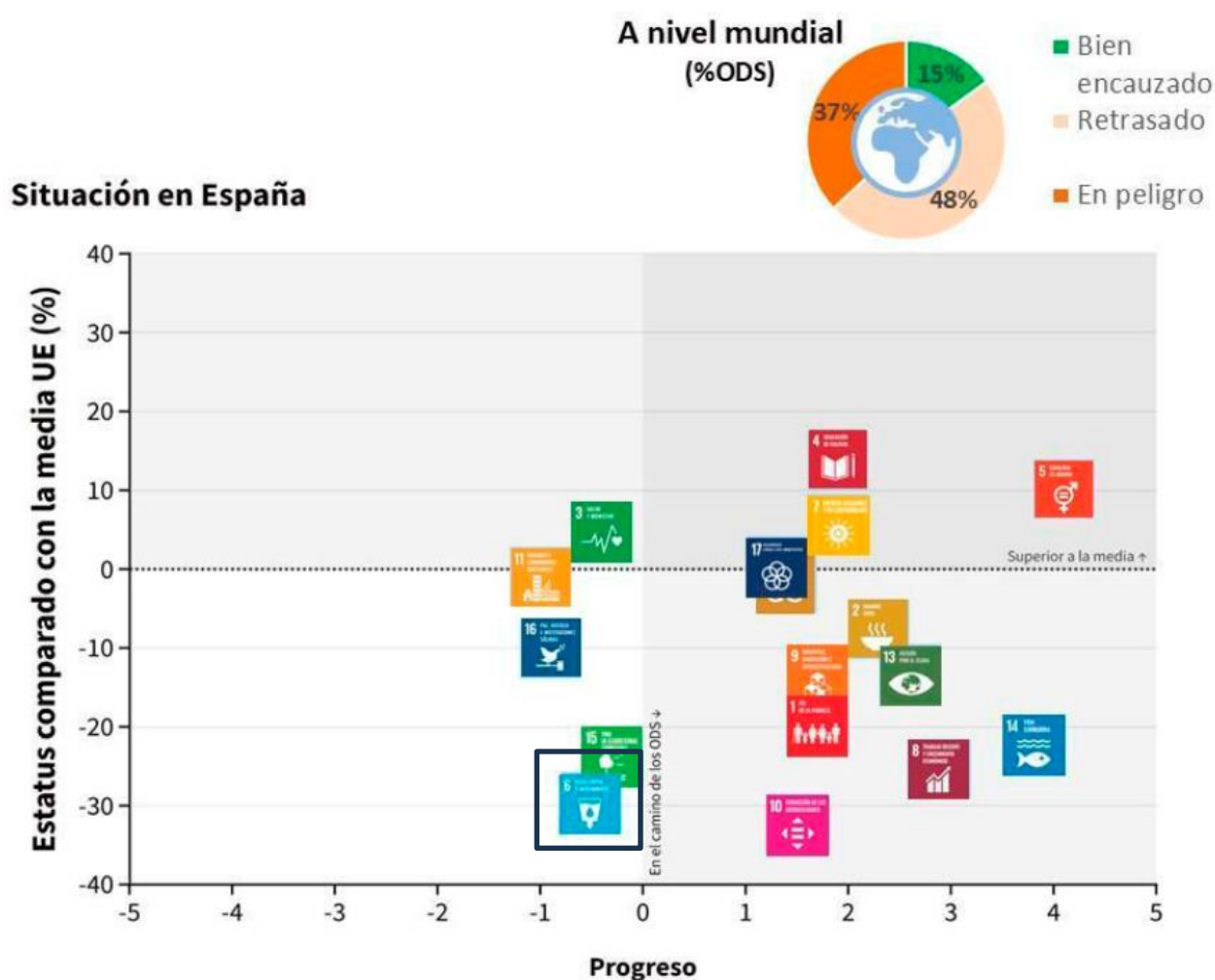


Figura 2-3. Situación en España de los ODS en 2023 [2]

2.1.2 Organización Marítima Institucional (OMI)

Como organismo de la ONU, la OMI tiene un papel trascendental en el cumplimiento de los objetivos relacionados con la protección de los océanos y el agua, tal como promueve la Agenda 2030. Su compromiso se centra en prevenir la contaminación marina y garantizar un transporte marítimo respetuoso con el medioambiente. Para ello, establece directrices específicas sobre cómo los buques deben tratar sus aguas residuales, regulando las descargas y evitando que residuos no tratados lleguen al mar. Desde su creación, la OMI ha desempeñado un papel clave en la elaboración de más de 50 convenios y acuerdos internacionales, asegurando que estos evolucionan en sintonía con los avances

tecnológicos del transporte marítimo. Además, sigue trabajando para que los barcos cuenten con sistemas más eficaces de tratamiento de aguas, como los biorreactores, que permiten un tratamiento avanzado y eficiente, asegurando que estos métodos se cumplan especialmente en zonas marinas protegidas. Actualmente, este organismo continúa perfeccionando las normas para lograr un desarrollo sostenible del transporte marítimo [5].

2.1.3 Armada Española

La Armada desempeña una función clave en la protección del medioambiente marino, destacando como una institución comprometida con la sostenibilidad. Aunque los buques militares están exentos de cumplir con las normativas establecidas por la OMI, la Armada ha decidido adoptarlas voluntariamente, incluyendo aquellas relacionadas con el tratamiento de aguas residuales, mostrando su responsabilidad y liderazgo en objetivos globales.

Entre las principales medidas adoptadas por la Armada, destaca su objetivo de conseguir el concepto "buques de contaminación cero". Se trata de usar materiales reciclables y no tóxicos en la construcción de unidades, además de sustituir componentes peligrosos como el amianto, las pinturas con tributilestano (TBT) o los clorofluorocarbonos (CFC) por otros más respetuosos con el medioambiente. Por otro lado, este programa incluye la instalación de sistemas avanzados de tratamiento de aguas residuales a bordo y la incorporación de motores eléctricos POD (Podded Drive), que reducen las emisiones de dióxido de carbono. Además, la Armada colabora con empresas especializadas como DETEGASA, encargada del mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales en sus buques, garantizando así su eficiencia y cumplimiento normativo [6].

La Armada y sus buques están profundamente concienciados con el cumplimiento de las normativas ambientales establecidas. En la mayoría de los puentes de mando de los buques, se dispone de una tabla informativa que detalla, según la normativa vigente, los desechos que pueden ser vertidos al mar en función de la distancia que se encuentren a costa (véase Figura 2-4), aspecto que se desarrollará en secciones posteriores.

Tipo Area	Aguas grises	Aguas Negras	Aguas oleosas	Tóxicos o peligrosos
< 3 NM	Almacenar en tanques y descargar en tierra o lejos de costa	Prohibido excepto buques con tratamiento total	Autorizada < 15 ppm para buques con MCA	PROHIBIDA
3-12 NM	Autorizada	Prohibido excepto buques con tratamiento parcial	Autorizada < 15 ppm para buques con MCA	PROHIBIDA
>12 NM	Autorizada	Autorizada	Autorizada < 15 ppm para buques con MCA	PROHIBIDA
Áreas especiales	Autorizada	Autorizada	Evitar descargas. En caso necesario <15 ppm.	PROHIBIDA
Países extranjeros				PROHIBIDA

Figura 2-4 Tabla de vertido de desechos según distancia a costa en el BAA Cantabria

Estas acciones demuestran el compromiso y la dedicación de la Armada con la adopción de prácticas y medios para la gestión de aguas residuales y la protección del entorno marino.

2.2 Legislación aplicable a las aguas residuales en buques

La regulación del tratamiento de aguas residuales en los buques es fundamental para proteger los ecosistemas marinos y promover un transporte marítimo sostenible. Estas normativas, que incluyen estándares internacionales y nacionales, controlan las descargas al mar, los sistemas de tratamiento a bordo y la gestión de residuos generados por los buques. Como principal instrumento para abordar este tema, destaca el Convenio MARPOL, que se complementa con otras normativas que fortalecen el compromiso de cada país con la conservación del medio marino.

2.2.1 Convenio MARPOL

También llamado el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques, el Convenio MARPOL tiene como función prevenir la contaminación marina derivada de las actividades marítimas que se realizan día a día. Se adoptó en el año 1973 en la sede de la OMI y años después, en 1984, España lo ratificó para comprometerse a cumplir sus normas. Aunque las principales fuentes de aguas sucias provienen de actividades terrestres, la descarga de aguas residuales desde los buques también contribuye a la contaminación marina, afectando la salud humana. Es importante destacar que ninguna de las reglas es aplicable a “los buques de guerra ni a las unidades navales auxiliares, ni a los buques que, siendo propiedad de un Estado o estando a su servicio, sólo presten por el momento servicios gubernamentales de carácter comercial” [7]. Sin embargo, cada nación se encargará de adoptar medidas que garanticen de forma razonable que los buques indicados concuerden con el propósito final de dicho convenio. Es por ello por lo que, aunque los buques de guerra estén exentos de cumplir obligatoriamente las reglas del Convenio MARPOL, la Armada adopta voluntariamente estas normativas como parte de su compromiso para la minimización del impacto ambiental de sus operaciones.

El Convenio MARPOL se estructura en seis anexos que regulan distintos tipos de contaminación generada por los buques:

- **Anexo I:** prevención de la contaminación por hidrocarburos. Regula la descarga de residuos oleosos y establece requisitos para los sistemas de separación y retención de aceites a bordo.
- **Anexo II:** control de la contaminación por sustancias nocivas líquidas a granel. Clasifica y establece condiciones de transporte y descarga para productos químicos transportados por mar.
- **Anexo III:** prevención de la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas en envases. Introduce regulaciones para la manipulación, embalaje y etiquetado de cargas peligrosas.
- **Anexo IV:** prevención de la contaminación por aguas residuales. Regula la descarga de aguas negras y grises de los buques, exigiendo sistemas de tratamiento a bordo o su retención hasta instalaciones a puerto.
- **Anexo V:** prevención de la contaminación por basuras generadas en los buques. Prohíbe o limita el vertido de distintos tipos de desechos sólidos en el mar, como plásticos y residuos alimentarios.
- **Anexo VI:** prevención de la contaminación atmosférica por emisiones de los buques. Establece límites de emisión para óxidos de azufre (Sox) y nitrógeno (NOx), regulando el uso de combustibles marinos.

2.2.1.1 Anexo IV

Entre los seis anexos del MARPOL, el Anexo IV es especialmente relevante en el presente trabajo, ya que establece las reglas para prevenir la contaminación por aguas sucias de los buques, incluyendo su descarga, los equipos utilizados y los sistemas para el control de dichas descargas al mar.

En primer lugar, el anexo define las “aguas sucias” como aquellos residuos líquidos que, debido a su composición orgánica y microbiológica, pueden representar un riesgo ambiental y sanitario. Estas incluyen:

- Aguas negras, desagües y residuos procedentes de inodoros y urinarios.
- Aguas grises, procedentes de lavabos, lavaderos y áreas médicas a bordo (enfermería, hospital, etc.).
- Líquidos procedentes de lugares donde se transportan animales vivos.
- Otras aguas residuales cuando estén combinadas con las mencionadas anteriormente.

Por otro lado, establece que los buques deben estar equipados con uno de los siguientes sistemas:

- Una instalación de tratamiento de aguas sucias que cumpla con las normas establecidas.
- Un sistema para desmenuzar y desinfectar las aguas sucias, que cuente con un tanque de almacenamiento.
- Un tanque de retención de aguas sucias con capacidad para las necesidades del buque.

Continuando con las especificaciones establecidas, anota que la descarga de aguas sucias al mar está prohibida, excepto cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Si las aguas sucias se han desmenuzado y desinfectado, la descarga se puede realizar a una distancia mayor de 3 millas náuticas de costa.
- Si las aguas sucias no se han desmenuzado ni desinfectado, la descarga se debe realizar a una distancia superior a 12 millas náuticas de costa.

En ambos casos, la descarga debe realizarse mientras el buque navegue a una velocidad mínima de 4 nudos, puntualizando que las que han sido tratadas deben haber estado almacenadas en tanques.

Además, el Anexo IV del Convenio MARPOL establece “zonas especiales”, donde las restricciones para la descarga de aguas sucias son aún más estrictas. En estas áreas, como por ejemplo en el Mar Báltico, las descargas están prohibidas, a no ser que el buque tenga un sistema de tratamiento autorizado que garantice las normas de eliminación de nitrógeno y fósforo, contribuyendo a minimizar el impacto ambiental como consecuencia de dichos vertidos [8].

A continuación, en la Tabla 2-1 se explica con mayor claridad lo expuesto anteriormente.

Condición de descarga	Distancia mínima de descarga a tierra	Requisitos adicionales
Aguas tratadas (desmenuzadas y desinfectadas)	Más de 3 millas náuticas	Uso de un sistema de tratamiento aprobado. Si han sido almacenadas en tanques, el buque debe navegar a velocidad mínima de 4 nudos
Aguas no tratadas	Más de 12 millas náuticas	Buque debe estar en navegación a velocidad mínima de 4 nudos
Descargas en zonas especiales	Prohibida , salvo excepciones	Solo se permite descarga si el buque tiene sistemas avanzados de eliminación de nitrógeno y fósforo

Tabla 2-1 Condiciones para la descarga de aguas sucias al mar [8]

Complementando el Anexo IV, la Organización Marítima Internacional (OMI) desarrolla Directivas MEPC (Marine Environment Protection Committee), que establecen los criterios técnicos específicos para aplicar MARPOL. Estas directivas regulan los límites de vertido y los parámetros que deben controlarse en el agua residual antes de su descarga, asegurando su cumplimiento con los estándares internacionales. En el caso del Anexo IV, las directivas MEPC establecen umbrales para la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos en suspensión y niveles de patógenos, entre otros. Estos parámetros son los que posteriormente se evalúan en los análisis de laboratorio.

2.2.2 Otras normativas relevantes

Además del Convenio MARPOL, existen otras normativas y acuerdos internacionales que complementan la protección del medio marino. Aunque no son de cumplimiento obligatorio para los buques militares, la Armada adopta muchas de sus medidas como parte de su compromiso con la seguridad, sostenibilidad y la gestión responsable de los recursos marinos. Estas normativas regulan aspectos como la gestión de aguas residuales, la eliminación de desechos peligrosos, el reciclaje de buques y la seguridad en puertos.

2.2.2.1 Convenio de Londres

El Convenio de Londres, formalmente conocido como el Convenio sobre la Prevención de la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y otras Materias, fue adoptado en 1972 y entró en vigor en 1975. Fue uno de los primeros acuerdos internacionales en abordar la protección del medio marino frente a actividades humanas [6]. Su objetivo es regular y prevenir la contaminación marina, regulando qué materiales pueden ser eliminados en el mar y en qué condiciones. Para ello, clasifica los desechos en lista negra y gris. Los materiales de la lista negra tienen prohibido su vertido, mientras que los de la lista gris requieren un permiso especial.

En 1996, se adoptó el Protocolo de Londres, en vigor desde 2006, el cual endureció el convenio original. Prohíbe todos los vertidos al mar, excepto los expresamente permitidos, e incluye la prohibición del vertido de aguas residuales no tratadas, reforzando así la necesidad de contar con sistemas de tratamiento a bordo e infraestructuras portuarias adecuadas para su recepción [9].

Si bien el Convenio de Londres regula el vertido de desechos en el mar en un sentido general, en el caso de las descargas procedentes de buques, el convenio aplicable es MARPOL, específicamente su Anexo IV, que establece normas más estrictas para la prevención de la contaminación por aguas residuales. MARPOL es más restrictivo porque regula directamente los sistemas de tratamiento a bordo, las condiciones bajo las cuales pueden realizarse las descargas y las distancias mínimas desde la costa, aspectos que el Convenio de Londres no contempla con tanto detalle.

En resumen, el Convenio de Londres sirve para prevenir el vertido de desechos en el mar en términos generales, mientras que MARPOL es más específico y riguroso en la regulación de la contaminación generada directamente por los buques, asegurando estándares más exigentes para la gestión de sus aguas residuales.

2.2.2.2 Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (DMA 2000/60/CE)

Aprobada en el año 2000, la Directiva Marco del Agua (DMA) de la Unión Europea surge como respuesta a la necesidad de unificar las actuaciones relacionadas a la gestión de agua. Aunque no se centra exclusivamente en los buques, regula la descarga de aguas residuales tanto en puertos como en aguas costeras.

Esta directiva establece un marco comunitario para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas. Sus principales objetivos son mejorar la calidad del agua, controlar la contaminación y promover su uso sostenible, asegurando su disponibilidad y calidad a largo plazo. Además, esta directiva influye directamente en la gestión de residuos en puertos, exigiendo la existencia de infraestructuras adecuadas para la recepción

de aguas residuales de los buques, con el fin de prevenir vertidos ilegales al mar y minimizar su impacto ambiental [10].

La Armada Española colabora con las autoridades portuarias para asegurar que, al llegar a puerto, sus buques descarguen las aguas residuales en instalaciones adecuadas. Por ejemplo, en el puerto de Ferrol, las fragatas F-100 mantienen actividad a bordo incluso en periodos de descanso, con dotaciones de guardia o realizando mantenimientos que generan desechos y aguas residuales. Para gestionarlas, los buques deben conectarse a la red portuaria mediante tuberías y mangueras, trasladando las aguas residuales a tanques de almacenamiento en tierra, donde son tratadas conforme a la normativa ambiental.

2.2.2.3 Convenio Internacional de Hong Kong

El Convenio de Hong Kong, adoptado en 2009, establece medidas para garantizar el reciclaje seguro de los buques y así minimizar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente. Aunque se centra en la fase final del ciclo de vida de los barcos, también tiene directrices sobre la gestión de materiales peligrosos y residuos generados a bordo [11].

Una de las disposiciones clave del convenio es la obligación de que los buques mantengan un Inventario de Materiales Peligrosos (IHM) durante toda su vida útil. Debe contener información sobre todos los materiales peligrosos presentes en la estructura, sus equipos y los suministros del buque, así como de los residuos generados, incluyendo las aguas residuales [12].

El convenio establece normas para el control de sustancias peligrosas, la eliminación de residuos y la certificación de instalaciones de reciclaje. Introduce el concepto “pasaporte verde”, que registra los materiales del buque para facilitar su gestión ambiental al final de su vida útil [6]. Además de minimizar el impacto ambiental, estas medidas buscan proteger a los trabajadores del sector naval.

2.3 Clasificación de aguas residuales en buques

Los buques generan diversos tipos de aguas residuales como resultado de sus operaciones diarias. Estas aguas deben ser gestionadas y tratadas adecuadamente para evitar la contaminación y cumplir con normativas como el Convenio MARPOL. Las aguas residuales en los buques pueden clasificarse en aguas negras, aguas grises, aguas de sentina y aguas de lastre, cada una con características específicas y distintas exigencias de tratamiento y descarga [13].

2.3.1 Aguas negras

Las aguas negras son las aguas residuales generadas a bordo de los buques, principalmente en inodoros y áreas médicas, y contienen materia fecal, restos de alimentos, papel, materia orgánica, nutrientes y patógenos. El Anexo IV del Convenio MARPOL establece que deben ser tratadas antes de su descarga o almacenadas en tanques para su posterior eliminación en instalaciones portuarias [14].

Debido a su alto nivel de contaminación, su vertido sin tratamiento puede provocar enfermedades como otitis y gastroenteritis, además de afectar gravemente a los ecosistemas marinos. Su descarga favorece la proliferación de cianobacterias y microalgas, reduciendo especies como la Posidonia oceánica, fundamental para la biodiversidad marina y la transparencia del agua [15]. Un ejemplo de este daño es Imperial Beach, California, que lleva cerrada desde 2021 por los altos niveles de contaminación por aguas residuales [16], como se observa en la Figura 2-5, donde se aprecia el impacto ambiental en la zona afectada.



Figura 2-5. Playa Imperial Beach, California cerrada por contaminación [14]

A su vez, las aguas negras se pueden clasificar en:

- Frescas: contienen oxígeno disuelto, lo que permite la descontaminación aerobia de los contaminantes.
- Sépticas: aquellas que han agotado el oxígeno, generando descomposición anaerobia y emisión de gases de olor desagradable [6].

2.3.2 Aguas grises

Son aquellas aguas provenientes de duchas, lavabos, cocinas y lavanderías [17]. En cuanto a su composición, contienen principalmente compuestos orgánicos e inorgánicos derivados de productos de limpieza y restos alimenticios [18].

Debido a su menor carga contaminante en comparación con las aguas negras, las aguas grises pueden ser tratadas, y en algunos casos, reutilizados a bordo para fines no potables como el baldeo de cubiertas o sistemas de riego. Con estas prácticas se contribuye a la optimización de los recursos hídricos y a la reducción de descargas al mar.

2.3.3 Aguas de sentina

Las aguas de sentina son las acumulaciones líquidas que se forman en la parte más baja del casco de un buque, conocida como sentina. Estas aguas provienen de diversas fuentes a bordo, incluyendo filtraciones de agua salada, fugas de sistemas de refrigeración, derrames de combustible, aceite lubricante y residuos de limpieza [19].

El tratamiento de las aguas de sentina es más complejo que el de otros tipos de aguas debido a la diversidad de contaminantes presentes. La Armada Española emplea procedimientos de bombeo para extraer las aguas, que luego son tratadas mediante equipos especializados para asegurar que las descargas cumplan con las normativas internacionales. El Convenio MARPOL (Anexo I) establece regulaciones estrictas, prohibiendo su descarga al mar a no ser que hayan sido tratadas y el contenido de hidrocarburos en el efluente no exceda las 15 partes por millón (ppm) [20].

En comparación con las aguas grises y negras, las de sentina presentan mayor complejidad de tratamiento debido a la presencia de hidrocarburos y otros contaminantes industriales. Por esta razón, su

reutilización a bordo es limitada, ya que requiere un tratamiento avanzado para eliminar residuos tóxicos y aceites [19]. Debido a esta dificultad, en la mayoría de los casos, estas aguas son tratadas y posteriormente descargadas de manera segura en instalaciones portuarias.

2.3.4 Aguas de lastre

Las aguas de lastre son esenciales para la estabilidad y maniobrabilidad de los buques. Se almacenan en tanques específicos y se bombean dentro o fuera del buque según las necesidades operativas, como la compensación de peso durante la carga y descarga de mercancías y la estabilidad en condiciones adversas. La Figura 2-6 muestra el proceso de gestión del agua de lastre a bordo, donde se observa cómo el agua es recogida en los tanques de lastre mediante sistemas de bombeo.

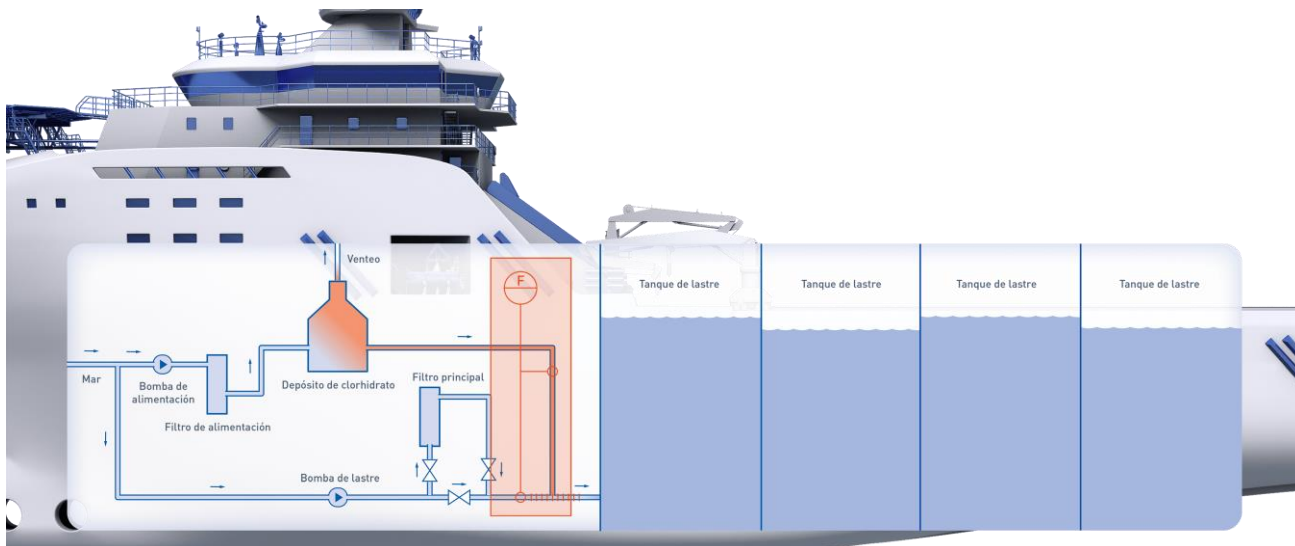


Figura 2-6. Proceso de gestión del agua de lastre a bordo [19]

El Convenio Internacional para el Control y la Gestión del Agua de Lastre, adoptado en 2004 por la OMI, exige que los buques gestionen su agua de lastre mediante un plan específico, incluyendo su intercambio en alta mar y tratamiento con sistemas aprobados para eliminar organismos acuáticos perjudiciales [21].

El tratamiento del agua de lastre es complejo debido a la diversidad de organismos y sedimentos que puede contener. Se utilizan métodos como filtración, desinfección mediante radiación UV, ozonización y oxidación. En el caso de la Armada Española, algunos buques han implementado tecnologías como el Optimarin Ballast System (OBS), que combina filtración mecánica y desinfección UV sin el uso de productos químicos para minimizar el impacto ambiental [22]. Sin embargo, este sistema no está presente en toda la flota, ya que la tecnología de tratamiento varía según el tipo de buque y sus requisitos operativos.

A diferencia de otras aguas residuales, el agua de lastre no contiene contaminantes químicos ni residuos humanos, pero puede transportar especies invasoras que representan una amenaza para los ecosistemas marinos. Por ello, su reutilización a bordo no es común, priorizándose su tratamiento y gestión adecuada.

2.4 Cuantificación de aguas residuales en buques

Para una gestión eficiente y responsable del medio ambiente, cuantificar las aguas residuales en los buques es clave para mejorar su control y tratamiento. Esto permite optimizar su tratamiento, prevenir vertidos ilegales al mar y cumplir con las normativas. En el caso de los buques de guerra, su dotación es significativamente mayor que la de un mercante, y la tripulación permanece a bordo incluso cuando

están en puerto, lo que incrementa la generación de residuos. Por ello, contar con un diseño eficiente de los sistemas de gestión de aguas residuales es fundamental [17].

La Armada, comprometida con la protección ambiental, cuenta con sistemas de control, equipos adecuados y revisiones periódicas para garantizar una gestión correcta de estos residuos según el Convenio MARPOL y las regulaciones vigentes. A continuación, se abordarán los aspectos clave en la cuantificación de las aguas residuales en buques, detallando su importancia, los factores que afectan los caudales, las metodologías utilizadas en la actualidad y datos reales de generación de aguas residuales en distintos tipos de embarcaciones.

2.4.1 Importancia de la cuantificación

La cuantificación, que se refiere a la medición del volumen generado, permite:

- **Cumplimiento normativo:** asegura que los buques cumplan con estándares del Convenio MARPOL (Anexo IV) y la Directiva Marco del Agua de la UE, que establecen límites sobre la descarga de aguas residuales.
- **Optimización del tratamiento:** conocer el caudal de aguas residuales permite mejorar los sistemas de tratamiento a bordo, reduciendo costos operativos y aumentando la eficiencia de los equipos de filtrado y desinfección.
- **Prevención de contaminación:** un control adecuado evita descargas accidentales y permite planificar descargas en puertos con instalaciones de recepción adecuadas.
- **Gestión logística y autonomía:** es clave para planificar misiones prolongadas, asegurando que los sistemas de almacenamiento y tratamiento tengan la capacidad suficiente para toda la operación, evitando descargas inesperadas en puertos no previstos en la travesía, lo que podría afectar la logística y el desarrollo de la misión.

2.4.2 Factores que afectan los caudales

El volumen de aguas residuales generadas en un buque varía en función de varios factores:

- **Tipo y tamaño del buque:** los buques de guerra, cruceros y mercantes tienen diferentes patrones de consumo y generación de aguas residuales. Un portaaviones genera más aguas residuales que una fragata debido a su mayor dotación y autonomía.
- **Número de dotación:** a mayor cantidad de personas a bordo, mayor será la generación de aguas residuales. Es importante diferenciar entre los periodos en los que el buque está navegando y cuando se encuentra en puerto, ya que la cantidad de aguas generadas varía significativamente. Durante la navegación, toda la dotación permanece a bordo, lo que implica mayor consumo y generación de estas aguas. Sin embargo, en puerto, la tripulación se reduce considerablemente, quedando solo el personal de guardia, lo que representa menos del tercio de la dotación total.
- **Actividad operativa:** los buques en misión prolongada generan más aguas residuales que aquellos en puerto o en mantenimiento, ya que durante la navegación toda la dotación permanece a bordo y los sistemas de tratamiento operan de forma continua. En cambio, cuando un buque está en puerto, en la mayoría de los casos, las aguas residuales no se almacenan ni se tratan a bordo en la misma medida, sino que se descargan directamente en las instalaciones portuarias mediante tuberías o mangueras.
- **Duración de la navegación:** en misiones de larga duración, se requiere una planificación más detallada para garantizar que los sistemas de tratamiento y almacenamiento puedan manejar el volumen generado. A medida que aumenta el tiempo en la mar, la capacidad de los tanques de almacenamiento se reduce, lo que puede afectar la operatividad del buque si no se cuenta con un plan adecuado. Para evitar la sobrecarga de estos sistemas, es

fundamental calcular la producción de residuos, optimizando su tratamiento y programando descargas en instalaciones portuarias.

2.4.3 Tecnologías y métodos de estimación y medición de caudales

Existen diversas tecnologías y métodos empleados para la estimación y medición del caudal en los buques, que varían en función del tipo de buque, el volumen de aguas generadas y los sistemas de tratamiento instalados. Conocer los caudales generados ayuda a determinar la capacidad de los sistemas, gestionar el almacenamiento y garantizar un vertido adecuado.

- **Métodos de estimación de caudales en buques:** cuando no se cuenta con medidores de caudal en tiempo real, se pueden utilizar métodos de estimación indirectos para calcular la cantidad de aguas residuales generadas a bordo.
 - Estimación a partir del consumo de agua potable: se calcula el caudal en función del consumo de agua dulce a bordo. En condiciones normales, entre el 70% y 90% del agua potable consumida se convierte en aguas residuales. Este método es útil en buques sin sensores de caudal, pero no se tienen en cuenta pérdidas de agua o consumos atípicos.
 - Estimación según la dotación y el tipo de buque: existen estudios que establecen rangos promedio de generación de aguas residuales en función del número de tripulantes y pasajeros.
 - Modelos matemáticos y balances hidráulicos: se emplean ecuaciones que consideran datos de consumo, tiempo de operación y tipo de actividades a bordo para estimar el caudal. Estos modelos pueden ajustarse con datos históricos del buque para mejorar su precisión.
- **Tecnologías de medición de caudales en buques [24]:**
 - Caudalímetros electromagnéticos: utilizan la ley de inducción electromagnética de Faraday para medir las aguas residuales. Son precisos y adecuados para líquidos con sólidos en suspensión.
 - Caudalímetros ultrasónicos: emplean ondas sonoras para determinar la velocidad del agua sin contacto directo con el fluido. Son ideales para tuberías de gran diámetro y no generan pérdidas de carga.
 - Caudalímetros de área variable (rotámetros): consisten en un flotador móvil dentro de un tubo cónico que se desplaza según el caudal. Son menos precisos, pero útiles para mediciones rápidas.
 - Sistemas de medición por presión diferencial: miden la diferencia de presión antes y después de una restricción en la tubería.
 - Sensores de caudal con telemetría y monitoreo remoto: incorporan conectividad digital para transmitir datos de caudal a sistemas de control en el puente de mando, facilitando una supervisión constante y optimización de los procesos de tratamiento de aguas residuales.

2.4.4 Valores reales de caudales en buques

En la literatura son escasos los estudios que recogen una medición de los caudales reales de aguas residuales generadas en buques y ninguno de ellos muestra una cuantificación de caudales de dichas aguas en diferentes tipologías de barcos de la Armada.

Según el estudio realizado por la EPA (2011), los valores estimados son [25]:

- **Cruceros grandes** (3500 personas): 170 L/persona/día de aguas grises, con un total anual de 2385 millones de litros.
- **Buques de carga y petroleros** (25 tripulantes): 53-170 L/persona/día, con un total anual de 76-245 millones de litros.
- **Pesqueros comerciales** (7 tripulantes): 170 L/persona/día, con un total anual de 7,84 millones de litros.

La escasez de datos reales en buques pone de manifiesto la necesidad de abordar este estudio y la importancia de la investigación llevada a cabo en el presente Trabajo Fin de Grado.

2.5 Caracterización de aguas residuales

La caracterización de aguas residuales es un proceso esencial para comprender su composición y evaluar su impacto ambiental. Este análisis permite diseñar y aplicar tratamientos adecuados para la depuración de estas aguas antes de su vertido o reutilización. A continuación, se detallan los principales parámetros de caracterización, divididos en fisicoquímicos, microbiológicos y la identificación de contaminantes emergentes.

2.5.1 Parámetros fisicoquímicos

Estos parámetros proporcionan información sobre las propiedades básicas de las aguas residuales y su carga contaminante. Entre los más relevantes se encuentran:

- **pH:** es una medida de la concentración de iones de hidrógeno en el agua e indica su nivel de acidez o alcalinidad. Su escala va de 0 a 14, donde valores extremos pueden afectar la eficacia de los procesos de tratamiento y la vida acuática. El pH influye en la estabilidad de los procesos biológicos y químicos en las aguas residuales, por lo que es esencial mantenerlo dentro de un rango óptimo.

La Tabla 2-2. Clasificación del pH según sus valores y efectos en el tratamiento de aguas (elaboración propia) muestra la clasificación del pH y su impacto en el tratamiento de aguas.

Rango de pH	Clasificación	Características	Eficacia en el tratamiento
pH < 7	Ácido	Mayor concentración de H^+	Si pH es muy bajo, reduce la eficacia del tratamiento, especialmente si este es biológico
pH = 7	Neutro	Equilibrio entre H^+ y OH^-	Rango ideal
pH > 7	Alcalino (básico)	Mayor concentración de OH^-	Si pH es muy alto, los químicos usados en el tratamiento pueden no funcionar bien y se puede generar amoníaco tóxico y poner en riesgo la vida acuática

Tabla 2-2. Clasificación del pH según sus valores y efectos en el tratamiento de aguas (elaboración propia) [26]

- **DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO):** indica la cantidad de sustancias oxidables en el agua, incluyendo materia orgánica biodegradable y no biodegradable. Este parámetro es clave antes de la entrada a la planta de tratamiento de aguas residuales (TAR), ya que permite evaluar la carga contaminante del agua residual y seleccionar el tratamiento más adecuado. La Tabla 2-3 muestra los valores de DQO que se pueden obtener junto con su interpretación y el impacto que tienen en la planta TAR.

Valor de DQO (mg/L)	Interpretación	Impacto en la planta TAR
< 100 mg/L	Baja carga contaminante	Fácil de tratar, menor uso de químicos y energía
100-500 mg/L	Contaminación moderada	Se requiere tratamiento biológico estándar
500-1000 mg/L	Alta carga contaminante	Puede ser necesario pretratamiento
> 1000 mg/L	Muy contaminada	Necesita tratamiento avanzado como una oxidación química

Tabla 2-3. Interpretación de los valores de DQO (elaboración propia) [27]

- **DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO):** parámetro que mide la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para descomponer la materia orgánica presente en el agua durante cinco días. Es un indicador de la carga orgánica biodegradable. Sin embargo, la medición de la DBO es más compleja en comparación con la DQO porque requiere un período de incubación de 5 días, es sensible a variaciones de temperatura y a la presencia de sustancias que pueden inhibir la actividad microbiana, además de que solo mide la materia biodegradable. Debido a estas limitaciones, en el presente proyecto no se ha realizado la medición de este parámetro, priorizando la DQO por ser un método más rápido y fiable para evaluar la carga contaminante del agua residual.
- **SÓLIDOS:** los sólidos presentes en el agua residual pueden clasificarse en sólidos totales (ST), que incluyen tanto los sólidos disueltos como los sólidos en suspensión. Su cuantificación es fundamental para evaluar la calidad del agua y diseñar estrategias de tratamiento adecuadas. Estos se clasifican en (ver Figura 2-7 donde se muestra esquemáticamente la clasificación de los sólidos):



Figura 2-7. Clasificación de los sólidos en las aguas residuales (elaboración propia) [28]

- **Sólidos totales (ST):** representan la suma de todos los sólidos presentes en el agua residual, tanto los disueltos como los suspendidos. Se determinan mediante la evaporación de la muestra y el peso residual obtenido tras la eliminación del agua.
- **Sólidos disueltos totales (SDT):** son aquellos que permanecen en solución y no pueden ser eliminados mediante procesos físicos como la sedimentación o la filtración. Están compuestos por sales minerales, materia orgánica soluble y metales.
 - Sólidos disueltos volátiles (SDV): parte de los SDT que corresponden a materia orgánica disuelta y pueden ser eliminados por procesos biológicos.
 - Sólidos disueltos inorgánicos (SDI): fracción de los SDT compuesta por minerales y sales, los cuales no pueden ser degradados por acción biológica.
- **Sólidos suspendidos totales (SST):** son partículas que no están disueltas en el agua y que pueden sedimentarse o permanecer en suspensión. Se eliminan principalmente mediante procesos de sedimentación, filtración y flotación.
 - Sólidos suspendidos volátiles (SSV): parte de los SST que corresponden a materia orgánica, como restos de alimentos, microorganismos y compuestos biodegradables. Son esenciales en tratamientos biológicos, ya que sirven de sustrato para la actividad microbiana.
 - Sólidos suspendidos inorgánicos (SSI): fracción de los SST formada por partículas minerales y no biodegradables, como arenas, óxidos metálicos y sedimentos arrastrados.

La Tabla 2-4 expresa la interpretación e impacto de los valores de SST.

Valor de SST (mg/L)	Interpretación	Impacto en el tratamiento
< 50 mg/L	Baja carga de sólidos	Fácil de tratar

Valor de SST (mg/L)	Interpretación	Impacto en el tratamiento
50-250 mg/L	Contaminación moderada	Se requiere sedimentación y filtración eficiente
250-500 mg/L	Alta carga de sólidos	Puede causar obstrucción en filtros
> 500 mg/L	Muy contaminada	Necesita pretratamiento intensivo

Tabla 2-4. Interpretación de los valores de SST (elaboración propia) [28]

- **NUTRIENTES:** los dos principales nutrientes presentes en las aguas residuales son el nitrógeno (N) y el fósforo (P), que deben ser cuantificados antes de la entrada a la planta TAR para optimizar su eliminación y evitar problemas ambientales.

El nitrógeno (N) proviene principalmente de [30]:

- Orina y materia fecal, donde se encuentra en forma de amonio (NH_4^+) o urea, que posteriormente se transforma en nitratos y nitritos.
- Detergentes y productos de limpieza, que pueden contener compuestos nitrogenados.
- Residuos de alimentos, especialmente proteínas, que al degradarse liberan nitrógeno orgánico.
- Aguas de refrigeración de algunos sistemas industriales, que pueden aportar nitrógeno en distintas formas.

El fósforo (P) en aguas residuales proviene principalmente de [30]:

- Detergentes y jabones, que contienen fosfatos para mejorar su rendimiento en la limpieza.
- Materia orgánica en descomposición, como restos de alimentos y desechos humanos.
- Procesos industriales, especialmente en la producción de fertilizantes y productos químicos.
- Aguas de lavado y enjuague de maquinaria o superficies en buques, que pueden contener trazas de fósforo.

A continuación, se presenta la Tabla 2-5, donde se muestra la clasificación de estos nutrientes según su concentración e impacto en los procesos de tratamiento y el medio ambiente.

Concentración	Nitrógeno (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Impacto en el tratamiento
Baja	< 10	< 1	Limitación del crecimiento de los microorganismos y efectos en la biodegradación
Moderada	10-50	1-5	Nivel adecuado
Alta	> 50	> 5	Eutroficación (si no se controla)

Tabla 2-5. Interpretación de los valores de nitrógeno y fósforo (elaboración propia)

Como se observa en la Tabla 2-5, niveles demasiado bajos pueden afectar a la actividad microbiana en los procesos biológicos del tratamiento, mientras que concentraciones elevadas pueden provocar problemas ambientales como la eutroficación. La eutroficación es un proceso en el que el exceso de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, provoca un crecimiento descontrolado de algas y otras plantas acuáticas. Este aumento bloquea la entrada de luz solar y reduce el oxígeno disuelto en el agua, afectando a los peces y otros organismos acuáticos, que pueden morir por falta de oxígeno. Un ejemplo de este problema es el Mar Menor, donde en 2016 se produjo el fenómeno “sopa verde” debido al exceso de nutrientes, y en 2019 y 2021 se registraron episodios de mortandad masiva de peces por falta de oxígeno [31]. Estos sucesos muestran la importancia de controlar los niveles de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales antes de su vertido. Como se observa en la Figura 2-8, la acumulación de aguas residuales sin tratamiento genera cambios visibles en el ecosistema marino, afectando la calidad del agua y la vida marina.



Figura 2-8. Consecuencias de la eutrofización en el Mar Menor [32]

- **ACEITES Y GRASAS:** son sustancias que pueden formar películas en la superficie del agua (véase Figura 2-9), afectando al intercambio de oxígeno y la vida acuática. Es importante su caracterización para evitar daños en los sistemas de tratamiento a bordo, ya que los aceites pueden obstruir filtros.



Figura 2-9. Vertido de aceites y grasas en el mar [13]

2.5.2 Parámetros microbiológicos

Al igual que en las aguas residuales urbanas, el agua residual generada en buques no solo contiene materia orgánica y compuestos químicos, sino también microorganismos patógenos que pueden representar un riesgo para la salud de la dotación y el medio marino. Si no se tratan correctamente antes de su carga, pueden contaminar el océano, afectando la biodiversidad y contribuyendo a la propagación de enfermedades. Entre los más importantes se encuentran los siguientes [33] [34]:

- **Coliformes fecales:** son bacterias que viven en los intestinos de las personas y los animales. Su presencia en las aguas residuales indica contaminación con desechos humanos o animales, lo que puede ser una señal de que también hay otros microorganismos peligrosos. Un ejemplo es la *Salmonella*, bacteria que puede causar infecciones intestinales con síntomas como fiebre, vómitos y diarrea. Si las aguas residuales contaminadas no reciben un tratamiento adecuado, pueden afectar a peces y mariscos, facilitando su transmisión a los humanos a través del consumo de productos del mar. Aunque los coliformes fecales no siempre provocan enfermedades, su detección en grandes cantidades indica que el agua podría contener otros patógenos peligrosos, por lo que se usan para evaluar la calidad del agua.
- **Escherichia coli:** bacteria específica del tracto intestinal de humanos y animales de sangre caliente, utilizada como indicador de contaminación fecal.
- **Enterococos:** bacterias que sirven como indicadores de contaminación fecal y son más resistentes en el ambiente acuático que los coliformes.
- **Virus entéricos:** virus que afectan al sistema digestivo y se transmiten a través del agua y alimentos contaminados con materia fecal. Son altamente contagiosos y pueden sobrevivir en el agua durante largos periodos, lo que hace necesario un tratamiento adecuado de las aguas residuales para evitar su propagación.
- **Parásitos:** incluyen huevos de helmintos (gusanos intestinales) que pueden causar infecciones intestinales y enfermedades parasitarias. Pueden sobrevivir en el agua y resistir procesos de desinfección, como la cloración. Su eliminación requiere tratamientos como filtración o radiación ultravioleta.

2.5.3 Contaminantes emergentes en aguas residuales

Los contaminantes emergentes son sustancias químicas detectadas en el medio acuático en concentraciones bajas, pero con posibles efectos adversos en la salud humana y los ecosistemas. Estos compuestos incluyen productos farmacéuticos, antibióticos, hormonas, pesticidas y otras sustancias de uso industrial y doméstico. A diferencia de otros contaminantes más estudiados, los emergentes han comenzado a ser regulados recientemente debido a su persistencia en el agua y a la falta de tratamientos efectivos en las plantas de tratamiento convencionales [35].

Una de las principales fuentes de estos contaminantes son las aguas residuales, ya que las plantas de tratamiento de aguas residuales (TAR) no están diseñadas para eliminarlos completamente. Como resultado, estos compuestos pueden permanecer en el agua tratada y en los lodos residuales, terminando en cuerpos de agua naturales y afectando los ecosistemas acuáticos. Su impacto más preocupante incluye toxicidad para organismos marinos, alteración de procesos biológicos en la fauna acuática y bioacumulación en la cadena alimentaria [36].

Si bien la presencia de estos contaminantes en aguas urbanas e industriales ha sido ampliamente estudiada, en el caso de los buques la información aún es limitada. Estudios recientes han detectado la presencia de fármacos y otros compuestos en las aguas grises y negras generadas en barcos, con diferencias en su composición. Las aguas grises presentan una mayor diversidad de contaminantes en comparación con las aguas negras, donde predominan los antibióticos y fármacos de uso psiquiátrico. En embarcaciones de gran tamaño, como cruceros o buques militares, se han detectado concentraciones

significativas de compuestos como ciprofloxacino y sulfametoxazol, lo que podría contribuir al desarrollo de resistencias bacterianas en el medio marino [36].

Entre los principales grupos de contaminantes emergentes en aguas residuales se encuentran:

- **ANTIINFLAMATORIOS NO ESTEROIDES (AINES):** utilizados ampliamente para tratar el dolor y la inflamación, son uno de los fármacos más detectados en aguas residuales. Su eliminación en los tratamientos convencionales es limitada, lo que permite su acumulación en el medioambiente. Destacan:
 - Ibuprofeno (IBP): analgésico de uso común que se ha encontrado en ríos y mares, con efectos potenciales sobre la fisiología de los peces [37].
 - Naproxeno (NPX): antiinflamatorio de larga duración, difícil de degradar en sistemas de tratamiento convencionales [38].
 - Diclofenaco (DCF): sustancia que ha demostrado ser altamente tóxica para ciertas especies de peces y moluscos, afectando su metabolismo y capacidad reproductiva [39].

En el contexto de los buques, estos fármacos pueden proceder de aguas grises, donde son arrastrados tras el lavado de restos de medicamentos en duchas y lavabos. Su acumulación en zonas portuarias o en vertidos controlados en alta mar puede alterar los ecosistemas marinos, como se ha observado en análisis de aguas residuales de embarcaciones comerciales y de pasajeros [35].

- **ANTIBIÓTICOS:** el vertido de antibióticos en aguas residuales es una preocupación creciente, ya que contribuye al desarrollo de resistencias bacterianas, un problema de salud pública global [40].
 - Macrólidos (azitromicina, claritromicina, eritromicina): se utilizan para tratar infecciones respiratorias y de transmisión sexual, pero pueden alterar la microbiota acuática.
 - Fluoroquinolonas (ciprofloxacino): son antibióticos de amplio espectro que pueden afectar el equilibrio microbiano en aguas naturales.
 - Sulfametoxazol y trimetoprima: se usan en infecciones urinarias y han sido detectados en aguas subterráneas, donde su eliminación es compleja.

En buques, estos antibióticos son vertidos a través de las aguas negras, ya que provienen de excreciones humanas y del uso médico a bordo. En análisis recientes, se han encontrado restos de estos compuestos en aguas residuales de barcos, confirmando que la eliminación de antibióticos en sistemas convencionales no es completa y que su presencia puede favorecer la resistencia microbiana en el océano [35].

- **PSICOFÁRMACOS:** estos compuestos pueden interferir en el comportamiento y fisiología de organismos acuáticos, ya que afectan los sistemas neurológicos de los peces [41].
 - Fluoxetina y citalopram: son inhibidores de la recaptación de serotonina (ISRS) que pueden alterar la actividad cerebral en peces y otros organismos.
 - Carbamazepina: fármaco antiepiléptico que se mantiene estable en el agua durante largos periodos, dificultando su eliminación.
 - Diazepam: ansiolítico con efectos sedantes en organismos acuáticos.

Estos compuestos se han detectado en aguas grises y negras de buques, y estudios recientes indican que su liberación al medio marino podría afectar el comportamiento de especies sensibles, alterando su actividad locomotora y su capacidad de reacción ante depredadores [35].

2.6 Tecnologías de tratamiento en buques

El tratamiento de aguas residuales en buques es un aspecto clave para minimizar el impacto ambiental y cumplir con las normativas internacionales, como el Convenio MARPOL. Existen distintos sistemas de depuración que varían según la naturaleza de los residuos, el tipo de embarcación y las restricciones operativas. A bordo de los buques, las opciones de tratamiento incluyen métodos convencionales, sistemas avanzados y tecnologías específicas adaptadas a las necesidades de la Armada. Además, la creciente preocupación por los contaminantes emergentes ha impulsado el desarrollo de nuevas soluciones para su eliminación.

2.6.1 Métodos convencionales

Los sistemas tradicionales han sido diseñados para eliminar sólidos, reducir materia orgánica y desinfectar el agua antes de su descarga o almacenamiento. Estos sistemas incluyen:

- **Maceración-cloración:** consiste en triturar los sólidos presentes en las aguas negras y luego aplicar un tratamiento químico con cloro para la desinfección. Es un método sencillo y económico, pero puede generar subproductos dañinos como los trihalometanos [6].
- **Coagulación-floculación:** utilizado principalmente para aguas grises y negras, implica la adición de coagulantes para aglomerar partículas en suspensión, facilitando su eliminación. Su principal desventaja es la generación de lodos que requieren una gestión posterior.
- **Filtros de arena y carbón activo:** se emplean como una etapa final en el tratamiento de aguas residuales, ayudando a eliminar sólidos en suspensión y compuestos orgánicos antes del vertido. Aunque no se aplican directamente a las aguas negras, pueden utilizarse tras tratamientos biológicos o fisicoquímicos para mejorar la calidad del efluente. Su efectividad depende del mantenimiento y de la calidad del agua previamente tratada [42].

Estos métodos tienen limitaciones en la eliminación de ciertos contaminantes, lo que ha llevado a la incorporación de sistemas más avanzados en buques modernos.

2.6.2 Sistemas de tratamiento avanzados

Ante las crecientes restricciones ambientales, se han desarrollado tecnologías más eficientes para la depuración de aguas residuales en buques. Entre las más relevantes se encuentran:

- **Biorreactores de membrana (MBR):** combinan un proceso biológico con filtración por membranas para una mayor eliminación de contaminantes. Son compactos, eficientes y generan efluente de alta calidad, aunque su mantenimiento puede ser costoso [43].
- **Ósmosis inversa:** es un proceso utilizado principalmente para la obtención de agua potable, ya que permite eliminar sales y contaminantes disueltos mediante el paso del agua a través de una membrana semipermeable que bloquea las impurezas. Sin embargo, su aplicación en el tratamiento de aguas residuales en buques es inviable debido a su alto coste operativo y elevado consumo energético. Además, requiere un pretratamiento riguroso para evitar daños en las membranas, lo que limita su uso exclusivamente a la desalación y purificación de agua para consumo a bordo [44].
- **Oxidación avanzada (UV/ H_2O_2 , Ozonización):** es un conjunto de procesos químicos diseñados para eliminar contaminantes difíciles de degradar en el agua. Se basa en la generación de radicales hidroxilos ($-OH$), que son moléculas altamente reactivas capaces de destruir contaminantes orgánicos, bacterias y virus [45].

Cada sistema tiene ventajas y desventajas, por lo que la elección depende del tipo de buque, el espacio disponible y los requisitos normativos.

2.6.3 Sistemas en la Armada

Los buques de la Armada Española han ido adaptando sus sistemas de tratamiento de aguas residuales para cumplir con los estándares ambientales. Aunque los buques militares están exentos de ciertas regulaciones civiles, la Armada ha implementado soluciones tecnológicas eficientes para mejorar la calidad del agua tratada antes de su descarga o almacenamiento.

2.6.3.1 Tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizados en la Armada Española

A lo largo de los años, se han instalado distintos tipos de plantas de tratamiento de aguas residuales (TAR) en los buques de la Armada, variando en función de la dotación del buque, el volumen de aguas generadas y las exigencias operativas. Existen dos tipos principales de plantas TAR utilizadas en los buques:

- **Plantas fisicoquímicas:** Son las más utilizadas en la flota debido a su eficiencia y simplicidad operativa. Se emplean en embarcaciones donde la cantidad de aguas residuales generadas no justifica un tratamiento biológico completo. Su funcionamiento se basa en procesos de coagulación, floculación y sedimentación para eliminar sólidos y materia orgánica, seguidos de una etapa de desinfección con hipoclorito sódico u ozono, lo que asegura la eliminación de microorganismos antes del vertido. Este tipo de sistema es común en fragatas, patrulleros y buques de asalto anfibio debido a su menor complejidad y requisitos de mantenimiento, especialmente en aquellos que operan en zonas sensibles donde es fundamental garantizar un adecuado tratamiento antes del vertido. En muchos casos, estos sistemas incluyen una etapa final de filtración para mejorar la calidad del efluente antes de su descarga al mar [46].
- **Sistemas biológicos:** se han implementado en buques de mayor dotación, donde el volumen de aguas residuales es mayor y se requiere un tratamiento más eficiente. Dentro de estos sistemas, se pueden diferenciar aquellos que utilizan biorreactores de membrana (MBR) y los que operan sin membranas [47]. Los sistemas biológicos convencionales emplean microorganismos para degradar la materia orgánica mediante procesos aerobios o anaerobios, sin necesidad de filtración avanzada. Por otro lado, los sistemas con biorreactores de membrana (MBR) combinan la acción de microorganismos con un sistema de filtración que permite una mayor retención de sólidos y contaminantes emergentes, mejorando la calidad del efluente tratado.

Actualmente, el buque logístico *Ysabel* y los dos nuevos buques multipropósito de la Clase *Carnota*, son los únicos que cuentan con este sistema en la Armada Española, debido a su capacidad de operación prolongada y la necesidad de una depuración más eficiente del efluente tratado, contribuyendo así a la reducción del impacto ambiental de las descargas al mar [48].

2.6.3.2 Predominancia y funcionamiento de la planta fisicoquímica (FQ) en la flota española

En la flota de la Armada Española, la gran mayoría de los buques utilizan plantas fisicoquímicas (FQ) para el tratamiento de sus aguas residuales, consolidándose como el sistema estándar debido a su simplicidad operativa y fiabilidad. Estas plantas han sido seleccionadas por su capacidad de adaptación a distintos tipos de embarcaciones y por su facilidad de mantenimiento en comparación con otros sistemas más complejos. El sistema fisicoquímico (FQ), desarrollado por DETEGASA, está diseñado para garantizar un tratamiento eficiente del agua residual antes de su vertido al mar, cumpliendo con las normativas medioambientales, incluyendo el Convenio MARPOL. Su funcionamiento se basa en la

combinación de procesos químicos y físicos que permiten reducir la carga contaminante del efluente tratado. El proceso de tratamiento en la planta FQ se desarrolla en varias etapas fundamentales (ver Figura 2-10):



Figura 2-10. Proceso de tratamiento fisicoquímico en una planta TAR (elaboración propia)

1. **Coagulación y floculación:** Se añaden reactivos químicos que favorecen la unión de partículas en suspensión, facilitando su eliminación.
2. **Sedimentación y filtración:** Los sólidos formados durante la coagulación son separados mediante sedimentación o filtración, reduciendo la carga de impurezas en el efluente.
3. **Desinfección:** Se incorporan agentes desinfectantes como hipoclorito sódico u ozono, que eliminan microorganismos patógenos presentes en el agua residual.
4. **Descarga del efluente:** Una vez completado el tratamiento, el agua residual es descargada al mar cumpliendo con los límites establecidos por la normativa internacional.

El uso generalizado de la planta fisicoquímica en la Armada Española responde a su eficiencia y facilidad de mantenimiento. No obstante, su implementación presenta tanto beneficios como limitaciones que deben ser consideradas en la gestión de aguas residuales a bordo.

Entre las **ventajas** de este sistema destaca:

- ✓ Su diseño compacto, que permite su instalación en buques con espacio reducido.
- ✓ Un mantenimiento sencillo.
- ✓ Consumo energético moderado, convirtiéndolo en una solución operativamente viable.
- ✓ Una operación más simple que los sistemas biológicos, lo que facilita su integración en distintos tipos de embarcaciones sin necesidad de procesos complejos de control microbiológico.

Sin embargo, también presenta **desventajas** como:

- ✗ No eliminación de contaminantes emergentes, lo que podría limitar su efectividad conforme se endurezcan las regulaciones ambientales.

- ⌘ Su funcionamiento depende del almacenamiento y manipulación de productos químicos, lo que puede suponer un reto logístico en determinadas condiciones operativas.
- ⌘ Genera residuos secundarios que requieren una gestión adecuada para evitar impactos ambientales adversos.

2.6.3.3 Buques de la Armada Española y sus sistemas de tratamiento de aguas residuales

La Tabla 2-6 recoge los distintos modelos de plantas TAR utilizadas en la Armada Española, permitiendo visualizar su distribución en distintos tipos de buques. Como se ha mencionado anteriormente, la mayoría de los buques emplean sistemas fisicoquímicos (FQ) debido a su eficiencia y facilidad de mantenimiento. Sin embargo, también se han implementado sistemas biológicos en casos puntuales, como en el buque logístico *Ysabel*, el patrullero *Tarifa* y los buques multipropósito *Cartagena* y *Carnota*, cuyas necesidades operacionales requieren un enfoque diferente en el tratamiento de sus aguas residuales.

Dentro de los sistemas fisicoquímicos, existen diferentes modelos adaptados a la capacidad de cada buque. La designación de cada planta (FQ-15, FQ-24, FQ-36, FQ-50, etc.) hace referencia a su capacidad de procesamiento y al volumen de aguas residuales que pueden tratar. A mayor numeración, mayor capacidad, lo que permite su integración en embarcaciones con mayores necesidades de tratamiento. Estos modelos presentan ligeras diferencias en tamaño, rendimiento y requerimientos operativos, ajustándose a las limitaciones de espacio y autonomía de cada unidad naval.

Uno de los casos más relevantes en la actualización de los sistemas TAR en la Armada es el del Buque Escuela *Juan Sebastián Elcano*, que actualmente cuenta con una planta FQ-50. Sin embargo, tras su regreso del crucero de instrucción, se le instalará una versión mejorada, la FQN-50, con optimizaciones en la eficiencia del proceso y una menor dependencia de reactivos químicos. Este modelo introduce una etapa final de neutralización, que ajusta el pH del efluente antes de su vertido al mar, asegurando su cumplimiento con las normativas ambientales más estrictas.

El sistema FQN-50 no es exclusivo del buque *Juan Sebastián Elcano*, ya que otras unidades de la Armada, como el BAM Audaz (FQN-15), han incorporado versiones similares con el objetivo de mejorar la sostenibilidad del tratamiento de aguas residuales. La tendencia hacia la adopción de estos sistemas refleja la voluntad de la Armada Española de actualizar su tecnología para minimizar el impacto ambiental de sus operaciones.

Además de las unidades actualmente en servicio, las futuras fragatas F-111 (*Bonifaz*) y F-112 (*Roger de Lauria*), que se encuentran en fase de construcción, incorporarán sistemas TAR avanzados que garantizarán un cumplimiento más riguroso de las regulaciones ambientales. Estas nuevas incorporaciones reflejan la evolución en el diseño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, con soluciones tecnológicas más eficientes y alineadas con los estándares ambientales internacionales.

BUQUE	MODELO PLANTA TAR	BUQUE	MODELO PLANTA TAR
ALBORÁN	FQN-15	MÉNDEZ NUÑEZ	FQ-24
ALERTA	FQ-15	METEORO	FQ-15
ALMIRANTE JUAN DE BORBÓN	FQ-24	NAVARRA	FQ-50
ÁLVARO DE BAZÁN	FQ-24	NUMANCIA	FQ-50
ARNOMENDI	FQ-15	PATÍÑO	FQ-24
ATALAYA	FQ-15	RAYO	FQ-15

BUQUE	MODELO PLANTA TAR	BUQUE	MODELO PLANTA TAR
<i>AUDAZ</i>	FQN-15	<i>REINA SOFÍA</i>	FQ-50
<i>BLAS DE LEZO</i>	FQ-24	<i>RELÁMPAGO</i>	FQ-15
<i>BONIFAZ</i>	FQN-36	<i>ROGER DE LAURIA</i>	FQN-36
<i>CANARIAS</i>	FQ-50	<i>SANTA MARÍA</i>	FQ-50
<i>CANTABRIA</i>	FQ-40	<i>SEGURA</i>	FQ-10
<i>CASTILLA</i>	FQ-36	<i>SELLA</i>	FQ-10
<i>CARTAGENA</i>	<i>BSTP</i>	<i>SERVIOLA</i>	FQ-15
<i>CENTINELA</i>	FQ-15	<i>TAJO</i>	FQ-10
<i>CRISTÓBAL COLÓN</i>	FQ-24	<i>TAMBRE</i>	FQ-10
<i>DUERO</i>	FQ-10	<i>TARIFA</i>	STPN-1260
<i>FUROR</i>	FQN-15	<i>TORNADO</i>	FQ-15
<i>GALICIA</i>	FQ-36	<i>TURIA</i>	FQ-10
<i>HESPÉRIDES</i>	FQ-22	<i>VICTORIA</i>	FQ-50
<i>J. S. ELCANO</i>	FQN-50	<i>VIGÍA</i>	FQ-15
<i>JUAN CARLOS I</i>	FQ-125	<i>YSABEL</i>	STPN-1680
<i>LAS PALMAS</i>	FQ-15		

Tabla 2-6. Buques de la Armada y sus modelos de planta TAR (elaboración propia a partir de información de la empresa DETEGASA y [6])

3 DESARROLLO DEL TFG

El presente trabajo se centra en la caracterización y cuantificación de las aguas residuales en buques de la Armada Española antes de su entrada en la planta de tratamiento de aguas residuales (TAR), además de analizar el funcionamiento actual de estas plantas. Para ello, se han seleccionado distintos barcos representativos de la flota, en los que se han tomado muestras para estudiar su composición y evaluar los sistemas de tratamiento empleados.

Además, se ha recopilado información de otras unidades de la Armada Española con el objetivo de ampliar el estudio y contextualizar los datos obtenidos. Este análisis ha permitido cuantificar las aguas residuales generadas, identificar los principales desafíos en su tratamiento, determinar los modelos de plantas TAR en uso y conocer la frecuencia de navegación y la dotación a bordo, aspectos clave para comprender la gestión de estos residuos en operaciones marítimas.

Como muestra la Figura 3-1, este capítulo describe el proceso llevado a cabo en el estudio, abarcando tanto la recopilación de datos como la metodología de muestreo y análisis de laboratorio. Se detallan los puntos de toma de muestra dentro del sistema de cada barco y los métodos utilizados para medir parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, proporcionando una visión integral del estado de las aguas residuales en la flota y su gestión.



Figura 3-1. Pasos seguidos en el desarrollo del trabajo (elaboración propia)

3.1 Gestión de aguas residuales en buques de la Armada Española: recopilación de datos clave

Para complementar la caracterización experimental de las aguas residuales, se ha realizado una recopilación de datos en diferentes unidades navales con el fin de contextualizar los resultados obtenidos en las muestras analizadas. Para ello, se ha contactado con buques de distintos tipos y tamaños, seleccionando unidades que reflejan la diversidad de misiones y configuraciones operativas de la Armada Española.

Para esta selección, se ha utilizado como referencia el documento oficial del LOBA (Lista Oficial de Buques de la Armada) 2025, recientemente actualizado. Sin embargo, dado que la lámina oficial del LOBA 2025 aún no ha sido difundida, se ha trabajado sobre la lámina correspondiente al LOBA 2024 (ver Figura 3-2), que es la que se muestra en este documento. Es importante señalar que esta lámina no incluye todavía a los dos buques multipropósito más recientes, *Carnota* y *Cartagena*, pertenecientes a la clase Carnota.

Los datos técnicos y operativos de una muestra representativa de buques de la Armada Española han sido recogidos y plasmados en una tabla resumen que será presentada en el apartado de resultados. Dicha tabla constituye una herramienta clave para contextualizar la caracterización de las aguas residuales analizadas en este estudio. Para recopilar esta información se ha contactado directamente con oficiales destinados en los buques incluidos, lo que ha permitido obtener datos actualizados sobre el funcionamiento real de los sistemas de recogida y tratamiento de aguas residuales a bordo.

Los parámetros recopilados incluyen: dotación en puerto y en navegación, días de navegación previstos para el año 2025, caudales generados por persona y por tipo de agua residual (grises y negras), sistemas de recogida, modelo y tipo de planta TAR, material de las tuberías y las principales problemáticas detectadas en la gestión de aguas residuales.

Gracias a esta recopilación, se ha podido realizar una comparativa transversal entre buques de diferentes clases y funciones, lo que permitirá analizar cómo influye cada configuración operativa en la generación, recogida y tratamiento de las aguas residuales.

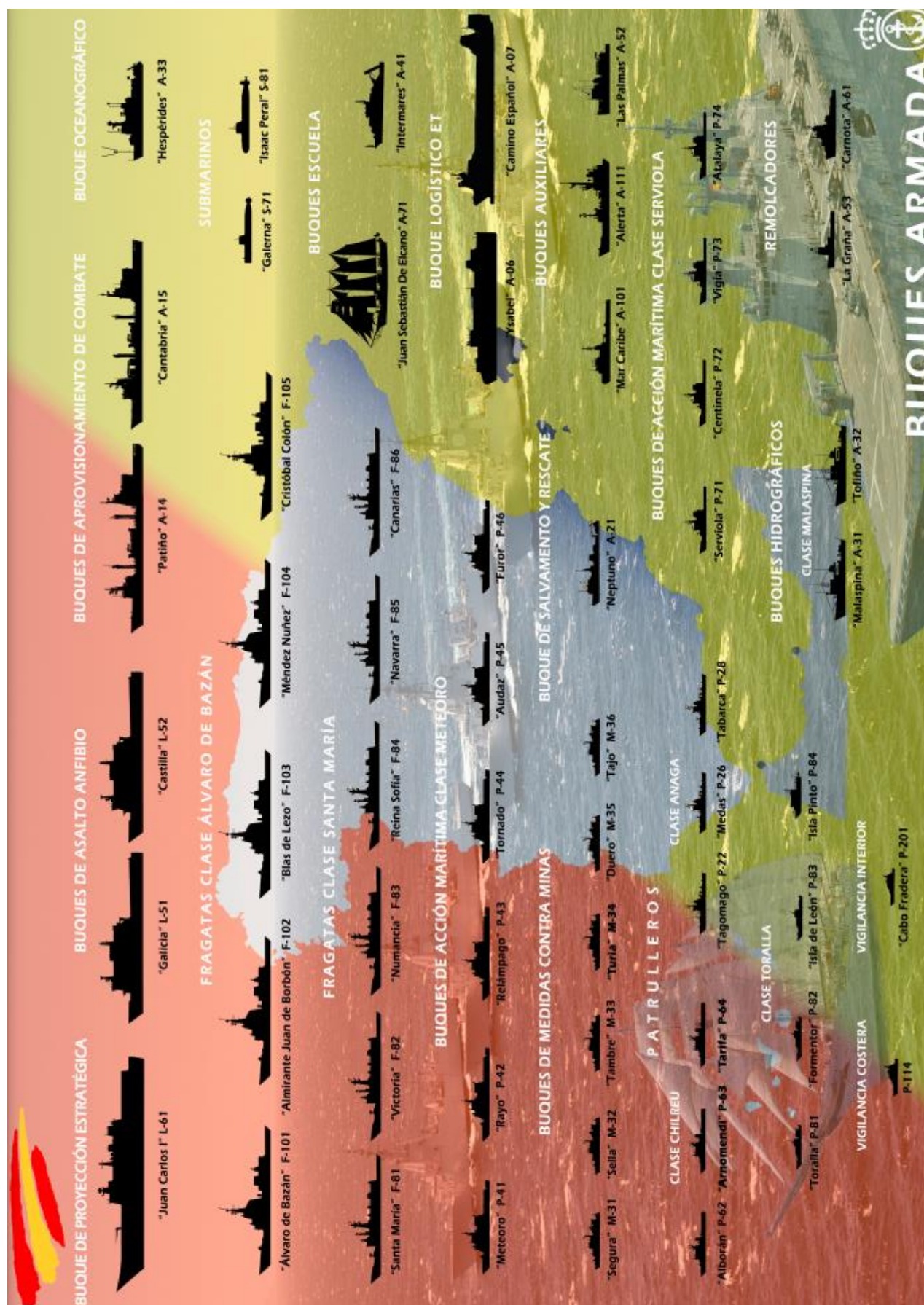


Figura 3-2. Lámina LOBA 2024

3.2 Toma de muestras en buques de la Armada Española

3.2.1 Selección de los buques y planificación de muestreo

Para garantizar un estudio representativo sobre la caracterización y cuantificación de las aguas residuales en buques de la flota española, se seleccionaron diferentes unidades que varían en tamaño, operatividad y número de dotación.

La selección de los buques tuvo en cuenta la representación de cada barco dentro de su clase y misión, la posibilidad de acceso a las muestras dentro de las instalaciones de la Armada y la presencia de diferentes sistemas TAR (fisicoquímicos y biológicos).

Con base en estos criterios, la toma de muestras se realizó en dos grupos:

- Grupo 1: buques visitados en la Base Naval de Ferrol. Se realizó un trabajo de campo en la citada base, donde se tuvo acceso directo a los barcos para la toma de muestras y el estudio de sus sistemas TAR. Los buques seleccionados fueron:
 - **Fragata F-102 “Almirante Juan de Borbón”**: Integrante de la Clase Álvaro de Bazán, esta fragata (ver Figura 3-3), en servicio desde 2003, cumple misiones de defensa antiaérea y guerra antisubmarina [49]. Su sistema de tratamiento es una FQ-24, adaptada a las necesidades operativas del buque.



Figura 3-3. Fragata F-102 "Almirante Juan de Borbón" de la Armada Española [50].

- **Fragata F-105 “Cristóbal Colón”**: incorporada en 2012 (ver Figura 3-4), es la más moderna de la clase Álvaro de Bazán, con mejoras en sistemas de combate y tratamiento de aguas residuales. Cuenta con una FQ-24, similar a la F-102, pero optimizada para una mayor eficiencia operativa.



Figura 3-4. Fragata F-105 "Cristóbal Colón" de la Armada Española [51]

- **Buque de Aprovisionamiento de Combate (BAC) "Cantabria":** en servicio desde 2010, es un buque diseñado para suministrar combustible, munición, repuestos, víveres y otros materiales a las unidades de la Armada Española y fuerzas aliadas en operaciones prolongadas (véase Figura 3-5)[52]. Debido a su gran capacidad logística, está equipado con una planta FQ-40, optimizada para procesar mayores volúmenes de aguas residuales.



Figura 3-5. BAC "Cantabria" (A-15) [52]

Durante la visita, se observó el circuito completo de agua residual en cada barco, desde su generación en baños, cocinas y duchas, hasta su llegada a la planta TAR para su tratamiento, además de facilitar los documentos con la información detallada de dichos sistemas.

- Grupo 2: muestreo en la Base Naval de Rota (Cádiz) y Cartagena. Se contactó con oficiales del destino de máquinas de cuatro buques adicionales, quienes enviaron muestras para su análisis:

- **Fragata F-82 “Victoria”** (Clase Santa María): construida en la década de 1980, esta fragata (ver Figura 3-6) pertenece a la clase Santa María, diseñada para misiones de escolta, vigilancia y defensa aérea [53]. Está equipada con una planta FQ-50, adecuada para su dotación y volumen de generación de aguas residuales.



Figura 3-6. Fragata F-82 "Victoria", perteneciente a la Clase Santa María de la Armada Española [53]

- **Buque de Asalto Anfibio (BAA) “Castilla”**: parte de la clase Galicia, este buque, operativo desde 2000, está diseñado para transportar y desembarcar tropas, vehículos y helicópteros en operaciones de proyección de fuerzas. Sus misiones incluyen operaciones de mantenimiento de la paz y ayuda humanitaria, mediante apoyo médico y quirúrgico en catástrofes naturales [54]. Utiliza una planta FQ-36, diseñada para manejar grandes cantidades de aguas residuales generadas por su numerosa dotación y tropas embarcadas. Ver Figura 3-7, donde se muestra el buque en operación.



Figura 3-7. Buque de Asalto Anfibio "Castilla" (L-52) de la Armada Española [54]

- **Buque de Acción Marítima “Vigía”:** con más de 25 años en servicio, es un buque de patrulla y vigilancia marítima, diseñado para misiones de control de tráfico marítimo, protección de la zona económica exclusiva y lucha contra actividades ilícitas en aguas jurisdiccionales [55]. Dado su tamaño reducido (véase Figura 3-8) y su menor volumen de generación de aguas residuales, este buque emplea una planta FQ-15, optimizada para embarcaciones con menor dotación a bordo.



Figura 3-8. Patrullero de altura "Vigía" (P-73) [55]

- **Buque multipropósito “Cartagena” (A-62):** adquirido de segunda mano en octubre de 2024 (ver
- Figura 3-9), es el segundo buque de la clase Carnota. Está especializado en misiones de patrulla, seguridad y operaciones de vigilancia, además de servir como remolque de altura [56]. A diferencia de la mayoría de los buques de la Armada, el Cartagena cuenta con un sistema biológico con desinfección UV, lo que mejora la eliminación de materia orgánica sin necesidad de productos químicos. Su planta BSTP (Biological Sewage Treatment Plant) permite un tratamiento más eficiente del efluente y reduce el impacto ambiental de sus descargas.



Figura 3-9. Buque multipropósito "Cartagena" (A-62) [57]

Para facilitar la comparación, a continuación, se presenta la Tabla 3-1 con los principales datos de cada uno de los 7 buques muestreados.

BUQUE	CLASE	DIMENSIONES	OPERATIVIDAD	SISTEMA TAR	MODELO PLANTA TAR	FABRICANTE
ALMIRANTE JUAN DE BORBÓN	Álvaro de Bazán	146 m	Fragata multipropósito	Fisicoquímico	FQ-24	DETEGASA
CANTABRIA	Buque logístico	174 m	Aprovisionamiento para el combate	Fisicoquímico	FQ-40	DETEGASA
CASTILLA	Asalto anfibio	160 m	Transporte y desembarco	Fisicoquímico	FQ-36	DETEGASA
CARTAGENA	Multipropósito	70 m	Patrulla, seguridad y vigilancia, remolque de altura	Biológico	BSTPM 5.55	ECOMOTIVE AS NORWAY
CRISTÓBAL COLÓN	Álvaro de Bazán	146 m	Fragata avanzada	Fisicoquímico	FQ-24	DETEGASA
VICTORIA	Santa María	138 m	Fragata escolta	Fisicoquímico	FQ-50	DETEGASA
VIGÍA	Acción marítima	68 m	Patrullero de vigilancia	Fisicoquímico	FQ-15	DETEGASA

Tabla 3-1. Características de los buques seleccionados para muestreo (elaboración propia)

3.2.2 Puntos de toma de muestras

El muestreo de las aguas residuales se llevó a cabo en la entrada de la planta TAR de cada buque, con el objetivo de garantizar que las muestras analizadas no hubieran sido sometidas a ningún tipo de tratamiento previo. Este procedimiento permite obtener una caracterización precisa de las aguas residuales generadas a bordo, reflejando sus condiciones originales antes del proceso de depuración (ver Figura 3-10, donde se presenta la recogida de muestras en uno de los buques seleccionados).

En cada buque, se identificaron válvulas específicas dentro del sistema TAR que permitieron la extracción del agua residual en su estado original. En la mayoría de los casos, las muestras se tomaron directamente de las líneas de entrada a la planta TAR, lo que asegura que los parámetros analizados correspondan a las condiciones reales del efluente antes de ser tratado.



Figura 3-10. Recogida de muestras en la fragata F-102 "Almirante Juan de Borbón"

Las siguientes imágenes recogen los esquemas de ubicación de los puntos de extracción de aguas residuales a bordo de varios de los buques incluidos en este estudio. Estos planos permiten identificar de forma clara y visual los lugares específicos en los que se han tomado las muestras analizadas posteriormente en laboratorio, lo que aporta contexto técnico a la caracterización realizada.

La inclusión de estos esquemas responde a la disponibilidad de documentación técnica y al acceso autorizado por parte de los responsables de cada unidad. En aquellos buques en los que no ha sido posible disponer de planos internos, la información de los puntos de muestreo se ha documentado de forma descriptiva pero no gráfica.

En el caso de la fragata *Almirante Juan de Borbón*, la toma de muestra de aguas residuales se realizó en una válvula situada justo antes de la bomba de vacío n.º 1, dentro del sistema de recogida de aguas negras del buque. Este punto fue elegido por ofrecer una muestra representativa del flujo previo al tratamiento, sin interferencias por parte de aditivos ni procesos intermedios. La Figura 3-11 muestra el plano correspondiente, en el que el punto de muestreo se encuentra señalado con un círculo rojo para facilitar su identificación.

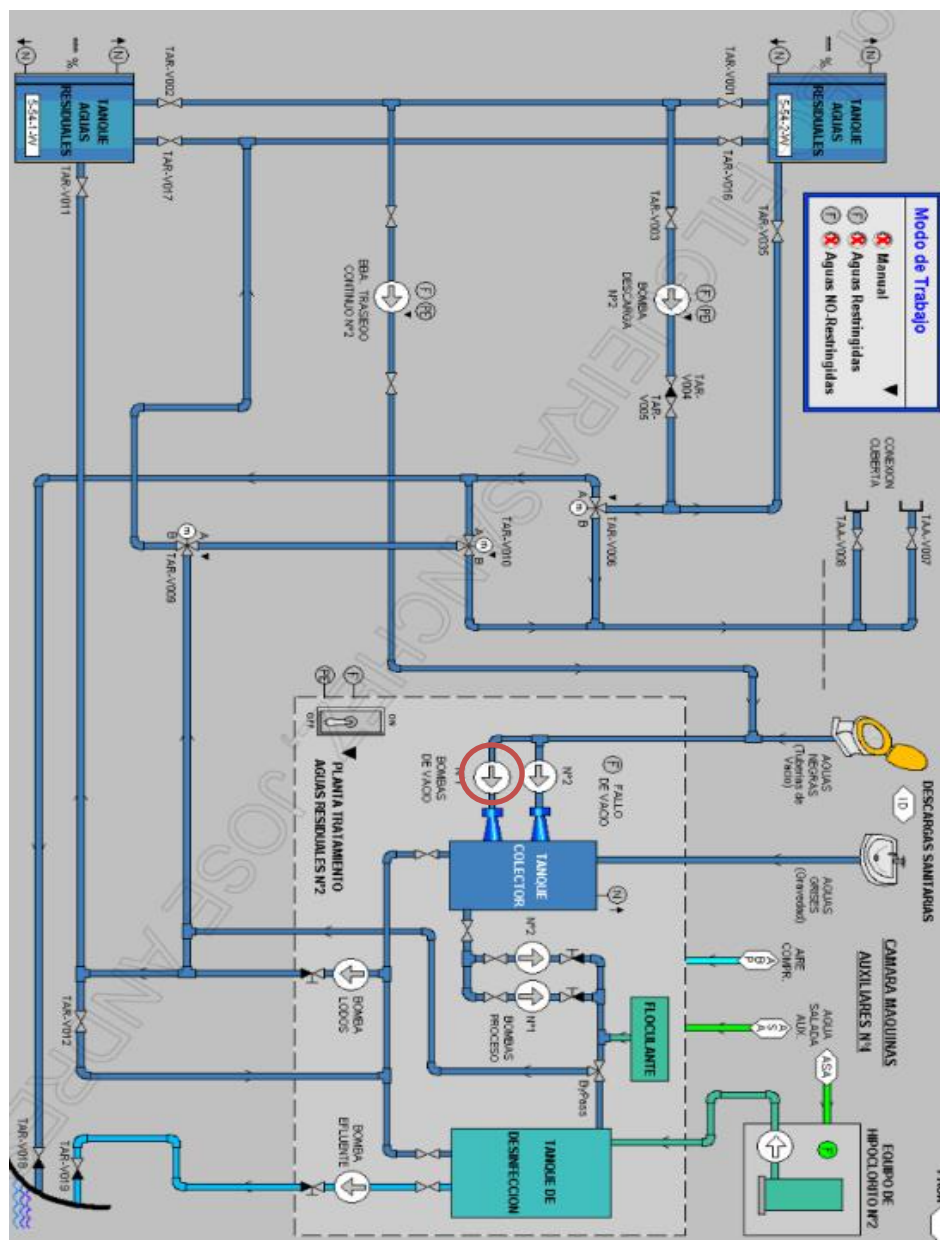


Figura 3-11. Plano planta TAR de la fragata F-102 “Almirante Juan de Borbón”

Con respecto al buque de aprovisionamiento en combate *Cantabria*, la toma de muestra de aguas residuales se realizó en la bomba de vacío situada inmediatamente antes del tanque colector, punto que concentra el flujo de aguas negras y grises antes de su almacenamiento y tratamiento. Este punto fue seleccionado por su accesibilidad y por representar adecuadamente las condiciones del efluente sin tratar. En la Figura 3-12 se presenta el plano correspondiente, donde el punto de muestreo ha sido señalado con un círculo rojo para facilitar su localización.

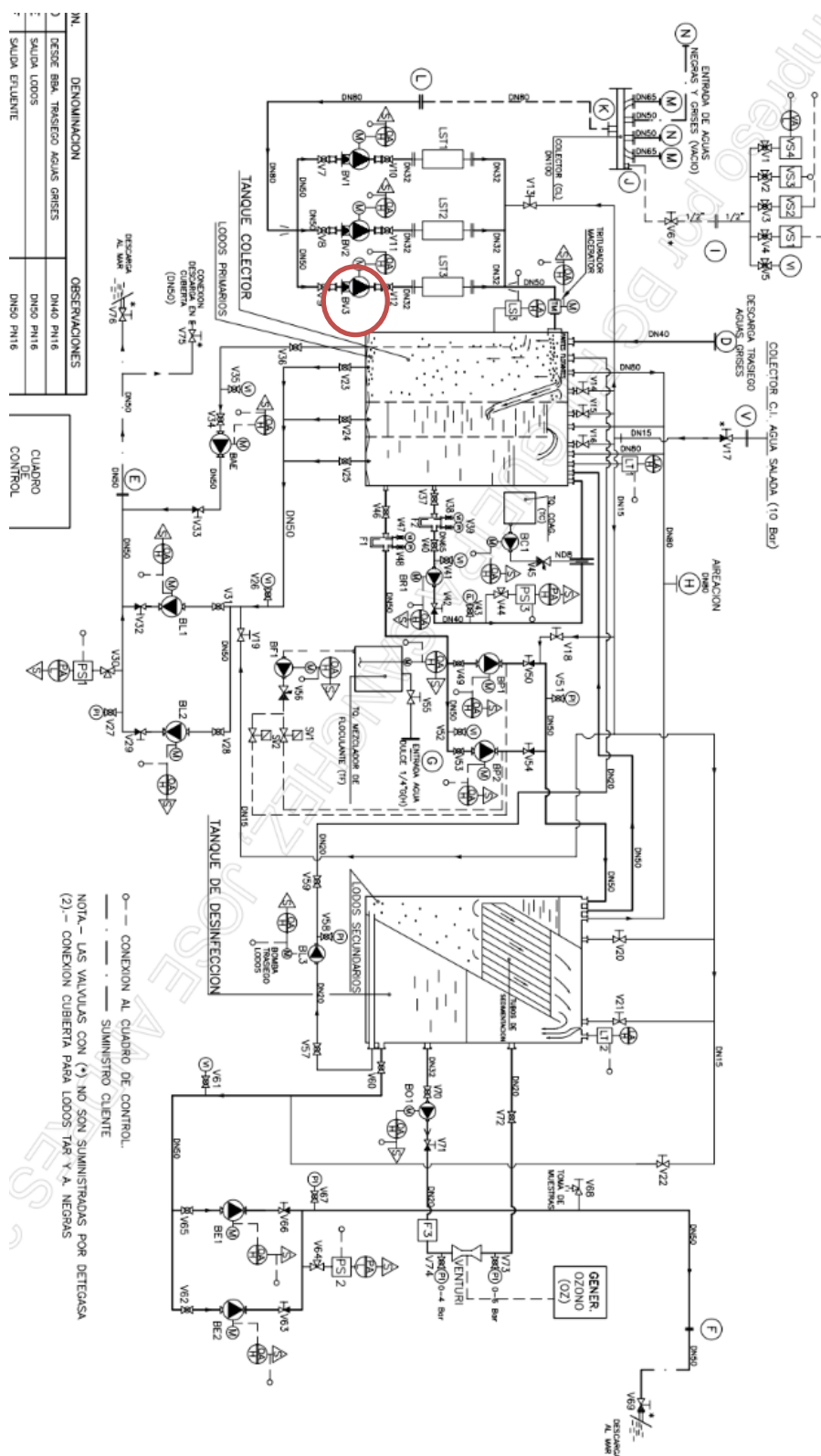


Figura 3-12. Plano planta TAR del BAC "Cantabria"

En el caso de la fragata *Victoria*, la muestra de aguas residuales se extrajo directamente desde la bomba de trasiego de lodos, ubicada en el sistema de tratamiento del buque. Este punto se seleccionó por ser representativo del caudal que se dirige hacia la planta TAR, permitiendo obtener una muestra mixta de aguas negras y grises previa al tratamiento. La ubicación exacta de este punto de muestreo se

puede observar en la Figura 3-13, donde se esquematiza el recorrido de las aguas residuales y su recolección en el sistema del buque.

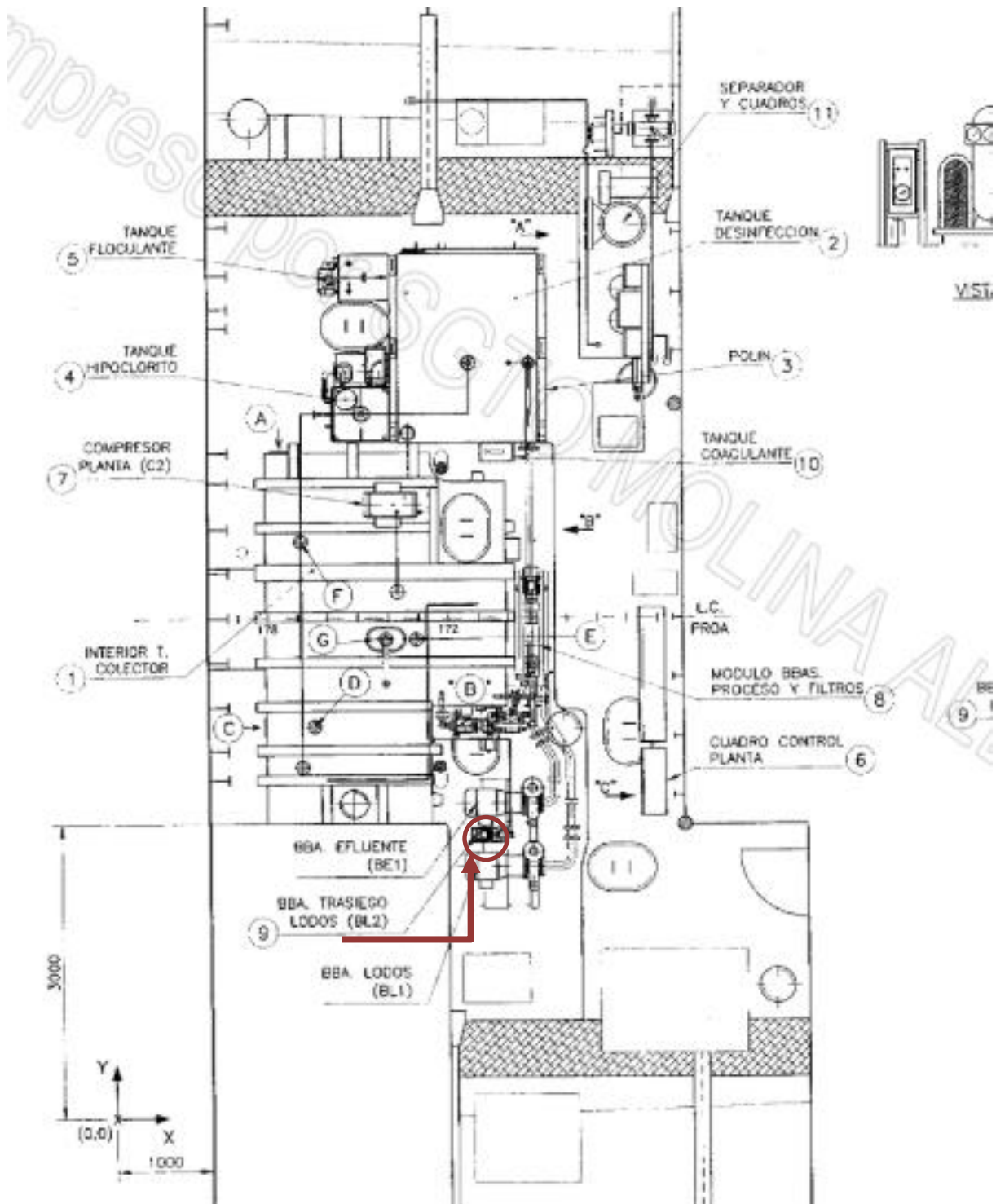


Figura 3-13. Plano planta TAR de la fragata F-82 "Victoria"

En el buque de asalto anfibio *Castilla*, la muestra se tomó de una válvula de entrada al tanque colector. Este punto, reflejado en Figura 3-14, fue elegido por las mismas razones que en los buques anteriores.

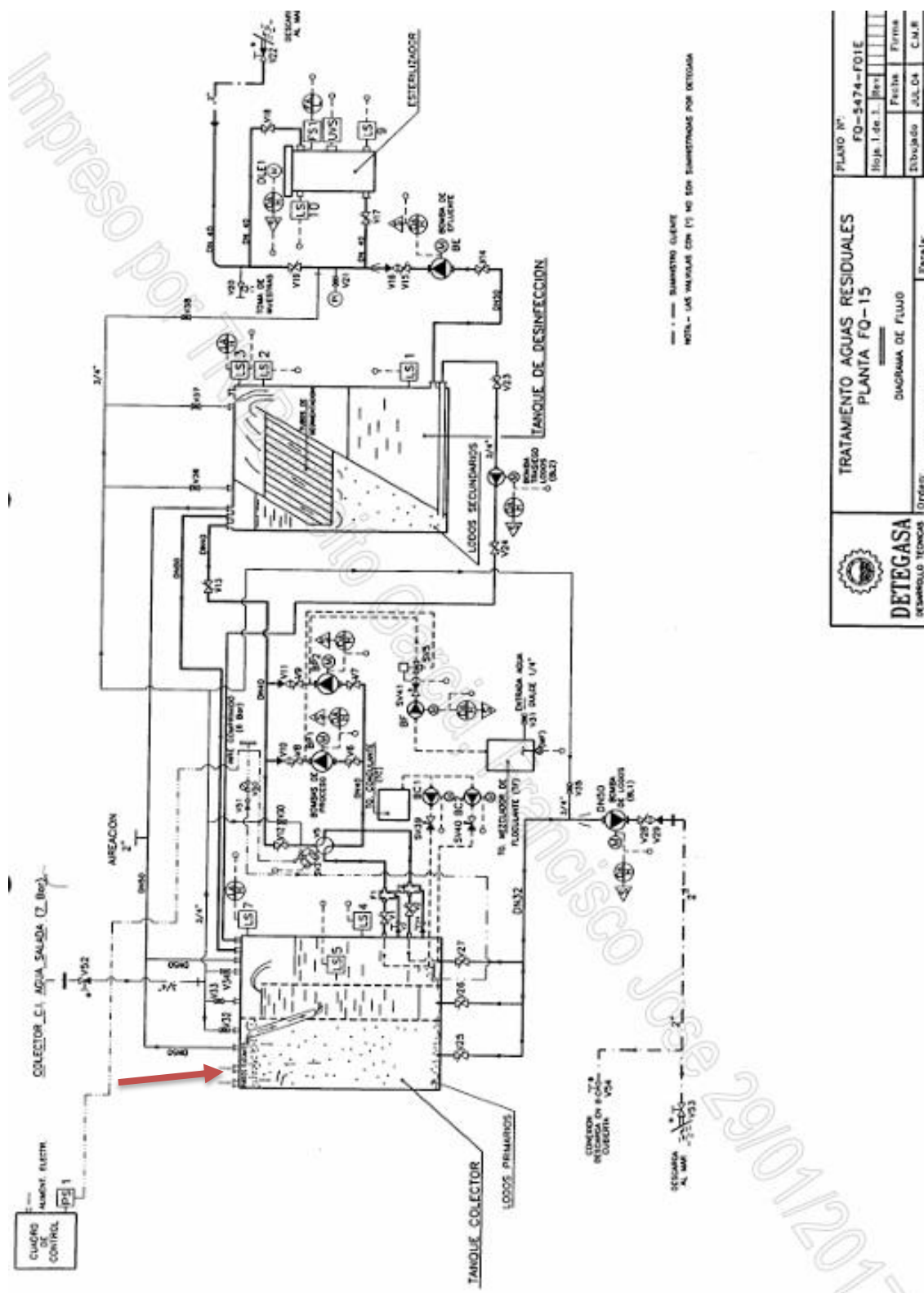


Figura 3-15. Plano planta TAR del patrullero "Vigía"

En cuanto a la fragata *Cristóbal Colón*, la muestra de aguas residuales se extrajo a través de la bomba de vacío situada justo antes de la entrada al tanque colector, dentro del sistema de recogida. Este punto permitió obtener una muestra representativa de la mezcla de aguas grises y negras antes de su

almacenamiento intermedio y posterior tratamiento. En la Figura 3-16 se muestra el plano correspondiente del sistema, en el que el punto exacto de muestreo se encuentra señalado con un círculo rojo.

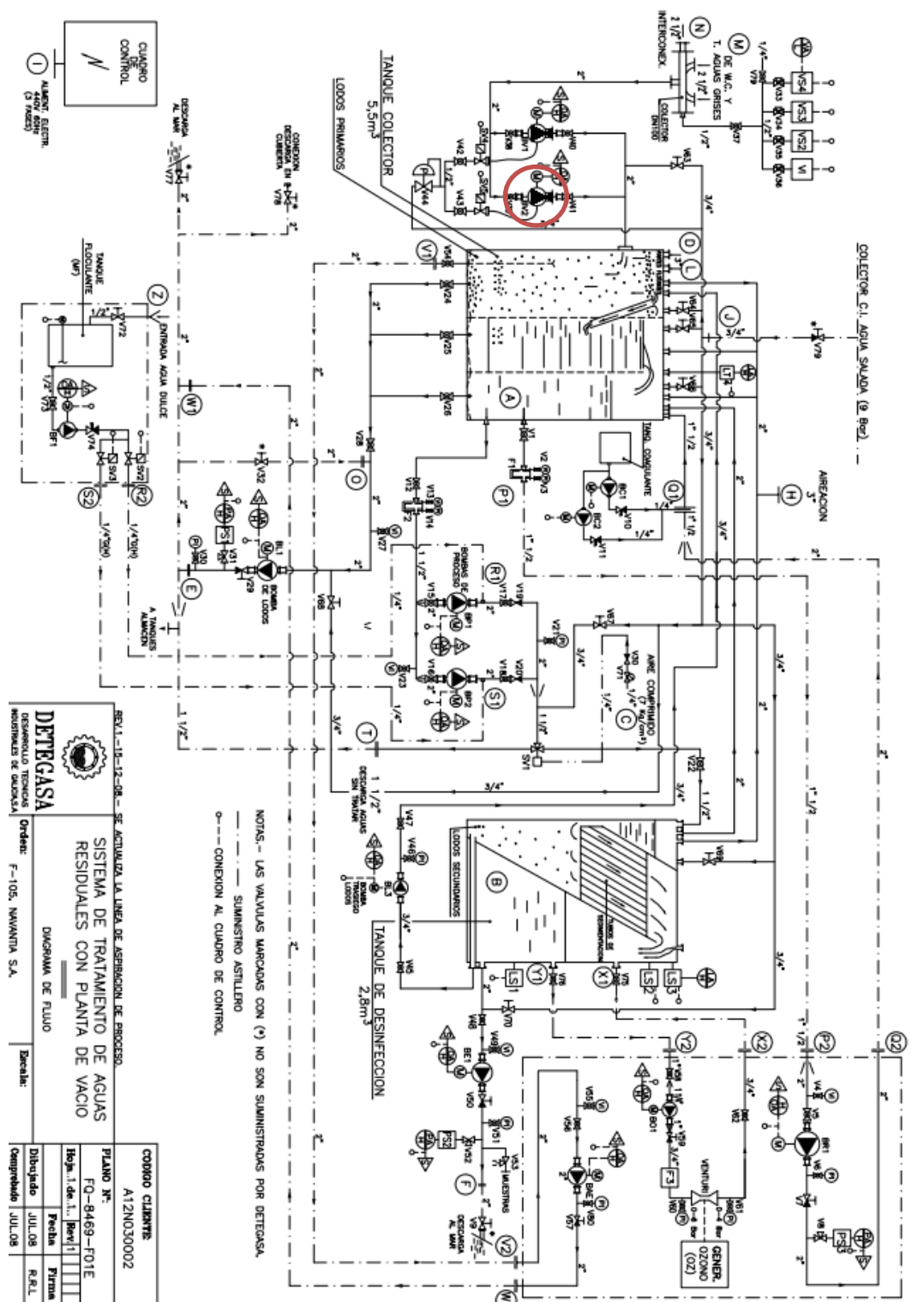


Figura 3-16. Plano planta TAR de la fragata F-105 " Cristóbal Colón"

En el caso del buque multipropósito *Cartagena*, no se dispone de planos técnicos detallados del sistema de tratamiento de aguas residuales (planta TAR), lo que ha impedido representar gráficamente los puntos de muestreo como en los demás buques. Sin embargo, la toma de muestras se realizó en la

bomba situada justo antes del tanque colector, punto común en el circuito de recogida de aguas residuales que permite obtener una muestra representativa de la mezcla de aguas negras y grises, previa a su almacenamiento y tratamiento.

3.3 Caracterización de aguas residuales

Una vez recogidas las muestras de aguas residuales de los buques, se trasladaron al laboratorio para su análisis. Se evaluaron distintos parámetros que permiten caracterizar la calidad del agua antes de su tratamiento en la planta TAR. Estos incluyen pH, turbidez, sólidos, demanda química de oxígeno (DQO) y concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo). Cada uno de estos parámetros proporciona información clave sobre la composición del agua residual y su posible impacto en el sistema de tratamiento y en el medio ambiente si fuera descargada sin un adecuado procesamiento. Para garantizar la fiabilidad de los resultados, todos los análisis se realizaron por duplicado o triplicado.

A continuación, se detallan los métodos analíticos utilizados para cada parámetro, explicando su importancia y el procedimiento seguido en el laboratorio.

3.3.1 Medición de pH

Para medir el pH en las muestras, se utilizó un pH-metro digital modelo *Hanna Instruments Edge pH*, junto con su electrodo específico, garantizando precisión en los valores obtenidos. Para ello, se introdujo el electrodo en la muestra de agua residual (ver Figura 3-17) y a continuación se esperó a la estabilización del valor para registrar el resultado obtenido.

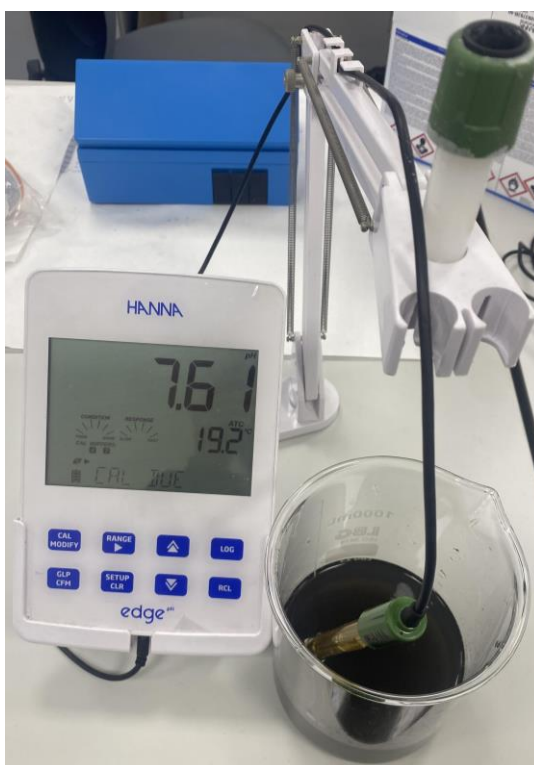


Figura 3-17. Medición de pH con pH-metro digital

3.3.2 Medición de turbidez

La turbidez se midió utilizando un turbidímetro, que proporciona valores en unidades nefelométricas de turbidez (NTU) [58]. Para ello, la muestra de agua fue introducida en una cubeta de vidrio óptico de

10 mL (ver Figura 3-18, izquierda) y posteriormente analizada con el turbidímetro (ver Figura 3-18, derecha).



Figura 3-18. Análisis de turbidez en muestras de agua: muestra de sedimentos y medición

3.3.3 Determinación de sólidos

El análisis de sólidos en las aguas residuales es un parámetro fundamental para evaluar su carga contaminante y determinar la eficiencia de los procesos de tratamiento. Dentro de este estudio, se han cuantificado los sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y sólidos inorgánicos (SI) mediante el uso de crisoles, y sólidos en suspensión totales (SST), inorgánicos (SSI) y volátiles (SSV) mediante el uso de filtros.

Estos ensayos permiten obtener información clave sobre la fracción de sólidos presentes en la muestra, su composición y su impacto en los sistemas de depuración. Además, para reducir el margen de error y mejorar la fiabilidad de los resultados, se realizaron tres réplicas por cada muestra de agua residual de cada buque, asegurando una mejor precisión en los cálculos, los cuales fueron procesados en Excel.

3.3.3.1 Determinación de sólidos totales

Este procedimiento permite cuantificar los sólidos totales (ST), sólidos inorgánicos (SI) y sólidos volátiles (SV) presentes en la muestra de agua residual a través de un proceso de secado y calcinación en mufla (ver Figura 3-19).

El procedimiento fue el siguiente:

1. **Preparación de los crisoles.** Antes de su uso, los crisoles fueron introducidos en la mufla a 550 °C durante 15 minutos para eliminar impurezas y garantizar mediciones precisas (este paso es crucial para evitar residuos que puedan afectar al peso final y generar errores en los cálculos). Una vez enfriados en el desecador, se pesaron con una balanza analítica y se registró su peso inicial.
2. **Secado y obtención de sólidos totales.** Se vertió un volumen determinado (5 mL) de muestra de agua residual en cada crisol. Los crisoles con la muestra fueron introducidos en la estufa a 105 °C durante 8 horas para evaporar el agua. Una vez seco el contenido, se pesaron nuevamente para obtener la masa de ST.

3. **Calcinación y obtención de sólidos inorgánicos y volátiles.** Los crisoles fueron reintroducidos en la mufla a 550 °C durante 30 minutos. Tras la calcinación de la materia orgánica, se pesaron nuevamente para determinar los sólidos inorgánicos. La diferencia entre los sólidos totales y los sólidos inorgánicos permitió calcular los sólidos volátiles, que corresponden a la fracción orgánica de la muestra.

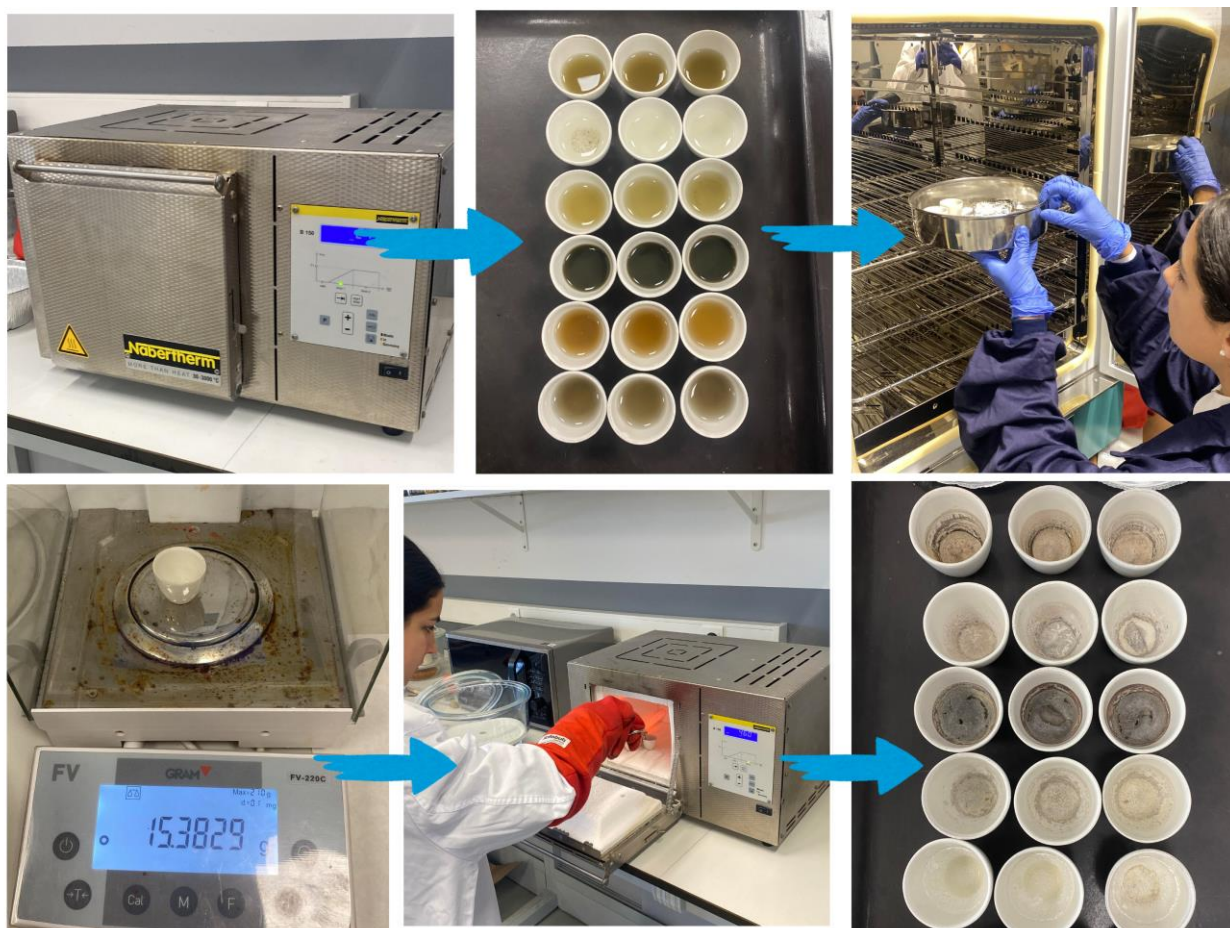


Figura 3-19. Determinación de sólidos totales (elaboración propia)

3.3.3.2 Determinación de sólidos en suspensión

Este método permite calcular los sólidos suspendidos en el agua residual utilizando filtración y calcinación, diferenciando las fracciones de sólidos en suspensión totales (SST), inorgánicos (SSI) y volátiles (SSV) retenidas en los filtros.

Los pasos seguidos para conseguir los citados valores fueron (ver Figura 3-20):

1. **Preparación de los filtros.** Antes de la filtración, los filtros fueron introducidos en la mufla a 550 °C durante 15 minutos, con el objetivo de eliminar residuos orgánicos y estabilizar su peso. A continuación, se pesaron los filtros en la balanza analítica y se registró su peso inicial.
2. **Filtración y obtención de sólidos suspendidos.** Se pasó un volumen determinado (entre 10 y 30 mL, según la muestra) de agua residual a través del filtro, permitiendo la retención de sólidos suspendidos. Posteriormente, los filtros con la muestra retenida fueron introducidos en la estufa a 105 °C durante 8 horas para eliminar el agua y obtener los sólidos suspendidos totales (SST). Luego, se pesaron los filtros secos, obteniendo la masa de sólidos suspendidos.

- 3. Calcinación y obtención de sólidos inorgánicos y volátiles.** Los filtros fueron reintroducidos en la mufla a 550 °C durante 15 minutos para quemar la materia orgánica retenida. Se pesaron nuevamente para obtener la fracción inorgánica. La diferencia entre los SST y los SSI permitió calcular los SSV.

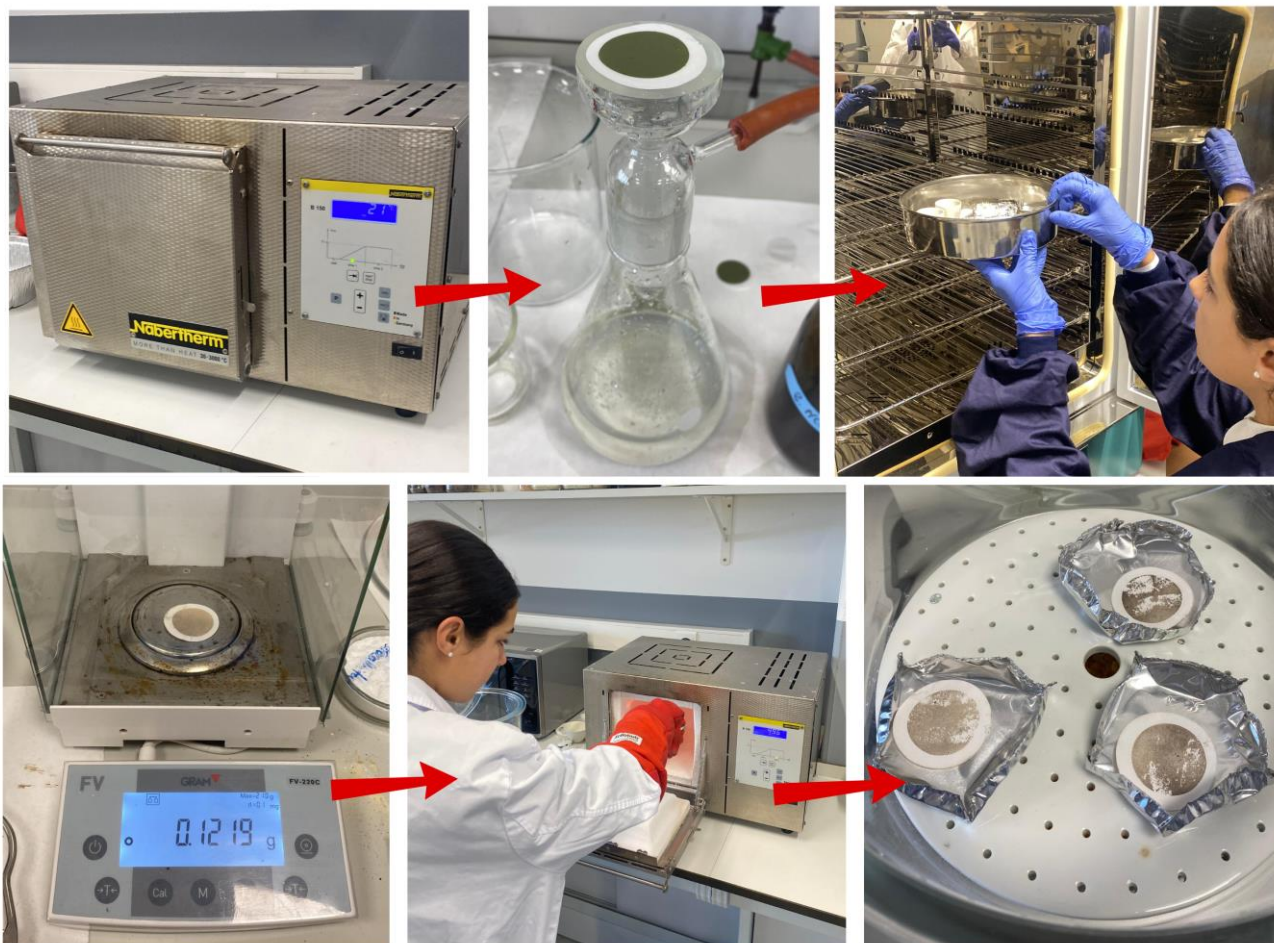


Figura 3-20. Determinación de sólidos en suspensión (elaboración propia)

3.3.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro fundamental en la evaluación de la calidad de las aguas residuales, y que mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica presente en una muestra mediante un reactivo químico fuerte, como el dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$). Este análisis es esencial para determinar la carga contaminante del agua y la eficacia del tratamiento aplicado antes de su vertido.

Valores elevados de DQO indican una alta concentración de materia orgánica, lo que puede afectar la calidad del agua y contribuir a la contaminación ambiental.

La medición de la DQO se realizó mediante un proceso de digestión térmica y valoración redox, en el cual se oxidó la materia orgánica con dicromato potásico en medio ácido y posteriormente se valoró el exceso de dicromato con una disolución de sulfato ferroso amónico (FAS). Los pasos seguidos fueron (ver Figura 3-21):

- 1. Preparación de tubos de ensayo.** Se tomaron dos tubos de ensayo y se identificaron correctamente. En el tubo 1 (blanco) se añadieron 2,5 mL de agua destilada, mientras que en el tubo 2 (muestra) se añadieron 2,5 mL de agua residual. Este paso es fundamental, ya que el blanco permite corregir posibles interferencias y establecer una referencia para la medición.

2. **Adición de reactivos oxidantes.** A cada tubo se añadieron 1,5 mL de disolución digestora ($K_2Cr_2O_7 + HgSO_4$) y 3,5 mL de disolución catalítica ($H_2SO_4 + Ag_2SO_4$), las cuales favorecen la oxidación de la materia orgánica. Esta disolución se vertió lentamente por la pared del tubo para evitar las reacciones bruscas.
3. **Digestión térmica de la muestra.** Los tubos fueron cerrados herméticamente, asegurando un cierre seguro con cinta de teflón en la rosca. Se agitaron suavemente y se colocaron en un bloque digestor a 150 °C durante 1 hora, permitiendo la completa oxidación de la materia orgánica.
4. **Valoración del exceso de dicromato.** Una vez completada la digestión, el contenido de los tubos se vertió en un matraz Erlenmeyer de 50 mL, enjuagando los restos con agua destilada. Luego, se añadieron 2 gotas de ferroína como indicador redox y se tituló con FAS hasta que la solución cambió de color azul verdoso a rojo, lo que indica el punto final de la reacción.

Como se ha comentado anteriormente, el tubo del blanco es un componente fundamental en la medición de DQO, y su valor debe ser menor que el de la muestra, ya que representa la cantidad de reactivo consumido en ausencia de materia orgánica. Esto permite calcular la DQO real comparando la diferencia entre el volumen de FAS consumido en la valoración del blanco (B) y el volumen consumido en la muestra (A), mediante la ecuación:

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

Donde:

- B: volumen de FAS consumido en el blanco (mL)
- A: volumen de FAS consumido en la muestra de agua residual (mL)
- N_{FAS} : normalidad de la disolución de FAS (0,0035 N)
- $V_{muestra}$: volumen de la muestra analizada (2,5 mL)
- 8: factor de conversión de mg O_2 por miliequivalente de reactivo

El último paso a realizar tras la operación anterior sería multiplicar el resultado por el factor de dilución utilizado.



Figura 3-21. Procedimiento de digestión térmica para la cuantificación de DQO (elaboración propia)

3.3.5 Cuantificación de nitrógeno

En este estudio, se ha utilizado el método de persulfato para la digestión y posterior medición del nitrógeno total, siguiendo el protocolo HANNA (HI94767B-50) de rango alto para concentraciones de 10-50 mg/L. Este método, basado en la adaptación del ácido cromotrópico, convierte todas las formas de nitrógeno en nitrato, cuya reacción con los reactivos genera un tinte amarillo medido colorimétricamente. Los viales predosificados reducen el tiempo de preparación y minimizan la manipulación de químicos. Además, el sistema de códigos de barras de Hanna permite la identificación automática del método y el rango de la muestra, optimizando la precisión del análisis [59].

La determinación del nitrógeno total se llevó a cabo mediante una digestión térmica y análisis espectrofotométrico, siguiendo los pasos detallados a continuación [60]:

1. **Preparación del vial reactivo.** Se tomó un vial HI94767B-B al que se añadió un sobre de PERSULFATO/N, compuesto necesario para la oxidación de todas las formas de nitrógeno presentes en la muestra.
2. **Adición de la muestra.** Se incorporaron 0,5 mL de la muestra de agua residual en el vial reactivo, inclinándolo 45° para facilitar la disolución con los reactivos. En paralelo, se preparó un vial en blanco utilizando agua destilada en lugar de la muestra, con el propósito de eliminar cualquier interferencia en la medición y establecer un punto de referencia para la calibración del espectrofotómetro.
3. **Agitación inicial y digestión térmica.** Tras la adición de la muestra, se agitó vigorosamente durante 30 segundos para garantizar una mezcla homogénea. Posteriormente, se introdujo en un digestor térmico a 105 °C durante 30 minutos, permitiendo la conversión de nitrógeno orgánico e inorgánico en una forma detectable.
4. **Enfriamiento y estabilización.** Una vez finalizado el proceso de digestión, se dejaron los viales a temperatura ambiente hasta su enfriamiento. Posteriormente, se añadió un sobre de BISULFITO/N, necesario para la reacción colorimétrica, y se agitó suavemente durante 20 segundos. Luego, se esperaron 3 minutos para estabilizar la reacción química.
5. **Adición del reactivo de desarrollo.** Se incorporó un sobre de HL93767-0 Reactivo Nitrógeno Total en el vial y se agitó nuevamente durante 20 segundos, asegurando la correcta disolución del reactivo. Tras este paso, se dejó reposar durante 2 minutos.
6. **Transferencia de la muestra al vial de la lectura.** Se tomaron 2 mL de la muestra digerida y se transfirieron a un vial HI94766V-OLR, el cual se utilizaría para la medición espectrofotométrica.
7. **Homogeneización y preparación para la medición.** El vial se agitó suavemente 10 veces para asegurar una correcta distribución de los reactivos y posteriormente se dejó reposar durante 5 minutos antes de la medición.
8. **Lectura espectrofotométrica.** Se limpió el vial de referencia (blanco) y se colocó en el espectrofotómetro, pulsando la opción ZERO para establecer la calibración de la medición. Luego, se insertó el vial de muestra y se pulsó READ, obteniendo así la concentración de nitrógeno total en la muestra.

En la Figura 3-22 se muestran los pasos comentados anteriormente para realizar la cuantificación del nitrógeno.



Figura 3-22. Proceso seguido para la cuantificación del nitrógeno (elaboración propia)

3.3.6 Análisis de fósforo

Para este estudio, se utilizó el protocolo HANNA (HI94763B-50) de rango alto para concentraciones de 0 a 32,6 mg/L de fósforo, permitiendo la detección de todas las formas de fosfatos. Mediante digestión con persulfato, los fosfatos orgánicos e inorgánicos se convierten en ortofosfato, que reacciona con molibdovanadato formando un tinte amarillo medido colorimétricamente. La muestra se calienta a 150 °C durante 30 minutos con viales predosificados, reduciendo el tiempo de preparación y evitando la manipulación de reactivos. Además, el sistema de códigos de barras de Hanna identifica automáticamente el método y el lote de reactivos, optimizando la precisión del análisis [61].

La determinación del fósforo total se realizó mediante una digestión térmica y medición espectrofotométrica, siguiendo los siguientes pasos:

- 1. Preparación del vial reactivo.** Se tomó un vial HI94758V-0HR y se añadieron 5 ml de muestra de agua residual, inclinándolo el vial 45° para facilitar la dosificación de los reactivos. Luego, se agregó un sobre de PERSULFATO/P, necesario para la oxidación de los compuestos de fósforo presentes en la muestra.
- 2. Disolución de reactivos y digestión térmica.** Se agitó suavemente el vial hasta que el reactivo se disolviera completamente y se procedió a calentar los viales en un digestor térmico a 150 °C durante 30 minutos. Este paso garantiza la conversión de todas las formas de fósforo en ortofosfatos, facilitando su posterior detección.
- 3. Enfriamiento y ajuste de pH.** Tras la digestión térmica, los viales se dejaron enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente. Posteriormente, se añadieron 2,0 mL de HI93758C-0 (solución de NaOH), inclinándolo el vial a 45°, lo que permite ajustar el pH para la correcta reacción colorimétrica.
- 4. Reacción colorimétrica.** Se incorporaron 0,5 mL de reactivo HI93763B-0 (Reactivo Fósforo Total HR), inclinándolo nuevamente el vial para facilitar la mezcla homogénea. Luego, el vial se invirtió suavemente varias veces para garantizar una distribución uniforme del reactivo. Se dejó reposar durante 7 minutos, permitiendo que se desarrollara la reacción colorimétrica.
- 5. Lectura espectrofotométrica.** Antes de la medición, se preparó un vial en blanco utilizando 5 mL de agua destilada en lugar de la muestra de agua residual, siguiendo los mismos pasos anteriores. Se utilizó este vial como referencia en el espectrofotómetro. Primero, se insertó el vial blanco y se pulsó ZERO para calibrar el equipo. Luego, se limpió e introdujo el vial de la muestra y se pulsó READ para obtener el valor de fósforo total en mg/L.

En la Figura 3-23 se muestra con imágenes los pasos explicados anteriormente.



Figura 3-23. Pasos para la cuantificación del fósforo (elaboración propia)

3.3.7 Análisis de microcontaminantes

Como parte del estudio de cuantificación y caracterización de las aguas residuales generadas en buques de la Armada, se realizaron diferentes análisis en colaboración con la Universidad de Santiago. Para ello, en primer lugar, las muestras de aguas residuales fueron pretratadas en el laboratorio perteneciente al Centro Universitario de la Defensa de Marín antes de su envío. Este proceso consistió en una primera filtración mediante filtros de tamaño de poro de $1,2\ \mu\text{m}$, con el objetivo de eliminar partículas en suspensión de mayor tamaño y facilitar las siguientes etapas del análisis.

Además del fraccionamiento líquido, se llevó a cabo la separación de la fase sólida de cada muestra. Para ello, se emplearon tubos de centrifugación de laboratorio, donde se introdujeron muestras de agua residual. Posteriormente, se sometieron a centrifugación con el fin de separar los sólidos en suspensión, los cuales fueron almacenados y enviados para su análisis específico en la Universidad de Santiago. Este procedimiento garantizó que tanto la fase líquida como la fase sólida fueran analizadas con precisión, permitiendo evaluar la presencia de contaminantes en ambas matrices.

Una vez recibidas en la Universidad de Santiago, las muestras prefiltradas fueron sometidas a dos procedimientos analíticos diferenciados: el protocolo de extracción en fase sólida (SPE) para la fase líquida y el protocolo de extracción en fase sólida (SPE) para lodos, permitiendo una identificación exhaustiva de los compuestos presentes en cada fracción.

3.3.7.1 Protocolo SPE fase líquida

Para el análisis de la fase líquida, se procedió a una segunda filtración a través de membranas de $0,45\ \mu\text{m}$ con el objetivo de eliminar cualquier partícula remanente (ver Figura 3-24, donde se observa la diferencia entre muestras filtradas y sin filtrar). Posteriormente, se añadieron 3 mL de EDTA 0,1 M a cada muestra para evitar la precipitación de metales y mejorar la estabilidad de los compuestos a analizar. También se incorporaron surrogados (sulfadimethoxine-d6 y sulfadoxine-d3), que permitieron evaluar la recuperación de los analitos en el proceso de extracción.

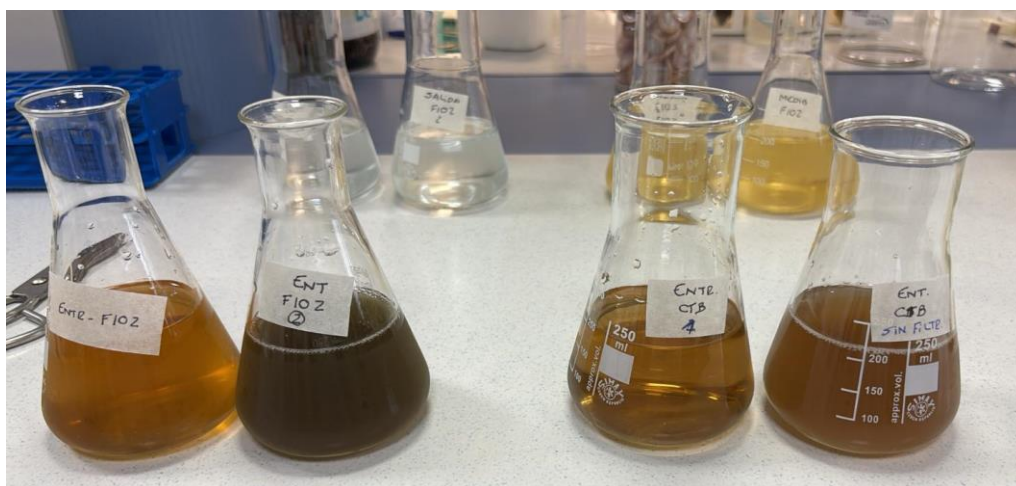


Figura 3-24. Diferencia entre muestras filtradas (izquierda) y sin filtrar (derecha) por $0,45\ \mu\text{m}$

Las muestras se sometieron a un procedimiento de extracción en fase sólida utilizando cartuchos Oasis HLB (200 mg, 6 cc-Waters). Para ello, se siguieron los siguientes pasos:

1. **Acondicionamiento de los cartuchos:** se pasaron 5 mL de metanol HPLC, seguidos de 5 mL de agua destilada.
2. **Carga de la muestra:** se hizo pasar un volumen de muestra prefiltrada comprendido entre 100 y 250 mL, permitiendo la retención de los compuestos de interés en los cartuchos. La Tabla 3-2

muestra los volúmenes utilizados según el buque, manteniéndose constante el volumen de elución en 1 mL para todos los casos.

BUQUE	SPE (mL)	ELUCIÓN (mL)
ALM. JUAN DE BORBÓN	121,25	1
CANTABRIA	125,59	1
VICTORIA	204,235	1

Tabla 3-2. Volumen de muestra cargado en SPE y volumen de elución por buque (elaboración propia)

- Lavado:** se añadieron 5 mL de agua destilada para eliminar posibles interferencias.
- Secado:** los cartuchos se dejaron al aire durante 20-30 minutos antes de la elución final.
- Elución:** los compuestos retenidos fueron extraídos con 6 mL de metanol.
- Evaporación:** la fracción eluida se llevó a evaporación con nitrógeno a sequedad total utilizando un TurboVap LV, Biotage.
- Reconstitución de la muestra:** finalmente, los residuos secos fueron resuspendidos en una mezcla de 0,5 mL de metanol y 0,5 mL de agua destilada, asegurando un lavado óptimo de las paredes del vial antes de su análisis.

3.3.7.2 Protocolo SPE lodos (fase sólida del agua)

El análisis de la fracción sólida se llevó a cabo a través de un procedimiento en cuatro fases: liofilización, desorción, extracción SPE y elución. Este método permitió evaluar la presencia de compuestos adsorbidos en la materia sólida suspendida en las aguas residuales.

- Liofilización:** los sólidos separados mediante centrifugación fueron congelados y posteriormente sometidos a liofilización para eliminar el agua remanente (ver Figura 3-25 donde se muestran los sólidos liofilizados).

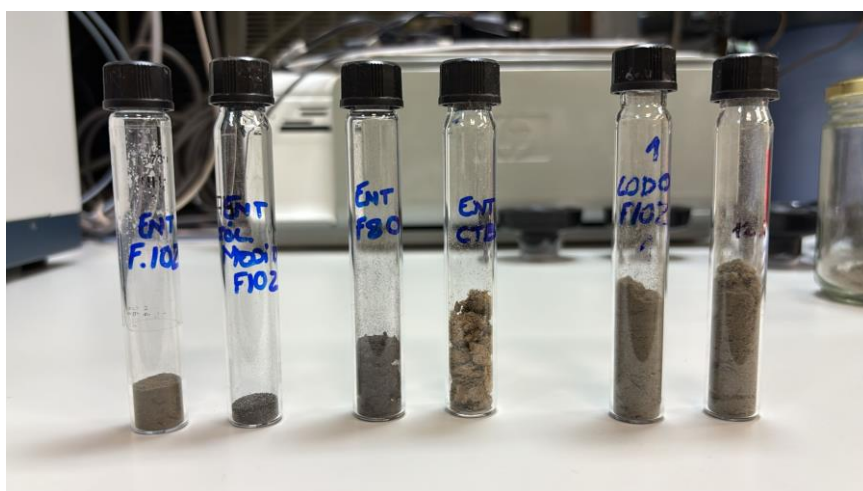


Figura 3-25. Sólidos liofilizados

Una vez secos, se pesaron los sólidos obtenidos, y se procedió a la extracción con un volumen fijo de 100 mL por muestra. En la Tabla 3-3 se presentan los pesos de muestra extraída (en gramos) correspondientes a cada buque, junto con el volumen de muestra empleado en la etapa

de SPE (100 mL en todos los casos) y el volumen de elución final, que se mantuvo constante en 1 mL para todas las unidades.

BUQUE	MUESTRA EXTRAÍDA (g)	SPE (mL)	ELUCIÓN (mL)
ALM. JUAN DE BORBÓN	0,38	100	1
CANTABRIA	0,3	100	1
VICTORIA	0,27	100	1

Tabla 3-3. Peso de muestra sólida extraída y volumen de SPE aplicado por buque (elaboración propia)

- Desorción:** a cada muestra liofilizada se añadieron 30 μ L de surrogados y se dejaron en refrigeración durante 24 horas para estabilizar la matriz. Luego, se procedió a la extracción mediante tres lavados consecutivos con 4 mL de una disolución de MeOH:H₂O Milli-Q (50:50, pH 2,5 con ácido fórmico 0,5 % y EDTA 0,1 %). Estas mezclas se sometieron a baño ultrasónico (15 min a 50 °C) y posteriormente a centrifugación (1200 rpm, 10 min) para obtener el sobrenadante filtrado a través de lana de vidrio. Este proceso se repitió tres veces para maximizar la recuperación de los compuestos.
- Extracción en fase sólida (SPE):** el sobrenadante obtenido se llevó a un volumen final de 100 mL en un matraz aforado y se pasó a través de los cartuchos SPE Oasis HLB (200 mg, 6 cc-Waters) con un sistema de vacío (ver Figura 3-26). Antes de la carga de la muestra, los cartuchos fueron acondicionados con 5 mL de metanol y 5 mL de agua destilada. Una vez completada la carga, se enjuagaron con 5 mL de agua destilada y se dejaron secar al aire durante 20-30 min.



Figura 3-26. Muestras pasando por los cartuchos, donde se quedan retenidos los fármacos

- Elución y reconstitución:** los analitos fueron extraídos con 6 mL de metanol, seguidos de una evaporación con nitrógeno a 45 °C hasta sequedad. Finalmente, los residuos fueron

resuspendidos en 0,5 mL de metanol y 0,5 mL de agua destilada, asegurando la completa recuperación de los compuestos. Véase Figura 3-27, donde se muestra el proceso de elución.



Figura 3-27. Proceso de elución

Los extractos obtenidos de ambas fases, líquida y sólida, fueron analizados mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS) utilizando un Agilent G1312A con espectrómetro API 4000 triple cuadrupolo (Applied Biosystems). Para los antiinflamatorios, se empleó ionización en modo negativo (ESI^-), mientras que para el resto de los compuestos se utilizó modo positivo (ESI^+). Los resultados de la extracción SPE mostraron recuperaciones de 75-95 % en la matriz líquida y de 50-70 % en la matriz sólida, con límites de cuantificación y detección de $1,03 \text{ ng L}^{-1}$ y $0,34 \text{ ng L}^{-1}$, respectivamente. Este nivel de sensibilidad permitió identificar y cuantificar una amplia gama de compuestos, incluyendo antibióticos, antiinflamatorios y psicofármacos.

Este proceso permitió una caracterización detallada de la contaminación presente en las aguas residuales de los buques analizados, proporcionando datos fundamentales para evaluar su impacto ambiental y su posible tratamiento antes del vertido al mar.

3.4 Estimación de caudales en buques

Además de caracterizar la composición de las aguas residuales, es fundamental determinar la cantidad de aguas negras y grises generadas en buques. Este dato es esencial para el dimensionamiento adecuado de la planta TAR, ya que permite diseñar un sistema de tratamiento acorde con la demanda real del barco.

Tal y como se mencionó anteriormente, DETEGASA es la empresa especializada en el diseño y fabricación de sistemas de tratamiento de aguas en buques. La gran mayoría de las plantas de tratamiento instaladas a bordo de los diferentes buques de la Armada Española han sido diseñados por la citada empresa, encargándose también de los mantenimientos periódicos de estas plantas.

DETEGASA establece criterios específicos para el dimensionamiento de sus plantas, asegurando que cumplan con dos parámetros fundamentales: la carga hidráulica y la carga orgánica.

- **Cálculo por carga hidráulica.** La carga hidráulica se refiere al volumen de aguas residuales generado por cada tripulante a bordo, teniendo en cuenta la separación entre aguas grises y aguas negras. Según los cálculos de DETEGASA, los valores estimados son los siguientes:

- Aguas grises: 140 L/persona/día.
- Aguas negras: 70 L/persona/día si el sistema de recogida es por gravedad, y 25 L/persona/día si es por vacío.

Por lo tanto, si una planta de aguas residuales trata tanto aguas grises como negras, su capacidad de tratamiento deberá ser de 210 L/persona/día en el caso de un sistema de recogida por gravedad, y 165 L/persona/día en el caso de un sistema de recogida por vacío.

Estos valores permiten estimar el volumen total de tratamiento requerido en función del tamaño de la dotación del buque. Por ejemplo, para una tripulación de 200 personas, la planta de tratamiento debería tener una capacidad de 42000 L/día si el sistema es por gravedad, y de 33000 L/día si es por vacío.

- **Cálculo por carga orgánica.** Además del volumen de agua, las plantas de tratamiento deben dimensionarse en función de la carga orgánica, expresada en términos de demanda química de oxígeno (DQO), que mide la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en las aguas residuales.

De acuerdo con DETEGASA, se estima que cada tripulante genera de DQO:

- Aguas negras: 0,05 kg/día/persona
- Aguas grises: 0,01 kg/día/persona
- Total combinado: 0,06 kg/día/persona

Aplicando estos valores a una dotación de 200 personas, la planta de tratamiento deberá ser capaz de procesar 12 kg/día de DQO.

Dado que DETEGASA es el fabricante de la mayoría de las plantas TAR instaladas en los buques de la Armada Española, se tomará su metodología como referencia principal para el dimensionamiento del sistema. No obstante, también se tendrán en cuenta los valores proporcionados por la EPA como referencia internacional para su comparación y validación. Cabe destacar que los valores estimados por ambos organismos no difieren significativamente, lo que refuerza la fiabilidad de las estimaciones utilizadas en este estudio y la aplicabilidad de los criterios empleados en el ámbito naval.

Uno de los principales retos en este estudio ha sido la falta de datos precisos sobre los caudales reales generados en los barcos. Actualmente, no se lleva un registro exacto de los volúmenes de aguas residuales generadas a bordo, ni se dispone de instrumentos específicos para su medición directa. Esto ha dificultado la cuantificación real de los caudales y ha obligado a basarse en valores teóricos, calculados en función de la dotación del buque y los modelos de generación de aguas residuales propuestos por DETEGASA y la EPA.

4 RESULTADOS

4.1 Caudales estimados de las aguas residuales en buques de la Armada

El conocimiento del caudal de aguas residuales generado a bordo de los buques es un aspecto fundamental para dimensionar correctamente las plantas TAR, evaluar la eficiencia de los sistemas existentes y realizar una caracterización adecuada de las muestras recogidas. La cantidad de aguas grises y negras generadas depende, entre otros factores, del tamaño de la dotación, el tipo de sistema de recogida y el régimen operativo del buque.

Dado que la mayoría de los buques de la Armada Española no cuenta con dispositivos de medición directa de caudal, ha sido necesario recurrir a una estimación teórica para calcular el volumen total generado en cada unidad. Para ello, se han aplicado los ratios proporcionados por la empresa DETEGASA, fabricante de las plantas TAR instaladas en muchos de estos buques, cuyos criterios de dimensionamiento se detallan en el apartado 3.4 *Estimación de caudales en buques*.

Las estimaciones de caudal se han realizado considerando el escenario de máxima exigencia operativa, es decir, empleando el valor de dotación en navegación durante operaciones. Esto permite obtener un resultado representativo de la carga hidráulica máxima que los sistemas deben gestionar.

A continuación, se presenta la Tabla 4-1 que recoge la información más relevante recopilada y referente a 13 de los buques más representativos de la Armada Española. En dicha tabla se pueden contemplar parámetros clave en la generación y gestión de aguas residuales tales como dotación, días de navegación, caudales de aguas residuales generadas (grises y negras), planta de tratamiento instalada y tipo de tratamiento aplicado o las principales problemáticas asociadas a dicha planta TAR. Estos datos ponen de manifiesto las diferencias existentes en buques con diferentes propósitos, así como aquellos navíos que pueden tener mayores requerimientos de depuración de aguas debido a una mayor dotación o un mayor número de días de navegación al año.

	Dotación		Días de navegación 2025	Caudal generado (l/persona/día)			Sistema de recogida de las aguas residuales		Modelo planta TAR	Tipo de tratamiento	Tipo de tuberías	Problemáticas con la planta TAR
	Navegando	En puerto		Aguas negras	Aguas grises	Total	Aguas negras	Aguas grises				
Alborán	38	38	110	950	5320	6270	Vacío	Gravedad	FQN-15	Físico-químico con neutralización	Cupro-níquel	Atascos por mal uso de los aseos
Almirante Juan de Borbón	230	204	200	5750	32200	37950	Vacío	Gravedad	FQ-24	Físico-químico con hipoclorito	Cupro-níquel	Pérdida de vacío debido a atascos en tuberías por mal uso de los aseos, redundancia de elementos
Cantabria	180	150	200	4500	25200	29700	Vacío	Gravedad	FQ-40	Físico-químico con hipoclorito	PVCy cupro-níquel	Atascos y porosidad en tuberías
Castilla	570	170	140	14250	79800	94050	Vacío	Gravedad	FQ-36	Físico-químico con hipoclorito	Cupro-níquel	Mal estado de las tuberías y válvulas, tanques presentan pérdidas frecuentes por corrosión y
Cartagena	27	27	100	675	3780	4455	Vacío	Gravedad	BSTP	Biológico con desinfección UV	Cupro-níquel	Atascos por mal uso de los aseos
Cristóbal Colón	230	205	200	5750	32200	37950	Vacío	Gravedad	FQ-24	Físico-químico con ozono	Cupro-níquel	Atascos por mal uso de los aseos
Duero	44	44	150	1100	6160	7260	Vacío	Gravedad	FQ-10	Físico-químico con hipoclorito	Cupro-níquel	Atascos por mal uso de los aseos
Hespérides	89	60	210	2225	12460	14685	Vacío	Gravedad	FQ-22	Físico-químico con hipoclorito	INOX	Reducción del diámetro de las tuberías debido a la cristalización y acumulación de residuos, afectando el flujo y la eficiencia hidráulica del sistema
J.S. Elcano	260	190	180	6500	36400	42900	Vacío	Gravedad	FQ-50	Físico-químico con hipoclorito	PVC	Obstrucción de tuberías sobrecalentando la bomba de vacío por vertido de toallitas
Juan Carlos I	1200	300	100	30000	168000	198000	Vacío	Gravedad	FQ-125	Físico-químico con hipoclorito	Cupro-níquel	Obstrucción de las tuberías por mal uso de los aseos
Relámpago	45	45	135	1125	6300	7425	Vacío	Gravedad	FQ-15	Físico-químico con hipoclorito	Cupro-níquel	Atascos en las tuberías producidos por mal uso de los aseos, mal estado de las tuberías por degradación
Victoria	208	170	180	14560	29120	43680	Gravedad	Gravedad	FQ-50	físico-químico con hipoclorito	Cupro-níquel	Atascos por mal uso de los aseos
Vigía	45	45	70	3150	6300	9450	Gravedad	Gravedad	FQ-15	Físico-químico con hipoclorito	Cupro-níquel y acero inoxidable	Filtros de aspiración obturados, fallo en fusibles de la línea de alimentación, falta de alimentación del cuadro principal
Ysabel	60	50	100	4200	8400	12600	Gravedad	Gravedad	STPN-1680	Biológico con desinfección con hipoclorito y bisulfito	Acero inoxidable	Fugas en el tratamiento, fallo en los sensores de niveles, compresores en mal estado, las válvulas de descarga experimentan obstrucciones y pérdida de operatividad debido a la acumulación de residuos tras su uso prolongado

Tabla 4-1. Datos recopilados de los buques analizados en relación con la gestión de sus aguas residuales (elaboración propia)

Del análisis de la Tabla 4-1 se observa que el buque con mayor generación de aguas residuales es el BAA *Castilla*, con un total estimado de 94.050 litros/día, resultado de su elevada dotación (570 personas) y de un sistema de recogida mixto (gravedad para aguas grises y vacío para aguas negras). Le sigue la fragata *Victoria*, que alcanza los 43.680 litros/día, en parte debido a que utiliza un sistema de gravedad tanto para aguas grises como negras, lo cual podría influir en un mayor volumen de recogida.

En contraste, el buque con menor generación total es el patrullero *Vigía*, con apenas 3.150 litros/día, valor coherente con su reducida dotación de 45 personas. También destacan los casos del *Cartagena* y la fragata *Cristóbal Colón*, con valores relativamente bajos (4.455 y 5.750 litros/día, respectivamente), probablemente asociados tanto a la dotación como al sistema de recogida empleado.

Al comparar estos datos con los valores de referencia de la Environmental Protection Agency (EPA), que establece un rango medio de 114-227 litros/persona/día para aguas residuales combinadas, se observa que la mayoría de los buques analizados se encuentran dentro o ligeramente por encima de dicho rango. Por ejemplo, el *Castilla* alcanza aproximadamente 165 litros/persona/día, mientras que la fragata *Victoria* supera los 210 litros/persona/día, lo que podría explicarse por diferencias en los hábitos de uso, diseño de sistemas a bordo o eficiencia del sistema de recogida.

Asimismo, en lo relativo a los 7 buques muestreados en el transcurso de este TFG, en la Tabla 4-2 se recogen, de manera más detallada, los caudales diarios estimados de aguas grises y negras generadas. También se incluye información sobre el tipo de sistema de recogida utilizado (vacío o gravedad), diferenciando entre aguas negras y grises.

BUQUE	DOTACIÓN (personas)	SISTEMA DE RECOGIDA		CAUDAL GENERADO (litros/persona/día)		
		AGUAS GRISES	AGUAS NEGRAS	AGUAS GRISES	AGUAS NEGRAS	TOTAL
ALM. JUAN DE BORBÓN	230	Gravedad	Vacío	32200	5750	37950
CANTABRIA	180	Gravedad	Vacío	25200	4500	29700
VICTORIA	208	Gravedad	Gravedad	29120	14560	43680
CASTILLA	570	Gravedad	Vacío	79800	14250	94050
VIGÍA	45	Gravedad	Gravedad	6300	3150	3150
CRISTÓBAL COLÓN	230	Gravedad	Vacío	32200	5750	5750
CARTAGENA	27	Gravedad	Vacío	3780	675	4455

Tabla 4-2. Caudales estimados de las aguas residuales de buques de la Armada Española (elaboración propia)

4.2 Caracterización de las aguas residuales: contaminantes convencionales

Para evaluar la composición y calidad de las aguas residuales generadas en los buques analizados, se han llevado a cabo análisis detallados en laboratorio tras la toma de muestras. Estos análisis permiten identificar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos clave que determinan la naturaleza del agua residual y su impacto en los sistemas de tratamiento.

Cada parámetro evaluado proporciona información esencial sobre las características del efluente antes de su entrada en la planta TAR, lo que permite entender el grado de contaminación y la eficiencia esperada de los tratamientos empleados a bordo. En este apartado, se presentan los resultados obtenidos,

organizados en función de las propiedades analizadas, incluyendo pH, turbidez, contenido de sólidos, demanda química de oxígeno (DQO) y concentración de nutrientes como nitrógeno y fósforo.

Todos los análisis se han realizado siguiendo los protocolos establecidos en el apartado de desarrollo, garantizando la reproducibilidad y precisión de los datos. Para mejorar la fiabilidad de los resultados, cada medición se ha efectuado por duplicado o triplicado, minimizando el margen de error.

A continuación, se detallan los valores obtenidos en cada uno de los parámetros evaluados, junto con su interpretación y relevancia en el contexto del tratamiento de aguas residuales en buques de la Armada Española.

4.2.1 pH

El pH es un parámetro fundamental en la caracterización del agua residual, ya que determina su grado de acidez o alcalinidad. Su control es esencial para optimizar procesos de tratamiento, ya sean biológicos o fisicoquímicos. Además, conocer el valor de pH permite identificar el ingreso de cargas contaminantes fuera de lo rutinario, lo que facilita la implementación de acciones preventivas para evitar afectaciones en los sistemas de tratamiento [62].

- En los procesos fisicoquímicos, que son los que tienen la gran mayoría de los barcos de la Armada Española, valores de pH demasiado ácidos o básicos disminuyen la efectividad de la eliminación de contaminantes. Su rango óptimo se encuentra entre 6 y 9 [63].
- En los procesos biológicos, que solo lo tiene el buque Tarifa [6], un pH fuera del rango óptimo afecta a la actividad de los microorganismos, reduciendo la eficiencia de la biodegradación de materia orgánica. Su rango óptimo se encuentra entre 6,5 y 8,5 [64].

En la Figura 4-1 se presenta la clasificación de los valores de pH y sus efectos en los tratamientos de las aguas residuales.

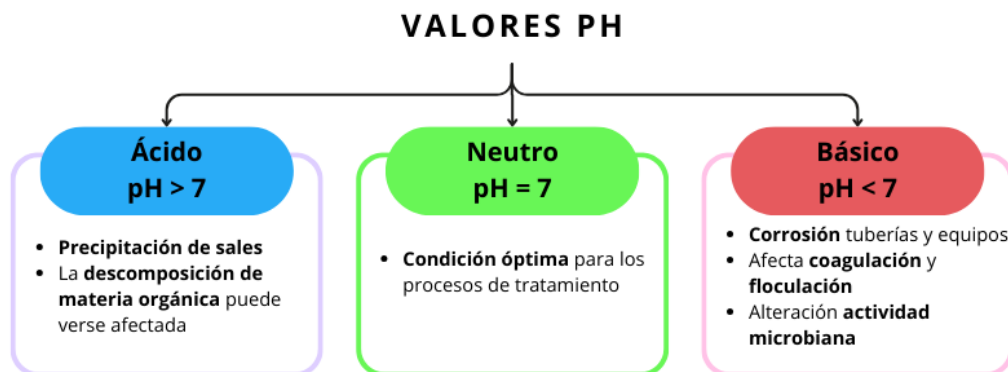


Figura 4-1. Clasificación del pH y sus efectos en los tratamientos de aguas residuales.

A continuación, en la Tabla 4-3 se muestran los resultados de pH obtenidos tras evaluar las diferentes muestras de aguas residuales de los 7 barcos seleccionados.

pH	ALM. JUAN DE BORBÓN	CANTABRIA	VICTORIA	CASTILLA	VIGÍA	CRISTÓBAL COLÓN	CARTAGENA
	7,87	8,34	7,18	7,87	6,45	8,75	7,40

Tabla 4-3. Valores de pH en las aguas residuales de los buques analizados

El pH de las aguas residuales analizadas varió entre 6,45 y 8,75, lo que indica una tendencia general dentro del rango neutro-alcalino. Estos valores son adecuados para los sistemas de tratamiento utilizados en los buques de la Armada, ya que permiten el correcto desarrollo de los procesos fisicoquímicos y biológicos. Sin embargo, el valor más bajo (6,45 en el buque *Vigía*) podría indicar una ligera acidificación de las aguas residuales, lo que podría afectar la eficiencia de algunos tratamientos químicos y biológicos. En contraste, el valor más alto (8,75 en el *Cristóbal Colón*) sugiere una alcalinidad elevada, que podría estar asociada al uso de detergentes o productos de limpieza a bordo.

4.2.2 Turbidez

La turbidez es un parámetro que mide la cantidad de partículas en suspensión en el agua. Un nivel elevado de turbidez indica una alta concentración de sólidos no disueltos, lo que puede afectar la eficiencia de los sistemas de filtración y sedimentación dentro del tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, una baja turbidez sugiere que el agua tiene pocas partículas suspendidas, lo que facilita su tratamiento y mejora la eficiencia de los procesos de desinfección.

El control de la turbidez es fundamental para garantizar que los sistemas de tratamiento funcionen correctamente, reduciendo la carga contaminante del efluente. En términos de referencia, las aguas residuales brutas suelen presentar niveles de turbidez superiores a 100 NTU, mientras que, en un sistema de tratamiento eficiente, la turbidez del agua tratada debe reducirse a menos de 5 NTU para garantizar una mejor calidad del efluente final [65].

TURBIDEZ (NTU)	ALM. JUAN DE BORBÓN	CANTABRIA	VICTORIA	CASTILLA	VIGÍA	CRISTÓBAL COLÓN	CARTAGENA
	72	550	309	66	398	1009	633

Tabla 4-4. Niveles de turbidez (NTU) en las aguas residuales de los buques analizados (elaboración propia)

Tal como se muestra en la Tabla 4-6, que recoge los niveles de turbidez (NTU) en las aguas residuales de los buques analizados, los valores presentan una variabilidad significativa, con un mínimo de 66 NTU (*Castilla*) y un máximo de 1009 NTU (*Cristóbal Colón*). La elevada turbidez en algunos buques indica una alta presencia de partículas en suspensión, lo que puede afectar la eficiencia del tratamiento en la planta TAR, especialmente en los procesos de filtración y sedimentación. En el caso de la fragata *Cristóbal Colón*, la alta turbidez sugiere una elevada carga de sólidos, lo que podría requerir un pretratamiento más eficiente antes de la entrada en la planta de tratamiento.

4.2.3 Sólidos

En la Tabla 4-5 se presentan los resultados del análisis de sólidos en las muestras de aguas residuales recogidas en los diferentes buques, expresados en gramos por litro. Cada valor corresponde a la media de tres mediciones independientes, y se acompaña de su desviación estándar, lo que permite reflejar con mayor precisión la variabilidad de las muestras analizadas.

SÓLIDOS (g/L)	ALM. JUAN DE BORBÓN	CANTABRIA	VICTORIA	CASTILLA	VIGÍA	CRISTÓBAL COLÓN	CARTAGENA
ST	4,49 ± 0,05	2,08 ± 0,06	20,39 ± 0,64	31,02 ± 0,60	29,55 ± 0,22	2,52 ± 0,12	3,14 ± 0,14
SI	3,83 ± 0,01	0,73 ± 0,05	17,89 ± 0,59	25,53 ± 0,42	22,5 ± 0,25	1,20 ± 0,03	1,61 ± 0,02
SV	0,66 ± 0,04	1,35 ± 0,11	2,5 ± 0,13	5,49 ± 0,27	7,05 ± 0,47	1,32 ± 0,13	1,53 ± 0,14

SÓLIDOS (g/L)	ALM. JUAN DE BORBÓN	CANTABRIA	VICTORIA	CASTILLA	VIGÍA	CRISTÓBAL COLÓN	CARTAGENA
SST	0,39 ± 0,03	0,44 ± 0,06	0,33 ± 0,05	0,65 ± 0,02	0,7 ± 0,08	0,71 ± 0,04	1,20 ± 0,15
SSI	0,16	0,09 ± 0,01	0,12 ± 0,02	0,4 ± 0,02	0,33 ± 0,02	0,09 ± 0,01	0,20 ± 0,06
SSV	0,25 ± 0,04	0,36 ± 0,05	0,24 ± 0,01	0,25 ± 0,01	0,39 ± 0,09	0,62 ± 0,04	1,00 ± 0,09

Tabla 4-5. Contenido de sólidos (g/L) en las aguas residuales de los buques analizados (elaboración propia)

Los resultados muestran una marcada heterogeneidad entre buques, especialmente en los sólidos totales (ST), donde destacan el BAA *Castilla* ($31,02 \pm 0,60$ g/L) y el patrullero *Vigía* ($29,55 \pm 0,22$ g/L), ambos con valores muy superiores al resto de unidades. Esta elevada concentración sugiere una alta carga de materia tanto disuelta como suspendida, posiblemente asociada a una mayor acumulación de residuos orgánicos y minerales en los sistemas de recogida.

En cuanto a los sólidos suspendidos totales (SST), los valores son en general más moderados, aunque se observa un pico notable en el buque *Cartagena* ($1,20 \pm 0,15$ g/L), seguido por la fragata *Cristóbal Colón* ($0,71 \pm 0,04$ g/L) y el *Vigía* ($0,70 \pm 0,08$ g/L). Esta fracción, al estar compuesta por material no disuelto, tiene implicaciones directas en el rendimiento de los procesos de filtración y sedimentación en las plantas de tratamiento de aguas residuales (TAR).

En lo que respecta a los sólidos volátiles (SV), que representan la fracción orgánica biodegradable, destacan nuevamente el *Castilla* ($5,49 \pm 0,27$ g/L) y el *Vigía* ($7,05 \pm 0,47$ g/L), lo que indica una significativa presencia de materia orgánica susceptible de degradación biológica. Esta alta proporción de SV respecto a los sólidos totales puede representar un reto adicional para los tratamientos biológicos, ya que incrementa la demanda de oxígeno y la carga contaminante del sistema.

4.2.4 DQO

Los valores de DQO reflejan la cantidad de materia orgánica presente en las aguas residuales y, por lo tanto, su nivel de contaminación. Tal como se muestra en la Tabla 4-6, correspondiente a la demanda química de oxígeno en los buques analizados, el *Cartagena* registró el valor más alto (5768 mg/L), lo que indica una carga orgánica muy elevada. Este resultado sugiere que las aguas residuales de este buque contienen una gran cantidad de materia biodegradable y no biodegradable, lo que podría afectar la eficiencia de los tratamientos convencionales.

DQO (mg/L)	ALM. JUAN DE BORBÓN	CANTABRIA	VICTORIA	CASTILLA	VIGÍA	CRISTÓBAL COLÓN	CARTAGENA
PROMEDIO	2405,20	1884,40	1170,4	649,60	1050	2828	5768
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	225,59	136,34	106,4	67,20	79,34	84	1288
ERROR (%)	9,38	7,23	9,09	10,34	7,56	2,97	22,33

Tabla 4-6. Demanda química de oxígeno (DQO) en las aguas residuales de los buques analizados (elaboración propia)

Por otro lado, el *Castilla* (649,6 mg/L) y el *Vigía* (1050 mg/L) presentan valores de DQO relativamente bajos en comparación con otros buques, lo que indica una menor carga contaminante. Sin embargo, la DQO de estos valores aún es elevada y requeriría un tratamiento eficiente antes del vertido.

4.2.5 Nitrógeno

El nitrógeno total (NT) es otro parámetro clave en la caracterización de aguas residuales, ya que su presencia en elevadas concentraciones puede causar impactos ambientales negativos, como la eutrofización de cuerpos de agua, un fenómeno en el que el exceso de nutrientes fomenta el crecimiento descontrolado de algas, reduciendo el oxígeno disuelto en el agua y afectando la biodiversidad acuática.

NT (mg/L)	ALM. JUAN DE BORBÓN	CANTABRIA	VICTORIA	CASTILLA	VIGÍA	CRISTÓBAL COLÓN	CARTAGENA
	340	370	140	225	95	600	75

Tabla 4-7. Concentración de nitrógeno total (mg/l) en las aguas residuales de los buques analizados (elaboración propia)

Tal como se recoge en la Tabla 4-7, donde se muestra la concentración de nitrógeno total en las aguas residuales de cada buque, los resultados presentan una amplia variabilidad. La fragata *Cristóbal Colón* registró el valor más alto (600 mg/L), lo que sugiere una elevada presencia de compuestos nitrogenados en sus aguas residuales. Este nivel puede estar asociado a la descomposición de materia orgánica, el uso de productos de limpieza o la orina de la tripulación.

Por otro lado, el buque multipropósito *Cartagena* (75 mg/L) y el *Vigía* (95 mg/L) presentaron los valores más bajos, lo que indica una menor presencia de compuestos nitrogenados en sus aguas residuales. Sin embargo, estos valores aún pueden contribuir a problemas ambientales como la eutrofización si no se tratan adecuadamente antes de su vertido.

4.2.6 Fósforo

El fósforo total (PT) es un parámetro fundamental en el análisis de aguas residuales, ya que su presencia en altas concentraciones puede generar eutrofización, al igual que en el exceso de nitrógeno total. Su cuantificación permite evaluar la carga de fósforo en las aguas residuales generadas a bordo y determinar la eficiencia de los sistemas de tratamiento en los buques de la Armada Española.

El fósforo es un nutriente clave en la proliferación de algas en los ecosistemas acuáticos, y su presencia en aguas residuales debe ser controlada. Tal y como se puede observar en la Tabla 4-8, los valores obtenidos oscilan entre 6,9 mg/L (*Castilla*) y 170 mg/L (*Cristóbal Colón*).

PT (mg/L)	ALM. JUAN DE BORBÓN	CANTABRIA	VICTORIA	CASTILLA	VIGÍA	CRISTÓBAL COLÓN	CARTAGENA
	45	33	12,6	6,9	16,2	170	75

Tabla 4-8. Concentración de fósforo total (mg/L) en las aguas residuales de los buques analizados (elaboración propia)

El alto contenido de fósforo en la fragata *Cristóbal Colón* indica que sus aguas residuales pueden contener grandes cantidades de detergentes, productos de limpieza y restos de materia orgánica. Este valor, además, coincide con el hecho de que también presenta la mayor concentración de nitrógeno, lo que refuerza la necesidad de optimizar la eliminación de nutrientes en el tratamiento de sus aguas.

Por el contrario, el *BAA Castilla* presenta la menor concentración de fósforo (6,9 mg/L), lo que indica una menor presencia de este nutriente en sus aguas residuales. Sin embargo, cualquier valor superior a 5 mg/L puede contribuir a la eutrofización si no se eliminan adecuadamente antes del vertido.

4.2.7 Comparativa con aguas residuales generadas en buques civiles

En este estudio, el análisis y los resultados obtenidos corresponden a una mezcla de aguas grises y negras, ya que las muestras fueron proporcionadas por los buques sin distinción entre ambos tipos de aguas residuales. Esto se debe a la configuración del sistema de tuberías a bordo, que en muchos casos no permite la segregación previa de las aguas antes de su tratamiento o vertido, dificultando la toma de muestras diferenciadas.

Sin embargo, los estudios bibliográficos con los que se pretende comparar estos resultados presentan los datos de aguas grises y negras por separado, por lo que será necesario ponderar los resultados de dichos estudios, en función de la proporción que representa cada tipo de agua en el total de aguas residuales generadas. Esta aproximación permite garantizar una comparación más adecuada y homogénea entre los parámetros analizados en este trabajo y los valores reportados, facilitando así una correcta interpretación de los resultados.

Según la EPA (*Environmental Protection Agency*), la generación de aguas grises por persona es la misma en buques grandes y medianos [66]. En su estudio, la EPA analizó la producción de aguas grises y determinó que, en promedio, cada persona genera 45 galones por día, lo que equivale a:

$$45 \text{ gal} \cdot 3,7854 \text{ L/gal} = 170,34 \text{ L/persona/día}$$

Dado que los buques analizados en dicho estudio corresponden a embarcaciones de dimensiones similares a las consideradas en este trabajo, se utilizarán estos valores como referencia para la estimación del caudal de aguas grises en los buques evaluados. Esto permitirá una comparación más precisa y fundamentada en datos previamente validados.

Así mismo, el estudio realizado por WWF-Canada en 2022, establece que la generación media de aguas negras en buques es de 34 litros por persona al día, mientras que la de aguas grises se mantiene en 170 litros por persona y día [67]. Este último valor coincide con el establecido por la EPA, lo que refuerza su validez y aplicabilidad en distintos tipos de embarcaciones.

Teniendo en cuenta ambos estudios, se considera que cada persona genera diariamente un total de 204 litros de aguas residuales, distribuidos de la siguiente forma:

$$170,34 \frac{\text{L}}{\text{d}} \text{ aguas grises} + 34 \frac{\text{L}}{\text{d}} \text{ aguas negras} = 204,34 \frac{\text{L}}{\text{d}}$$

Para poder comparar adecuadamente los resultados de este estudio con los valores reportados por la EPA y WWF-Canada, será necesario aplicar una ponderación a los datos de estudio, utilizando como base la proporción que representa cada tipo de agua en el total. Así, los porcentajes de contribución se calculan como:

$$\frac{170,34}{204,34} \times 100 \approx 83,3 \% \text{ aguas grises}$$

$$\frac{34}{204,34} \times 100 \approx 16,7 \% \text{ aguas negras}$$

Estos porcentajes se utilizarán como factores de ponderación aplicados a los valores reportados en los estudios, con el objetivo de obtener valores globales (mezcla) que permitan una comparación directa con los resultados experimentales de este trabajo, en los que se analizaron muestras mixtas.

A continuación, se presenta la Tabla 4-9, que recoge los valores reportados por los estudios de la EPA y WWF-Canada para los principales parámetros fisicoquímicos en aguas grises y negras generadas en distintos tipos de buques civiles. Estos valores han sido ponderados según los porcentajes establecidos anteriormente (83,3 % aguas grises y 16,7 % aguas negras), con el fin de ser comparables con la muestra mixta analizada en este estudio. En cuanto a los sólidos, únicamente se incluyen los sólidos suspendidos totales, ya que es el único parámetro de sólidos contemplado en la normativa MARPOL - Anexo IV.

Esta tabla será utilizada como base para la comparación posterior con los resultados obtenidos tras analizar las aguas residuales de los diferentes buques de la Armada Española.

PARÁMETRO	AGUAS GRISES	AGUAS NEGRAS	MEZCLA
pH	6-9	6,5-8	7,46
Turbidez (NTU)	224	200-800	270,09
SST (mg/L)	704	1700	870,33
DQO (mg/L)	1890	2900	2058,67
NT (mg/L)	26,20	270	66,91
PT (mg/L)	10,10	34,40	8419,04

Tabla 4-9. Valores de los parámetros fisicoquímicos de aguas residuales de buques civiles (elaboración propia a partir de [65] y [6])

A continuación, se presenta la Tabla 4-10, en la que se recoge la comparativa entre los valores obtenidos en los análisis realizados en este estudio y los valores de referencia recopilados, correspondientes a aguas residuales generadas en buques civiles. La tabla incluye los principales parámetros fisicoquímicos (DQO, pH, turbidez, nitrógeno total, fósforo total y SST), y permite observar las diferencias o similitudes entre las aguas residuales generadas en los buques de la Armada Española y los datos de estudios previos.

AGUAS RESIDUALES	ALM. J. D. BORBÓN	CTB	CARTAGENA	CASTILLA	C. COLÓN	VICTORIA	VIGÍA	PROMEDIO BUQUES ARMADA	BUQUES CIVILES
pH	7,87	8,34	7,40	7,87	8,75	7,16	6,45	7,66 ± 0,76	7,46
Turbidez (NTU)	72	550	633	66	1009	309	398	434 ± 308	270,10
SST (g/L)	0,39	0,54	1,20	0,65	1,03	0,30	0,85	0,71 ± 0,31	0,87
DQO (mg/L)	2405	1884	5768	649,60	2828	1170	1050	2251 ± 1605	2059
NT (mg/L)	340	370	75	225	600	140	95	264 ± 173	66,91
PT (mg/L)	45	33	75	6,90	170	12,60	16,20	51,2 ± 53,1	8419

Tabla 4-10. Comparativa de las aguas residuales de buques de la Armada Española con buques civiles (elaboración propia)

A continuación, se presentan una serie de gráficos que representan de forma individual los distintos parámetros fisicoquímicos recogidos en la Tabla 4-10, con el objetivo de facilitar su interpretación visual y destacar las diferencias más relevantes entre los buques de la Armada Española y los valores de referencia de buques civiles.

En cada gráfico, los valores individuales por buque se comparan con el valor de referencia civil correspondiente, y se incluye una línea horizontal discontinua, que representa el valor promedio obtenido para el conjunto de buques militares analizados. Esta línea permite visualizar rápidamente qué unidades se sitúan por encima o por debajo del promedio militar, aportando una lectura más directa de los resultados.

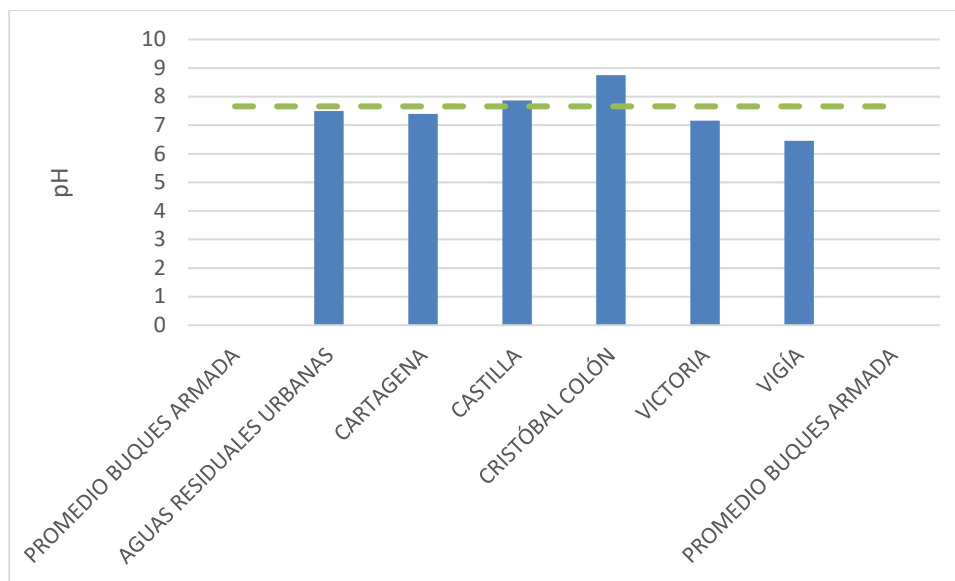


Figura 4-2. Comparativa de valores de pH en las aguas residuales de buques militares y civiles (elaboración propia)

El valor promedio del pH en los buques de la Armada es de 7,66, ligeramente superior al valor de referencia (7,46), pero como se observa en la Figura 4-2, no se trata de una diferencia significativa.

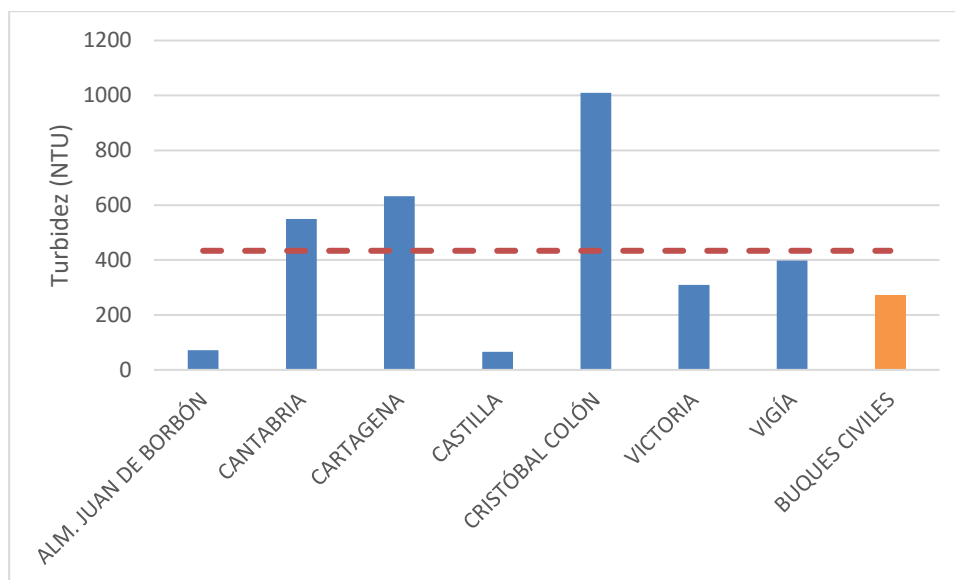


Figura 4-3. Comparativa de valores de turbidez en las aguas residuales de buques militares y civiles (elaboración propia)

Los valores de turbidez en los buques de la Armada son significativamente más elevados que el valor de referencia (270 NTU), con una media de 433,86 NTU. La *Cristóbal Colón* presenta el valor máximo (1009 NTU), lo que sugiere una elevada concentración de partículas en suspensión. Solo el *Castilla* y la *Alm. Juan de Borbón* presentan turbideces inferiores a la media civil, lo que podría reflejar un sistema de recogida más eficaz o un menor uso de productos que generen residuos en suspensión, como se aprecia en la Figura 4-3.

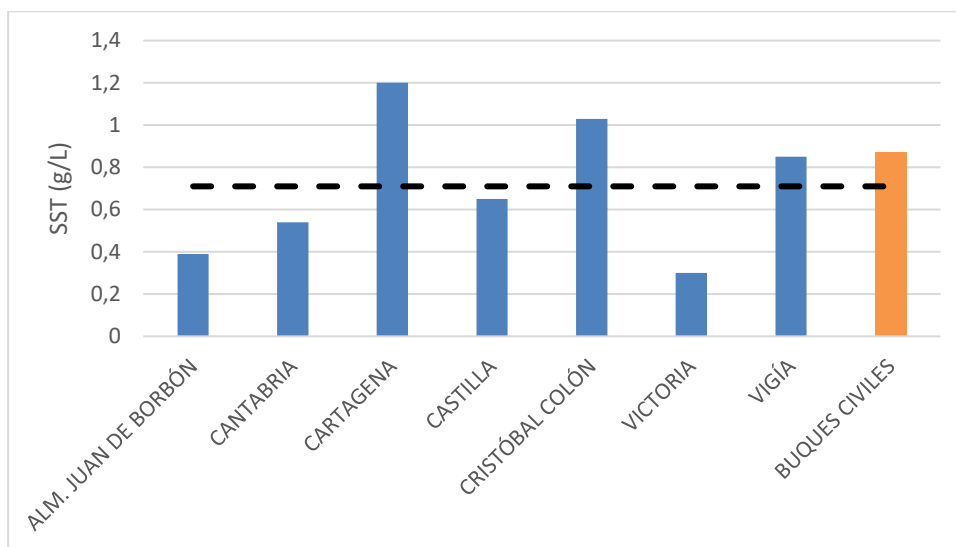


Figura 4-4. Comparativa de valores de SST en las aguas residuales de buques militares y civiles (elaboración propia)

En cuanto a los sólidos en suspensión totales, el valor medio obtenido para los buques de la Armada (0,71 g/L) está por debajo del valor de referencia (0,87 mg/L), lo que podría deberse a pérdidas de sólidos durante el proceso de filtración, una posible dilución previa de las aguas negras durante la recogida, o bien, a una menor generación de sólidos en los buques militares por hábitos de uso diferentes. El valor más alto se presenta en el *Cartagena* (1,2 g/L), tal y como se observa en la Figura 4-4.

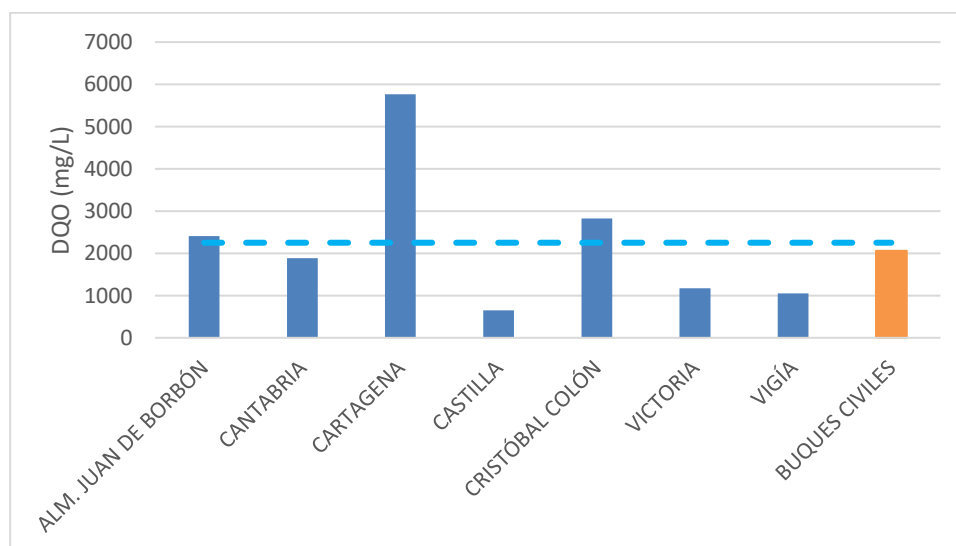


Figura 4-5. Comparativa de valores de DQO en las aguas residuales de buques militares y civiles (elaboración propia)

El promedio de DQO en los buques de la Armada (2250 mg/L) es un 9,3 % mayor al valor ponderado de referencia (2059 mg/L), lo que indica una carga orgánica moderadamente más elevada. Destacan el *Cartagena* (5768 mg/L) y el *Cristóbal Colón* (2828 mg/L), buques con sistemas de recogida distintos al resto o con particularidades en el manejo de aguas residuales. En contraste, el *Castilla* y el *Vigía* tienen valores relativamente bajos, posiblemente relacionados con menores volúmenes generados o mayor dilución de las aguas residuales. Véase Figura 4-5 para observarlo gráficamente.

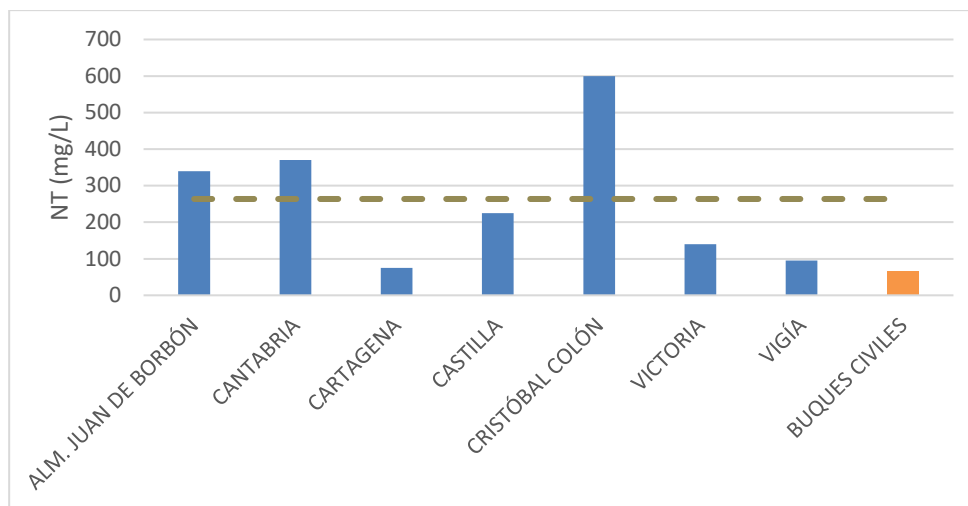


Figura 4-6. Comparativa de valores de NT en las aguas residuales de buques militares y civiles (elaboración propia)

El nitrógeno total es el parámetro que presenta la diferencia más clara (ver Figura 4-6), con una media en la Armada de 263,57 mg/L, frente a los 66,91 mg/L de la referencia civil. Esta diferencia de un 293 % superior, puede explicarse por el mayor uso de productos nitrogenados a bordo (productos de limpieza, higiene, alimentos procesados), elevada concentración de orina en las aguas negras no suficientemente diluidas o aguas más concentradas debido a una menor disponibilidad de agua a bordo. El valor más alto lo presenta el *Cristóbal Colón* (600 mg/L), seguido del *Cantabria* (370 mg/L), ambos con dotaciones amplias y mayor actividad operativa.

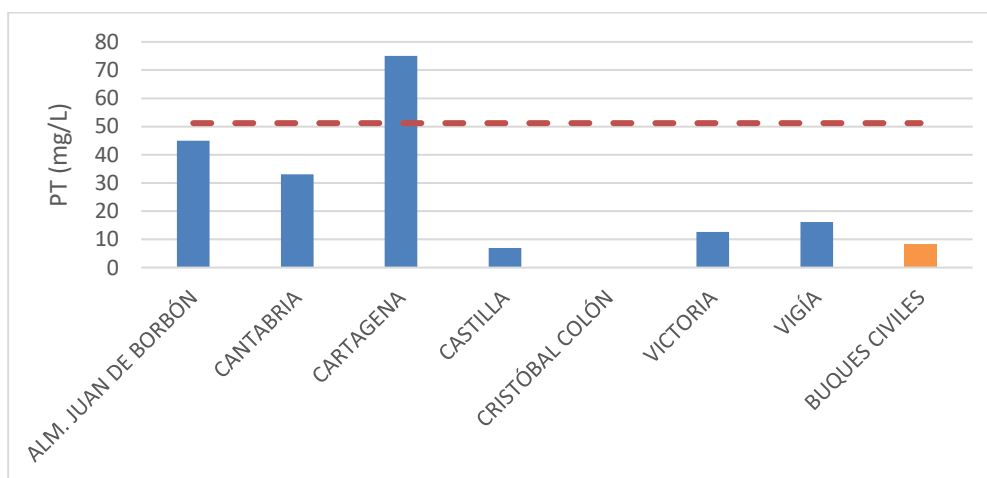


Figura 4-7. Comparativa de valores de PT en las aguas residuales de buques militares y civiles (elaboración propia)

El fósforo también presenta una diferencia significativa: 51,24 mg/L en promedio en los buques de la Armada frente a 8,42 mg/L en los buques civiles, lo que equivale a un incremento del 508,3 %. Este exceso podría deberse al uso de detergentes con alto contenido en fosfatos, baja tasa de renovación de aguas en sistemas cerrados, menor eficiencia en la eliminación previa de sólidos o compuestos fosfatados. La fragata *Cristóbal Colón* destaca con un valor extremo de 170 mg/L, lo que lo convierte en el principal responsable de esta desviación. Si se excluyera a este valor del cálculo, la media del resto de buques descendería a 31,45 g/L, lo que seguiría representando un valor elevado, aunque más cercano al comportamiento del conjunto. Por otro lado, el *BAA Castilla* presenta el valor más bajo (6,9 mg/L), dentro del rango esperado. En la Figura 4-7 se muestra lo comentado, sin incluir el valor de la fragata *Cristóbal Colón*, ya que su magnitud distorsionaría la escala del gráfico y dificultaría la visualización de las diferencias entre el resto de las unidades.

Los resultados muestran que las aguas residuales generadas en los buques de la Armada Española tienen una carga contaminante similar o incluso superior a la reportada en buques civiles, especialmente en lo referente a nutrientes (nitrógeno y fósforo) y, en algunos casos, DQO y turbidez. Esto refleja la necesidad de contar con sistemas de tratamiento adecuados y ajustados a las condiciones reales de generación de aguas residuales a bordo.

Además, las diferencias observadas entre buques evidencian que la tipología del barco, su dotación y el sistema de recogida implementado influyen directamente en la composición del efluente. Por ejemplo, buques con mayor capacidad de almacenamiento de aguas residuales, sistemas de recogida por vacío o una dotación más numerosa tienden a mostrar valores más elevados de concentración, como es el caso de la fragata *Cristóbal Colón* o el *Cartagena*. Por el contrario, unidades como el *Castilla*, a pesar de su gran dotación, presentan valores más contenidos, posiblemente por un mayor volumen de agua disponible por persona o una frecuencia de vertido más alta.

4.2.8 Comparativa con aguas residuales urbanas

Para cerrar el análisis de caracterización de las aguas residuales generadas en los buques de la Armada Española, se ha considerado relevante compararlas con las aguas residuales urbanas convencionales. En los sistemas urbanos tradicionales, es común que diversos tipos de aguas residuales -negras, grises, pluviales e industriales- se mezclen y sean conducidas conjuntamente a estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) para su tratamiento. Sin embargo, en los últimos años, se ha observado una creciente implementación de sistemas de tratamiento descentralizados que separan y tratan de forma independiente estos diferentes flujos de aguas residuales, mejorando así la eficiencia y sostenibilidad del proceso de depuración.

Esta comparativa, que se presenta a continuación en la Tabla 4-11, permite evaluar en qué medida los efluentes generados a bordo difieren o se asemejan a los producidos en entornos terrestres, como ciudades o instalaciones públicas. Este análisis es fundamental para contextualizar los resultados obtenidos en este estudio dentro de un marco más amplio y comprobar si los sistemas de tratamiento utilizados actualmente en los buques están preparados para gestionar cargas contaminantes equivalentes o incluso superiores a las que se tratan en estaciones depuradoras urbanas (EDAR).

La comparación se realiza sobre los mismos parámetros fisicoquímicos analizados en este trabajo: pH, turbidez, sólidos en suspensión (SST), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT).

AGUAS RESIDUALES	PROMEDIO BUQUES ARMADA	AGUAS RESIDUALES URBANAS
pH	7,66 ± 0,76	7,5
Turbidez (NTU)	434 ± 308	-
SST (g/L)	0,71 ± 0,31	0,4
DQO (mg/L)	2251 ± 1605	430
NT (mg/L)	264 ± 173	70
PT (mg/L)	51,20 ± 53,10	12

Tabla 4-11. Comparativa entre los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales generadas en buques de la Armada y las aguas residuales urbanas convencionales (elaboración propia) [68]

El pH promedio en los buques es de $7,66 \pm 0,76$, un valor muy similar al reportado para aguas urbanas (7,5), lo que indica condiciones neutras y estables en ambos entornos. No obstante, este parámetro puede variar considerablemente en función del tiempo de retención, la agitación del fluido o la temperatura, por lo que debe medirse inmediatamente tras la recogida para asegurar su fiabilidad.

En cuanto a la turbidez, no se incluye un valor de comparación urbana en la tabla, ya que la turbidez no se reporta de forma consistente en la literatura sobre aguas residuales urbanas, debido a su alta variabilidad y a la mezcla de diferentes tipos de aguas (grises, negras, pluviales, industriales) en los sistemas urbanos convencionales.

El valor medio de sólidos suspendidos totales en los buques es de 0,71 g/L (equivalente a 710 mg/L), lo que supone un 103% mayor al valor urbano de referencia (350 mg/L). Esto sugiere una mayor carga de materia no disuelta en las aguas residuales navales, posiblemente asociada al almacenamiento prolongado, baja frecuencia de vertido y condiciones de uso a bordo. Aun así, este parámetro puede verse afectado por pérdidas durante el filtrado previo o errores de conversión de unidades.

Respecto a la demanda química de oxígeno (DQO), el promedio en los buques es de 2250,7 mg/L, muy por encima del valor urbano típico (430 mg/L), quintuplicándolo. Esta diferencia indica que las aguas residuales a bordo presentan una carga orgánica mucho más elevada, probablemente debido a su concentración, menor dilución y composición más compleja, con mayor presencia de residuos orgánicos, detergentes y productos de limpieza.

En relación al nitrógeno total (NT), los valores a bordo alcanzan un promedio de 263,6 mg/L, comparado con solo 70 mg/L en aguas urbanas. Esta diferencia se puede atribuir al uso intensivo de productos nitrogenados y a la escasa renovación del agua en los sistemas cerrados de los buques.

Finalmente, el fósforo total (PT) también muestra una diferencia significativa: 51,2 mg/L en los buques frente a 12 mg/L en el entorno urbano. Este exceso puede estar relacionado con detergentes, productos de mantenimiento y la acumulación de materia orgánica en condiciones de baja frecuencia de vertido.

En conjunto, esta comparativa evidencia que las aguas residuales generadas en buques militares presentan una carga contaminante sustancialmente superior a la de las aguas residuales urbanas. Esto refuerza la necesidad de disponer a bordo de sistemas de tratamiento con capacidades y eficiencias equiparables a las utilizadas en estaciones depuradoras terrestres (EDAR), especialmente cuando las condiciones de operación limitan la posibilidad de realizar vertidos frecuentes.

4.3 Caracterización de las aguas residuales: contaminantes emergentes

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras el análisis de contaminantes emergentes en las muestras de aguas residuales recogidas de los buques analizados. Se han abordado dos grandes grupos de compuestos: por un lado, antiinflamatorios no esteroideos (AINEs) de uso común; y por otro, antibióticos de uso antibacteriano, igualmente considerados contaminantes emergentes por su impacto ambiental.

4.3.1 Caracterización de antiinflamatorios no esteroideos (AINEs)

Los AINEs evaluados fueron ibuprofeno (IBP), naproxeno (NPX) y diclofenaco (DCF), determinados mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS/MS), en dos fracciones separadas: fase líquida y fase sólida. Para obtener una visión global de la concentración total, se realizó la conversión de unidades: mientras que la fase líquida ya aportaba los valores en $\mu\text{g/L}$ (ppb), los resultados de la fase sólida se obtuvieron originalmente en ng/g, y se convirtieron a $\mu\text{g/L}$ multiplicando por el valor de SST (g/L) de cada buque (ver Tabla 4-5). Como resultado, se presentan sucesivamente la Tabla 4-12 que recoge los valores obtenidos en la fase líquida para cada compuesto y buque, la Tabla 4-13 con los valores de la fase sólida, y la Tabla 4-14, que recoge la suma total de ambas fases y representa la información más relevante del apartado.

	Concen. Final (ppb, µg/L)		
Fase líquida	IBP	NPX	DCF
ALM. JUAN DE BORBÓN	59,86	2,13	0,17
CANTABRIA	15,64	0,03	-
VICTORIA	44,96	6,53	-

Tabla 4-12. Concentración de antibióticos (IBP, NPX, DCF) en la fase líquida de las aguas residuales por buque (elaboración propia)

	Concen. Final (ppb, µg/L)		
Fase sólida	IBP	NPX	DCF
ALM. JUAN DE BORBÓN	0,52	0,017	0,004
CANTABRIA	0,12	-	-
VICTORIA	0,041	0,078	-

Tabla 4-13. Concentración de antibióticos (IBP, NPX, DCF) en la fase sólida (elaboración propia)

	Concen. Final (ppb, µg/L)		
	IBP	NPX	DCF
ALM. JUAN DE BORBÓN	1331,74	43,71	11,004
CANTABRIA	221,61	-	-
VICTORIA	124,51	235,89	-

Tabla 4-14. Concentración total de antibióticos por buque (elaboración propia)

Cabe señalar que, como se observa en las tablas, algunos compuestos no aparecen debido a que sus concentraciones se encontraban por debajo de los límites de detección (LOD) o de cuantificación (LOQ) del método. En la fase líquida, el LOQ fue de 0,005 µg/L y el LOD de 0,002 µg/L; y en la fase sólida, el LOQ fue de 0,073 ng/g y el LOD de 0,024 ng/g. Los valores entre el LOD y el LOQ se consideraron detectados pero no cuantificables con precisión suficiente, y por ello no se incluyen en las tablas.

Tal como se muestra en la Tabla 4-14, los valores de concentración total de contaminantes emergentes varían notablemente entre buques. La fragata F-102 Almirante Juan de Borbón presenta las concentraciones más elevadas de ibuprofeno y naproxeno, lo que podría deberse a una mayor carga orgánica asociada a su dotación. El diclofenaco, sin embargo, no pudo ser cuantificado en la mayoría de las muestras por encontrarse por debajo del límite de detección. Estas diferencias podrían estar

relacionadas con la frecuencia y tipo de uso de cada fármaco: el ibuprofeno, de libre dispensación, aparece con mayor frecuencia, mientras que naproxeno y diclofenaco requieren prescripción médica. Además, factores como el tamaño de la dotación, el perfil sanitario del buque, la presencia de botiquín médico y la tasa de renovación de aguas pueden influir directamente en la concentración detectada.

4.3.2 Caracterización de antiinflamatorios de uso antibacteriano

A continuación, se presentan los resultados correspondientes al segundo grupo de contaminantes emergentes: antiinflamatorios de uso antibacteriano. Estos compuestos suponen un riesgo ambiental relevante debido a su persistencia y al desarrollo de resistencias microbianas. Entre los analizados se encuentran: eritromicina, roxitromicina, sulfametoxazol, trimetoprima, cefalexina, ciprofloxacino, azitromicina, claritromicina, citalopram, carbamazepina, fluoxetina y diazepam. En las tablas de resultados se presentan con su denominación en inglés, habitual en estudios analíticos.

Los valores reflejados en Tabla 4-17 corresponden a la suma de las concentraciones detectadas en la fase líquida (ver Tabla 4-15) y la fase sólida (ver Tabla 4-16), permitiendo así una evaluación más completa de la carga total presente en las aguas residuales. Los compuestos analizados fueron eritromicina, roxitromicina, sulfametoxazol, trimetoprima, cefalexina, ciprofloxacino, azitromicina, claritromicina, citalopram, carbamazepina, fluoxetina y diazepam, todos ellos ampliamente utilizados en tratamientos médicos tanto a bordo como en tierra.

En las tablas de resultados se muestran únicamente aquellos compuestos que han podido ser cuantificados en al menos una de las muestras, es decir, aquellos cuya concentración ha superado el límite de cuantificación (LOQ) del método analítico. En los casos en los que los valores se situaron por debajo de dicho umbral, no se han incluido por motivos de fiabilidad y rigor. Los límites aplicados fueron de 0,67 ng/L (LOQ) y 0,22 ng/L (LOD) para la fase líquida, y 0,33 ng/g (LOQ) y 0,11 ng/g (LOD) para la fase sólida.

Los resultados muestran una variabilidad significativa entre buques. El *Cantabria* destaca por presentar los valores más elevados en la mayoría de los antibióticos cuantificados, especialmente en ciprofloxacino (258,25 ng/L) y azitromicina (242,54 ng/L). Esta elevada carga podría deberse a una combinación de factores como una dotación más numerosa, un mayor uso del servicio médico o una retención prolongada de aguas residuales.

La fragata *Almirante Juan de Borbón* presenta también niveles destacados, con concentraciones altas en ciprofloxacino (239,12 ng/L) y azitromicina (127,79 ng/L), mientras que la fragata *Victoria* muestra valores generalmente más bajos, salvo en azitromicina, donde alcanza la concentración más alta de toda la muestra (304,47 ng/L), y en citalopram (13,66 ng/L), probablemente por un consumo puntual elevado o una menor renovación de aguas.

Estas diferencias, al igual que en el caso de los AINEs, refuerzan la idea de que el tipo de buque, la dotación, el perfil sanitario y operativo y el sistema de almacenamiento de aguas condicionan directamente la composición del efluente. Esta información resulta esencial para plantear sistemas de tratamiento adaptados a las características reales de cada unidad naval.

Fase líquida	CONCENTRACIÓN (ng/L)						
	Roxithromycin	Sulfamethoxazole	Trimethoprim	Ciprofloxacin	Azithromycin	Clarithromycin	Citalopram
ALM JUAN DE BROBÓN	3,96	<0,22	<0,22	110,7	100,2	3,96	13,66
CANTABRIA	9,3	<0,22	<0,22	146,5	91,4	7,37	<0,67
VICTORIA	0,29	0,49	1,76	3242,2	304,5	<0,22	<0,67

Tabla 4-15. Concentración de antibióticos en la fase líquida de las aguas residuales por buque (elaboración propia)

	CONCENTRACIÓN (ng/l)				
Fase sólida	Cephalexin	Ciprofloxacin	Azithromycin	Citalopram	Fluoxetine
ALM JUAN DE BROBÓN	0,47	128,4	27,61	50,5	<0,33
CANTABRIA	<0,11	111,8	151,17	<0,33	<0,33
VICTORIA	0,33	-	-	<0,33	1,85

Tabla 4-16. Concentración de antibióticos en la fase sólida de las aguas residuales por buque (elaboración propia)

	CONCENTRACIÓN (ng/l)							
	Roxithromycin	Sulfamethoxazole	Trimethoprim	Ciprofloxacin	Azithromycin	Clarithromycin	Fluoxetine	Citalopram
ALM JUAN DE BROBÓN	3,96	<0,22	<0,22	239,115	127,79	3,96	<0,33	13,66
CANTABRIA	9,275	<0,22	<0,22	258,25	242,54	7,37	<0,33	<0,67
VICTORIA	0,29	0,49	1,76	3242,22	304,465	<0,22	1,85	<0,67

Tabla 4-17. Concentración total de antibióticos en la fase líquida de las aguas residuales por buque (elaboración propia)

Cabe destacar que los estudios sobre la presencia de contaminantes emergentes en aguas residuales generadas a bordo de buques son aún escasos, especialmente en el ámbito militar. La mayoría de las investigaciones disponibles se centran en buques civiles o sistemas terrestres, lo que limita las posibilidades de comparación directa. No obstante, los resultados obtenidos en este trabajo se alinean con los escasos estudios previos existentes. Por ejemplo, [35] se identificó la presencia de ibuprofeno, naproxeno y diclofenaco en aguas grises procedentes de buques, con predominancia del ibuprofeno debido a su uso generalizado y persistencia en el medio. De forma similar, en otro estudio [36] se observó que estos contaminantes se acumulan con mayor facilidad en sistemas con baja frecuencia de renovación y condiciones de almacenamiento prolongado, como ocurre en algunas unidades analizadas en este estudio. Las concentraciones detectadas en la fragata *Almirante Juan de Borbón*, especialmente en el caso del ibuprofeno, se encuentran dentro del rango superior de lo reportado por estos autores, lo que refuerza la necesidad de considerar estos compuestos en el diseño y mejora de los sistemas de tratamiento de aguas residuales a bordo.

4.4 Propuestas de mejora en la gestión de las aguas residuales en buques de la Armada Española

4.4.1 Problemáticas existentes

El análisis de las condiciones de operación de las plantas TAR en distintos buques de la Armada ha permitido identificar una serie de problemáticas frecuentes, tanto a nivel funcional como estructural, que afectan al rendimiento y fiabilidad de los sistemas de tratamiento de aguas residuales:

- **Atascos en las tuberías por mal uso de los aseos:** una de las incidencias más recurrentes es la obstrucción de las conducciones por vertido de materiales inadecuados, como toallitas húmedas, papel en exceso o productos de higiene no solubles. Esta práctica, aunque común, provoca bloqueos puntuales que interfieren en el transporte del agua residual hacia la planta, especialmente en sistemas de vacío. Esto interrumpe el funcionamiento del sistema de

recogida, puede provocar sobrepresiones, pérdida de vacío y situaciones de desbordamiento en los aseos.

- **Reducción progresiva del diámetro útil de las tuberías:** a medio y largo plazo, el arrastre continuo de materia orgánica, detergentes y restos sólidos genera procesos de cristalización y acumulación de residuos en el interior de las tuberías. Esto provoca una reducción progresiva del diámetro efectivo de paso, dificultando el flujo hidráulico, incrementando las pérdidas de carga y reduciendo la eficiencia general del sistema. Este fenómeno limita el caudal que puede transportar el sistema, afecta el rendimiento de las bombas y aumenta la posibilidad de obstrucciones severas.
- **Degradación estructural de las conducciones:** se ha detectado que en algunos buques las tuberías presentan un desgaste físico significativo debido a la corrosión interna, pequeñas fisuras, porosidad o abrasión provocada por el paso continuo de residuos sólidos. Esta degradación compromete la integridad del sistema, favorece filtraciones y agrava los problemas de obstrucción. Esto puede causar fugas, contaminación cruzada, pérdida de estanqueidad y costes adicionales de reparación o sustitución de tramos de tubería.
- **Fallo de componentes eléctricos y mecánicos del sistema:** en varios casos se han reportado fallos en elementos críticos como filtros de aspiración (obturados por sólidos finos), fusibles quemados, pérdida de alimentación eléctrica en el cuadro principal, o defectos en compresores y sensores de nivel. Estas incidencias afectan directamente al funcionamiento automatizado del sistema TAR y pueden dejarlo inoperativo si no se detectan a tiempo. Estas fallas provocan interrupciones en el tratamiento, necesidad de intervención manual y riesgo de vertido de aguas sin tratar.
- **Obstrucción de válvulas y pérdida de operatividad por acumulación de residuos:** en componentes como válvulas de descarga, se ha observado pérdida de funcionalidad tras su uso prolongado, debido a la acumulación de residuos en zonas muertas o de difícil acceso. Esta situación provoca que las válvulas no abran o cierren correctamente, afectando al proceso de evacuación o al control de llenado de los depósitos intermedios.
- **Diseño ineficiente del sistema de recogida:** en algunos casos, se ha detectado la presencia de elementos redundantes o superfluos en el trazado de las tuberías, como tramos en desuso, ramificaciones innecesarias o conducciones excesivamente largas sin flujo. Estas configuraciones favorecen zonas de acumulación, dificultan la limpieza y generan puntos críticos de obstrucción que no pueden purgarse fácilmente. Esto reduce la eficiencia global del sistema, dificulta el mantenimiento y aumenta la probabilidad de fallos localizados en la red de saneamiento del buque.
- **Ausencia de sistemas para cuantificar el caudal de aguas residuales:** una de las principales limitaciones detectadas en este estudio ha sido la falta de instrumentos específicos para medir el volumen de aguas residuales generadas a bordo. Actualmente, la mayoría de los buques no dispone de caudalímetros ni registros automáticos que permitan conocer con precisión los caudales diarios de aguas grises y negras. Esto obliga a recurrir a estimaciones teóricas basadas en ratios estándar por persona y día, lo que introduce incertidumbre en el dimensionamiento de las plantas TAR y en la evaluación de su rendimiento real. Esta carencia dificulta el diseño ajustado de los sistemas de tratamiento, impide la planificación preventiva de mantenimientos y limita la trazabilidad ambiental de las operaciones del buque.

4.4.2 Propuestas de mejora

Para afrontar las problemáticas descritas, se proponen una serie de medidas orientadas a optimizar la eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y control técnico en la gestión de aguas residuales en los buques de la Armada Española. Estas propuestas abordan tanto aspectos técnicos como de concienciación y organización:

- **Fomentar la concienciación ambiental a bordo:** es esencial impulsar una cultura de responsabilidad en torno a la gestión de aguas residuales. La falta de conocimiento sobre las consecuencias de malas prácticas a bordo (como el vertido inadecuado de residuos) incide directamente en el deterioro del sistema. Se recomienda implementar campañas de sensibilización dirigidas a las dotaciones, incluyendo sesiones formativas periódicas, cartelería visible en aseos y espacios técnicos, e integración de contenidos ambientales en los planes de formación del personal. Además, se propone mantener las inspecciones técnicas ya existentes, incorporando un enfoque ambiental que verifique el cumplimiento de buenas prácticas operativas y refuerce la cultura de gestión responsable.
- **Establecer un protocolo de limpieza periódica de tuberías y sistemas TAR:** la acumulación de residuos y cristalizaciones en las conducciones requiere un mantenimiento preventivo programado. Se propone calendarizar limpiezas periódicas utilizando productos desincrustantes y desengrasantes específicos para redes de saneamiento, que disuelvan compuestos orgánicos y minerales sin dañar las tuberías ni afectar el funcionamiento del sistema. Por ejemplo, productos enzimáticos biodegradables o soluciones a base de ácido cítrico, ácido fosfórico o mezclas alcalinas controladas han demostrado ser eficaces en la eliminación de incrustaciones y biofilm. Estas limpiezas ayudarían a mantener la capacidad hidráulica del sistema, prevenir bloqueos y prolongar la vida útil tanto de las conducciones como de los equipos asociados al tratamiento.
- **Instalar caudalímetros digitales en puntos estratégicos:** dado que no existen sistemas actuales para cuantificar con precisión los caudales generados, se plantea la instalación de caudalímetros con registro automático y conectividad al sistema de control del buque. Esta medida permitiría disponer de datos reales sobre el volumen de aguas grises y negras generadas, facilitando el dimensionamiento adecuado de las plantas TAR, el control operativo y la planificación de descargas en puerto o mantenimientos.
- **Digitalizar los registros de gestión del sistema TAR:** se recomienda crear una base de datos digital que incluya el volumen de aguas generadas, incidencias detectadas, tareas de mantenimiento realizadas y limpiezas efectuadas. Esta herramienta facilitaría auditorías internas, evaluaciones de desempeño y la toma de decisiones basada en evidencias.
- **Evaluar el uso de materiales alternativos a las tuberías de CuNi (cobre-níquel):** en la mayoría de los buques de la Armada se emplean tuberías de CuNi para el sistema de aguas residuales debido a su resistencia a la corrosión marina. Sin embargo, se ha detectado cierto descontento con este material, ya que su elevado coste, su peso y la dificultad en su mantenimiento y manipulación (especialmente en reparaciones o modificaciones del sistema) limitan su operatividad y encarecen las actuaciones técnicas. Como alternativa viable, se propone considerar el uso de polietileno reticulado de alta densidad (PE-X o HDPE) o polipropileno (PP-R), materiales plásticos utilizados con éxito en instalaciones navales modernas y en la industria offshore. Estos materiales presentan ventajas como: alta resistencia química y a la abrasión, incluso frente a aguas residuales agresivas y compuestos químicos utilizados en limpiezas, mayor flexibilidad y facilidad de instalación, peso significativamente menor, lo que reduce las cargas estructurales y facilita el transporte a

bordo, costes de adquisición y mantenimiento más bajos. Además, tanto el HDPE como el PP-R cuentan con una buena durabilidad en condiciones marinas, con una vida útil estimada superior a 25 años si se instalan correctamente. Para entornos críticos o con altas temperaturas, puede valorarse también el uso de PVDF (fluoruro de polivinilideno), aunque tiene un coste más elevado.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Este Trabajo Fin de Grado ha permitido realizar, por primera vez en el contexto de la Armada Española, una cuantificación y caracterización detallada de las aguas residuales generadas a bordo de distintos buques. A través del análisis de siete unidades representativas, se ha obtenido información precisa de la carga contaminante presente en las aguas residuales, tanto en condiciones de puerto como de navegación.

Los resultados confirman que las aguas residuales generadas en los buques de la Armada presentan una carga contaminante igual o superior a la de buques civiles e incluso a las aguas residuales urbanas en parámetros clave como DQO, nitrógeno y fósforo. Estas diferencias son especialmente significativas en los nutrientes, superando en algunos casos en más de un 200 % los valores típicos urbanos, lo que subraya la necesidad de tratamientos adaptados a esta realidad.

Asimismo, el estudio demuestra que las características del efluente varían en función del tipo de buque, su dotación, régimen operativo y sistema de recogida, lo que pone de manifiesto la importancia de realizar caracterizaciones individualizadas. Por ejemplo, unidades como la fragata *Cristóbal Colón* o el *Cartagena*, con configuraciones técnicas distintas, muestran concentraciones significativamente más elevadas que otros buques con mayor dotación como el *Castilla*, lo que evidencia que el volumen generado no es el único factor determinante.

En conjunto, estos hallazgos refuerzan la necesidad de dimensionar y optimizar los sistemas de tratamiento a bordo (TAR) en base a las condiciones reales de operación, incorporando tecnologías más eficientes y estableciendo estrategias de mantenimiento y control adaptadas a cada unidad.

5.2 Líneas futuras

Este trabajo abre varias líneas de investigación de gran valor para futuros TFG en el ámbito naval y ambiental:

- **Instalación de caudalímetros digitales** en puntos estratégicos de los buques, con el fin de cuantificar los caudales reales generados y reducir la dependencia de estimaciones teóricas.

- **Caracterización microbiológica** de las aguas residuales, incluyendo indicadores como coliformes fecales, *E. coli* o enterococos, para valorar los riesgos sanitarios asociados a los vertidos o reutilización.
- **Evaluación del rendimiento real de las plantas TAR** a bordo mediante análisis comparativos antes y después del tratamiento, aplicables a diferentes modelos y configuraciones.
- **Estudio de materiales alternativos en los sistemas de conducción**, como tuberías de polietileno o polipropileno, frente a los actuales sistemas metálicos, considerando eficiencia hidráulica, durabilidad y mantenimiento.
- **Análisis del impacto del perfil de uso de productos de limpieza y medicamentos** sobre la composición de las aguas residuales, con especial atención a los contaminantes emergentes y su variabilidad entre buques.
- **Diseño de sistemas de tratamiento avanzados que permitan la reutilización segura de las aguas residuales**, por ejemplo, en labores de limpieza del buque o incluso en los inodoros, lo que reduciría el consumo de agua potable y aumentaría la autonomía operativa.

Estas líneas permitirían continuar profundizando en la mejora de la gestión de aguas residuales en buques, contribuyendo tanto a la eficiencia operativa como al compromiso ambiental de la Armada Española.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. J. Gámez, «Portada», Desarrollo Sostenible. Accedido: 22 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- [2] Telos Fundación Telefónica «¿Quo vadis, ODS? - Telos Fundación Telefónica» web revista Telos Fundación Telefónica. Accedido: 11 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://telos.fundaciontelefonica.com/ods-logros-futuro/>
- [3] A. Rijo, «El Informe Europeo de Desarrollo Sostenible 2025 propone una lista de prioridades para la nueva cúpula UE», Reds-sdsn. Accedido: 11 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://reds-sdsn.es/el-informe-europeo-de-desarrollo-sostenible-2025-propone-una-lista-de-prioridades-para-la-nueva-cupula-ue/>
- [4] J. D. M. Franco, «La ONU adopta finalmente su nuevo tratado para proteger los océanos - EFE», EFE Noticias. Accedido: 22 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://efe.com/medio-ambiente/2023-06-19/la-onu-adopta-finalmente-su-nuevo-tratado-para-proteger-los-oceanos/>
- [5] IMO «International Maritime Organization». Accedido: 24 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/>
- [6] I. Blanco Blázquez, «EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS Y DISEÑO PRELIMINAR DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA BUQUES». 2021 de 2020.
- [7] MARPOL 73/78 «Artículos del Convenio MARPOL, 1973-1978. Artículos, protocolos, anexos e interpretaciones unificadas del Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973».
- [8] OMI «Prevención de la contaminación por las aguas sucias de los buques». Accedido: 28 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Sewage-Default.aspx>
- [9] OMI «Convenio y Protocolo de Londres». Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/London-Convention-Protocol.aspx>
- [10] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico «Directiva Marco del Agua». Accedido: 4 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/marco-del-agua.html>
- [11] OMI «Convenio internacional de Hong Kong para el reciclaje seguro y ambientalmente racional de los buques, 2009». Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/The-Hong-Kong-International-Convention-for-the-Safe-and-Environmentally-Sound-Recycling-of-Ships.aspx>
- [12] J. S.-F. Martín-Peña, «EL REGLAMENTO EUROPEO SOBRE RECICLADO DE BUQUES» 2020
- [13] H. C. Grupo, «Tratamiento de Aguas Residuales en Buques». Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hc-grupo.com/tratamiento-de-aguas-residuales-en-buques/>
- [14] OMI «Prevención de la contaminación por las aguas sucias de los buques». Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Sewage-Default.aspx>
- [15] G. A. Celdrán, R. M. Castro, y L. P. Rial, «Análisis y mejoras del plan de gestión de residuos en barcos de la Armada» marzo 2020

- [16] «Lleva cerrada más de 3 años Imperial Beach | Noticias de Tijuana | El Imparcial», Lleva cerrada más de 3 años Imperial Beach | Noticias de Tijuana. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.elimparcial.com/tij/tijuana/2025/01/19/lleva-cerrada-mas-de-3-anos-imperial-beach/>
- [17] R. V. Caro, «Sistemas de tratamiento de aguas residuales a bordo», Fundación Exponav en Ferrol. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://exponav.org/blog/puertos-y-buques/sistemas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-a-bordo/>
- [18] F. B. Funes, «Qué son las aguas grises y cómo se tratan | todoagua». Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.todoagua.es/que-son-aguas-grises/>
- [19] GEA «Bilge Water Treatment». Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gea.com/en/marine/protecting-seas-oceans/bilge-water-treatment/>
- [20] OMI «Anexo I del Convenio MARPOL – Prevención de la contaminación por hidrocarburos». Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/OilPollution-Default.aspx>
- [21] OMI «Gestión del agua de lastre». Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/BallastWaterManagement.aspx>
- [22] Llalco, Fluid Technology «Gestión y tratamiento de aguas de lastre (Ballast Water Treatment Management)» Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.llalco.com/division-naval/tratamiento-de-aguas-de-lastre-barcos/>
- [23] Meacon Co., Ltd «Medición del caudal de agua de mar». Accedido: 24 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.meaconsensor.com/training/sea-water-flow-measurement>
- [24] United States Environmental Protection Agency Office of Wastewater Management «Graywater Discharges from Vessels» Washington, DC 20460.
- [25] Orozco Lab «¿Que es el ph? ¿Cuál es su impacto en el agua residual?» Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.oroicolab.info/que-es-el-ph-cual-es-su-impacto-en-el-agua-residual>
- [26] BMS - Butler Manufacturing Services «Comprensión de la demanda química de oxígeno en las aguas residuales». Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.butlerms.com/education-blog/sewage-parameters-7-chemical-oxygen-demand-cod>
- [27] GEDAR, «Clasificación de los Sólidos del Agua Residual • **【GEDAR: Equipos y Productos para el AGUA】** », GEDAR: Equipos y Productos para el AGUA. Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gedar.es/clasificacion-de-los-solidos-del-agua-residual/>
- [28] W. Hassen *et al.*, Chemical and Microbiological Assessment of Wastewater Discharged along the Mediterranean Sea», *Sustainability*, vol. 14, n.º 5, p. 2746, feb. 2022, doi: 10.3390/su14052746.
- [29] «Planta de tratamiento de líquidos cloacales», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 25 de febrero de 2025. Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Planta_de_tratamiento_de_liquidos_cloacales&oldid=165670263
- [30] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico «Problemática actual». Accedido: 16 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/mar-menor/problematika-actual.html>
- [31] «Problemática actual», Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/mar-menor/problematika-actual.html>

- [32] Higiene Ambiental «Indicadores de contaminación fecal en aguas». Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://higieneambiental.com/indicadores-de-contaminacion-fecal?>
- [33] Dirección Nacional de Determinantes de la Salud, Ministerio de Salud Presidencia de la Nación «DIRECTRICES SANITARIAS PARA USO SEGURO DE AGUAS RECREATIVAS», diciembre 2017.
- [34] E. García-Gómez *et al.*, «Identification of emerging contaminants in greywater emitted from ships by a comprehensive LC-HRMS target and suspect screening approach», *Environmental Pollution*, vol. 366, p. 125524, feb. 2025, doi: 10.1016/j.envpol.2024.125524.
- [35] M. Rivadulla *et al.* «Occurrence and fate of CECs (OMPs, ARGs and pathogens) during decentralised treatment of black water and grey water, *Science of The Total Environment*, vol. 915, p. 169863, mar. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169863.
- [36] Diario de la Universidad Pablo de Olavide «Descubren microorganismos capaces de degradar completamente el ibuprofeno en aguas residuales – DUPO». Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.upo.es/diario/ciencia/2025/03/descubren-microorganismos-capaces-degradar-completamente-ibuprofeno-aguas-residuales/>
- [37] Madrid Blogs «Una nueva forma de eliminar naproxeno de las aguas residuales mediante oxidación húmeda catalítica con catalizadores basados en metales nobles soportados sobre nanoesferas de carbono. - El Agua». Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2021/04/30/133962>
- [38] Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales «Estudio de la eliminación de diclofenaco en aguas residuales mediante fotocátalisis heterogénea con TiO₂».
- [39] Tecnoaqua «Artículo técnico Evaluación de tratamientos para la eliminación de resistencia a antibióticos en aguas residuales», agosto de 2023.
- [40] J. M. Moreno, M. L. Ortiz, P. F. Aracil «Seguridad-Hidrica_2023_68.pdf». Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/137469/1/Seguridad-Hidrica_2023_68.pdf
- [41] SEFILTRA «Filtro de Arena y Carbón Activo Purificación de fluidos», Sefiltra. Accedido: 14 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sefiltra.com/productos/filtros-arena-y-carbon-activo/>
- [42] Fluence «Sistemas de Ósmosis Inversa». Accedido: 14 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fluencecorp.com/es/reactor-biologico-con-membranas-mbr/>
- [43] H. C. Grupo, «Esterilización de agua potable Gefico». Accedido: 14 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hc-grupo.com/que-es-la-osmosis-inversa-y-para-que-se-usa-en-los-buques/>
- [44] J. Huesa Water Technology «Oxidación Avanzada»- Tratamiento de aguas. Accedido: 14 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://jhuesa.com/tecnologias/oxidacion-avanzada>
- [45] Vitaqua «Tratamiento Físico-Químico del Agua: Métodos y Beneficios ->». Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://vitaqua.es/tratamiento-fisico-quimico-del-agua-metodos-y-beneficios/>
- [46] Condorchem Enviro Solutions «Tratamiento biológico de aguas residuales». Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales/>
- [47] Aqua «Beneficios del tratamiento biológico de aguas residuales». Accedido: 14 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.aqua.com.mx/blog/beneficios-del-tratamiento-biologico-de-aguas-residuales>

- [48] Ministerio de Defensa «31ª Escuadrilla de Superficie - Fragatas clase “Álvaro de Bazán” - Buques - Armada - Gobierno de España». Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/prefLang-es/04Fragatas-F100-F80>
- [49] Ministerio de Defensa «Fragata “Almirante Juan de Borbón” (F-102) - Fragata “Almirante Juan de Borbón” - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 15 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/prefLang-es/04Fragatas-F100-F80--01fragatas-clase-alvaro-de-baza-f-100--02fragata-alm-juan-de-borbon-f-102>
- [50] Ministerio de Defensa «Fragata “Cristóbal Colón” (F-105) - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 15 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/prefLang-es/04Fragatas-F100-F80--01fragatas-clase-alvaro-de-baza-f-100--05fragata-cristobal-colon-f-105>
- [51] Ministerio de Defensa «Buque de Aprovisionamiento de Combate “Cantabria” (A-15) - B.A.C. Cantabria - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 15 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/prefLang-es/06buques-logisticos--02buque-aprovisionamiento-combate-cantabria>
- [52] Ministerio de Defensa «Fragata “Victoria” (F-82) - Fragata “Victoria” - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/prefLang-es/04Fragatas-F100-F80--02fragata-clase-santa-maria-f-80--02fragata-victoria-f-82>
- [53] Ministerio de Defensa «Buque de Asalto Anfíbio Castilla (L-52) - B.A.A. “Castilla” - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/prefLang-es/03Buquesanfibios--02buque-asalto-anfibio-castilla-l-52>
- [54] Ministerio de Defensa «Patrullero de altura “Vigía” (P-73) - Unidades participantes - Especiales - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/conocenos/especiales/prefLang-es/05actividades--95trident--02unidades--07vigia-es>
- [55] R. D. InfoDefensa, «La Armada recibe el nuevo buque logístico y de remolque Cartagena», Infodefensa - Noticias de defensa, industria, seguridad, armamento, ejércitos y tecnología de la defensa. Accedido: 15 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/5105281/armada-recibe-nuevo-buque-logistico-remolque-cartagena>
- [56] Defensa.com, «Llegada del buque “Cartagena” de la Armada a su puerto base - Noticias Defensa España», Defensa.com. Accedido: 15 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.defensa.com/espana/nuevo-buque-multiproposito-cartagena-armada-llega-sera-puerto>
- [57] Evaluación de un biorreactor para la eliminación de compuestos farmacéuticos y nutrientes en aguas residuales «Turbidez».

- [58] HANNA Instruments «Cubeta test Nitrógeno Total, 50 test». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.hannainst.es/parametros/4237-cubeta-test-nitrogeno-total-50-test.html#/753-rango-10_a_150_mg_l_n
- [59] HANNA Instruments «Nt rango alto Protocolo HANNA».
- [60] HANNA Instruments «Cubeta test Fósforo Total rango alto (0,0 a 32,6 mg/ L P) 50 test». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.hannainst.es/parametros/4234-cubeta-test-fosforo-total-rango-alto-00-a-326-mg-l-p-50-test.html#/748-rango-rango_alto_00_a_326_mg_l
- [61] A. López, «pH en Tratamiento de Aguas Residuales», Hanna Instruments Chile. Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hannachile.com/2024/05/10/ph-en-tratamiento-de-aguas-residuales/>
- [62] E. Bursón, «El importante papel del pH en el tratamiento del agua», ProDos. Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://prodos.es/el-importante-papel-del-ph-en-el-tratamiento-del-agua/>
- [63] Orozco Lab «¿Que es el ph? ¿Cuál es su impacto en el agua residual?» Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.orozcolab.info/que-es-el-ph-cual-es-su-impacto-en-el-agua-residual>
- [64] L. M. V. Peña, «“Microfiltración de agua residual depurada. Mejora del flujo de permeado por inyección de gas”».
- [65] EPA (United States Environmental Protection Agency) «Graywater Discharges from Vessels» Washington DC, 2011.
- [66] WWF CANADA «National vessel dumping assessment: quantifying the threat of ship waste to Canada’s marine protected areas», febrero 2022.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

Las aguas residuales generadas en buques contienen contaminantes como materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados, hidrocarburos y microorganismos patógenos. Su vertido sin tratamiento adecuado puede provocar efectos significativos, entre los que se incluyen eutrofización de ecosistemas marinos, alteración de la biodiversidad, acumulación de contaminantes emergentes o impactos importantes en zonas costeras o puertos. El cumplimiento del Convenio MARPOL (Anexo IV) y la implementación de sistemas de tratamiento avanzados en buques permiten reducir estos impactos y mejorar la calidad de los efluentes antes de su descarga al mar. En este sentido, la Armada Española ha implementado sistemas de tratamiento fisicoquímico y biológico en sus embarcaciones, permitiendo una gestión más eficiente y sostenible de los residuos líquidos.

La gestión adecuada de las aguas residuales en embarcaciones militares no solo impacta la sostenibilidad del medio marino, sino que también influye en la eficiencia operativa de los buques y en el cumplimiento de normativas internacionales. Esto se debe a que un sistema eficiente de tratamiento y disposición de aguas residuales reduce el riesgo de averías, minimiza los tiempos de mantenimiento y evita la acumulación de residuos que podrían afectar el rendimiento de los equipos a bordo. Además, facilita operaciones prolongadas sin necesidad de realizar descargas frecuentes en puertos, lo que permite mayor autonomía y capacidad de respuesta en misiones.

El tratamiento de aguas residuales en buques tiene un impacto directo en la salud y seguridad de la dotación a bordo, así como en las comunidades costeras cercanas a las rutas de navegación. Entre las principales consideraciones se encuentran:

- **Salud de la tripulación:** la acumulación de aguas residuales sin tratamiento adecuado puede generar proliferación de bacterias y virus, afectando la calidad del aire en espacios confinados y aumentando el riesgo de infecciones.
- **Protección de comunidades pesqueras y turísticas:** la descarga inadecuada de aguas residuales en zonas cercanas a la costa puede contaminar caladeros y afectar la economía de pescadores y operadores turísticos.
- **Responsabilidad social y compromiso ambiental:** la Armada Española, a pesar de estar exenta de ciertas regulaciones marítimas civiles, ha adoptado voluntariamente estándares ambientales para minimizar su impacto ecológico y demostrar liderazgo en prácticas sostenibles.

La gestión de aguas residuales en buques implica costos relacionados con la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento. Sin embargo, una inversión adecuada en tecnologías eficientes puede traducirse en beneficios económicos a largo plazo:

- **Reducción de sanciones y cumplimiento normativo:** aunque no siempre es obligatorio para embarcaciones militares cumplir con todas las normativas ambientales, existen países con restricciones específicas que no permiten la navegación en sus aguas ni la estancia en puerto sin sistemas de depuración. Cumplir con estas regulaciones evita multas y sanciones asociadas a descargas ilegales de aguas residuales.
- **Optimización de recursos:** la reutilización de aguas tratadas para fines no potables (como limpieza de cubiertas) reduce la demanda de agua potable y disminuye costos operativos.
- **Mantenimiento y vida útil de equipos:** un tratamiento eficiente previene la acumulación de sedimentos y obstrucciones en tuberías, reduciendo el desgaste de los sistemas de saneamiento a bordo.
- **Eficiencia logística:** minimizar la necesidad de descargar aguas residuales en puertos con infraestructura limitada mejora la autonomía de los buques y optimiza su operatividad.

El presente trabajo demuestra la relevancia de una gestión eficiente de aguas residuales en buques militares desde un enfoque ambiental, económico y social (véase Figura 0-1). La optimización de los sistemas de tratamiento no solo cumple con normativas internacionales, sino que también mejora la sostenibilidad operativa de la flota naval y reduce su huella ecológica en los ecosistemas marinos.

Como resultado, la Armada Española se posiciona como una institución comprometida con la protección del medioambiente y la adopción de tecnologías que garantizan una navegación más segura y sostenible. Su esfuerzo por mejorar la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales contribuye significativamente a la preservación de los océanos y a la responsabilidad social de sus operaciones marítimas.



Figura 0-1. Implicaciones sociales, económicas y ambientales del presente TFG (elaboración propia)

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El tratamiento y gestión de las aguas residuales en los buques no es solo una cuestión técnica o de cumplimiento normativo, sino también un compromiso ético y social. La manera en que se gestionan estos residuos tiene un impacto directo en el medioambiente, en la salud de la dotación a bordo y en las comunidades costeras que dependen de los recursos marinos.

Desde un punto de vista ético, este trabajo resalta la importancia de cumplir con normativas internacionales como el Convenio MARPOL, no solo por obligación legal, sino porque es nuestra responsabilidad proteger los océanos y minimizar la huella ambiental en las operaciones marítimas. Asegurar que las aguas residuales sean tratadas antes de su vertido es una acción clave para evitar la contaminación del medio marino y garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos.

En el aspecto social, una mala gestión de las aguas residuales no solo afecta la biodiversidad marina, sino que también puede repercutir en la salud de la dotación del buque y en la calidad de vida de las comunidades pesqueras. Un inadecuado tratamiento de estas aguas puede facilitar la propagación de enfermedades a bordo y afectar a poblaciones que dependen del mar para su sustento, como los pescadores.

Por otro lado, este trabajo también plantea una reflexión sobre la importancia de la innovación tecnológica con un enfoque ético y sostenible. Implementar sistemas de tratamiento más eficientes, optimizar las plantas TAR y utilizar herramientas como caudalímetros digitales no solo mejora la eficiencia operativa de los buques, sino también el compromiso de la Armada con la sostenibilidad y el cuidado del entorno.

En definitiva, la gestión de aguas residuales en buques debe abordarse no solo desde una perspectiva técnica, sino también con una visión ética y social. Este estudio pone en valor la necesidad de avanzar hacia prácticas más sostenibles, responsables y alineadas con la protección del medioambiente y la salud pública, contribuyendo así a una navegación más consciente y respetuosa con el entorno.