



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Biofuncionalización de filtros impresos por fabricación
aditiva con biomasa de algas cultivadas y comerciales*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Gonzalo M^a Rizo Cuquerella

DIRECTORES: Rosa Devesa Rey
Jesús del Val García

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Biofuncionalización de filtros impresos por fabricación
aditiva con biomasa de algas cultivadas y comerciales*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

En las últimas décadas, el agua ha pasado a considerarse un recurso clave: renovable, pero limitado. Este hecho ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales adsorbentes, especialmente aquellos basados en soluciones sostenibles y en recursos naturales. En este contexto, la biomasa microalgal ha despertado un interés creciente debido a su capacidad para interactuar con distintos contaminantes y a su carácter renovable.

Partiendo de esta idea, el presente Trabajo de Fin de Grado plantea el desarrollo de materiales biofuncionalizados mediante la incorporación de biomasa microalgal en matrices de resina fotopolimerizable, empleando técnicas de fabricación aditiva. El objetivo principal es evaluar su viabilidad como filtros adsorbentes para la eliminación de contaminantes en el agua.

Para ello, se han fabricado filtros mediante impresión 3D con distintos porcentajes de microalga, tanto cultivada como comercial. Posteriormente, se ha analizado su comportamiento estructural y funcional a través de diferentes ensayos, entre los que se incluyen pruebas de dureza, observación microscópica y estudios de adsorción frente a contaminantes como cobre, nitrato, fosfato y aluminio.

Los resultados muestran que la incorporación de biomasa microalgal mejora la capacidad adsorbente del material frente a metales pesados, así como una mayor eficacia en el caso de la biomasa cultivada frente a la comercial. Por otro lado, se ha identificado un límite en el contenido de biomasa a partir del cual se ve comprometida la integridad estructural de las piezas.

En conjunto, los resultados obtenidos apuntan al potencial de estos materiales como alternativa en sistemas de tratamiento de agua, abriendo la puerta a futuras líneas de trabajo orientadas a su mejora y aplicación práctica.

PALABRAS CLAVE

Microalgas, adsorción, fabricación aditiva, tratamiento de aguas, andamiaje.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la mano experta de mis tutores, la Dra. Devesa y el Dr. Del Val. Su cayado ha sido una guía constante a lo largo de los meses de elaboración del trabajo, del que los tres nos sentimos orgullosos.

Toda la ayuda moral viene de casa. Mi familia es el pilar fundamental por el que trabajo. Gracias especialmente a mis padres, Sol y Gonzalo.

Mi último adalid: mis amigos, no me olvido de vosotros. Gracias por vuestra paciencia y consejos en las horas más oscuras.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción.....	7
1.1 Contexto y motivación	7
1.2 Problemática.....	8
2 Objetivos	10
3 Estado del arte	11
3.1 El agua como recurso esencial y vulnerable	11
3.2 Tipos de contaminantes presentes en el agua.....	14
3.2.1 Clasificación general de contaminantes.....	14
3.2.2 Contaminantes de origen agrícola y urbano: nutrientes y materia orgánica.....	15
3.2.3 Contaminantes industriales y compuestos orgánicos persistentes.....	15
3.2.4 Metales pesados	15
3.2.5 Microplásticos y contaminantes emergentes	16
3.2.6 Consideraciones sobre concentración y forma en el medio.....	16
3.3 Tratamientos convencionales y tradicionales del agua	17
3.3.1 Tratamientos físicos.....	18
3.3.2 Tratamientos químicos.....	19
3.3.3 Tratamientos biológicos.....	19
3.3.4 Tecnologías avanzadas y limitaciones: Tratamiento de filtración por membranas.....	20
3.3.5 El tratamiento de adsorción como alternativa.....	20
3.3.6 Necesidad de nuevos materiales adsorbentes	21
3.4 Microalgas como biomasa biofuncional en el tratamiento de aguas	21
3.4.1 Características generales y composición de la biomasa	21
3.4.2 Aplicaciones industriales y ambientales	22
3.4.3 Bioadsorción y eliminación de metales pesados.....	22
3.4.4 Biomasa cultivada y biomasa comercial.....	23
3.4.5 Sistemas de cultivo de microalgas	23
3.4.6 Integración de biomasa en matrices poliméricas	24
3.5 Fabricación aditiva como tecnología habilitadora en el diseño de materiales funcionales.....	24
3.5.1 Evolución y fundamentos de la fabricación aditiva.....	24
3.5.2 Clasificación de tecnologías de fabricación aditiva.....	25
3.5.3 Fotopolimerización de resinas: fundamentos y características.....	26

3.5.4 Diseño para fabricación aditiva (DfAM) y control geométrico.....	26
3.5.5 Materiales compuestos impresos y funcionalización	26
3.5.6 Aplicación potencial en sistemas de filtración	27
3.6 Marco normativo del agua y su tratamiento.....	27
3.6.1 Recomendaciones internacionales	27
3.6.2 Marco normativo europeo.....	27
3.6.3 Legislación nacional y criterios de vertido	28
4 Materiales y métodos.....	29
4.1 Materiales.....	29
4.1.1 Tipo de polímero empleado	29
4.1.2 Biomasa microalgal	30
4.2 Métodos.....	31
4.2.1 Diseño del filtro	32
4.2.2 Técnica de impresión utilizada	32
4.2.3 Elección de impresora 3D.....	33
4.2.4 Parámetros de la impresión.....	33
4.2.5 Procedimiento de impresión	34
4.2.6 Preparación y tratamiento del cultivo de biomasa microalgal.....	35
4.2.7 Ensayo de adhesión.....	37
4.2.8 Caracterización de las muestras obtenidas por fabricación aditiva	38
4.2.9 Metodología empleada para los ensayos de adsorción de contaminantes	40
5 Resultados y discusión	43
5.1 Impresión aditiva de piezas alga-resina.....	43
5.2 Resultados preliminares	45
5.2.1 Morfología superficial de los andamiajes fabricados	45
5.2.2 Resultados de la prueba de adsorción de dióxido de carbono	47
5.2.3 Resultados de la prueba de dureza.....	47
5.3 Resultados de la adsorción de contaminantes	48
5.3.1 Prueba I: Adsorción de piezas impresas con mezcla resina-alga comercial.....	48
5.3.2 Prueba II: Adsorción de piezas impresas con resina tras una prueba de adhesión	51
5.3.3 Prueba III: Adsorción de piezas impresas con mezcla resina-alga comercial tras una prueba de adhesión	54
5.3.4 Prueba IV: Adsorción de piezas impresas con mezcla resina-alga cultivada.....	55
5.3.5 Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de contaminantes de las estructuras fabricadas.....	57
6 Conclusiones y líneas futuras	61

6.1 Conclusiones	61
6.2 Líneas futuras	62
7 Bibliografía.....	63
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	66
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	67
Anexo III: Uso de herramientas de apoyo en la redacción.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1 Distribución global del agua en la Tierra y proporción de sus principales reservas de agua dulce (Elaboración propia).....	11
Figura 3-2 Esquema de principales vías de contaminación del agua (Elaboración propia).....	13
Figura 3-3 Acumulación de residuos sólidos en un cuerpo de agua contaminado [9].....	14
Figura 3-4 Crecimiento del consumo mundial de fertilizantes nitrogenados ([7])	15
Figura 3-5 Eficacia relativa de los tratamientos de agua según el tipo de contaminante (Elaboración propia a partir de: [3], [1], [10]).....	17
Figura 3-6 Sistemas de filtración industriales con tanque de fibra de vidrio [12].	18
Figura 3-7 Esquema comparativo de distintos procesos de tratamiento de aguas para la eliminación de contaminantes, incluyendo precipitación química [13].....	19
Figura 3-8 Planta de tratamiento biológico de aguas residuales con decantadores circulares [15] .	20
Figura 3-9 Filamentos de <i>Arthrospira Plantensis</i> al microscopio [17].....	22
Figura 3-10 Cultivo extensivo de macroalgas en sistema multitrófico (bahía de Sanggou, China) [20]	23
Figura 3-11 Clasificación de los procesos de fabricación aditiva en el panorama actual (Elaboración propia)	25
Figura 4-1 Representación comercial, microscópica y molecular de la biomasa de <i>Spirulina</i> (Elaboración propia)	31
Figura 4-2 Diagrama de flujo del diseño experimental general	31
Figura 4-3 Geometría del filtro empleada en el estudio: (a) vista general del modelo tridimensional, (b) detalle de la estructura reticular tras su modificación en Autodesk Inventor®	32
Figura 4-4 Sistema de impresión empleado: (a) impresora de fotopolimerización Elegoo Mars 3 Pro [30] y (b) resina fotopolimerizable utilizada [27].	33
Figura 4-5 Preparación de las piezas en el software Chitubox, mostrando la disposición y generación de soportes para la impresión.....	34
Figura 4-6 Esquema del proceso de fabricación de las piezas mediante impresión 3D.....	34
Figura 4-7 Piezas impresas adheridas a la placa de construcción tras el proceso de impresión	35
Figura 4-8 Cultivo de microalgas en la tercera semana	36
Figura 4-9 Montaje utilizado para el ensayo de adhesión de microalgas.....	38
Figura 4-10 Microscopio digital Dino-Lite Edge.....	38
Figura 4-11 Durómetro Shore A empleado en la medición de la dureza (modelo PCE-DX-AS). ..	39
Figura 4-12 Ensayo de adsorción de CO ₂ en cámara cerrada con medidor M2000C y filtros 0 % de alga.....	40
Figura 4-13 Tabla explicativa de la metodología empleada en la prueba de adsorción.....	41
Figura 4-14 Fotómetro multiparamétrico HI83300 empleado para la determinación de contaminantes.....	41

Figura 5-1 Comparación de piezas impresas según su porcentaje de biomasa comercial empleado	43
Figura 5-2 Muestra procesada de microalga cultivada.....	45
Figura 5-3 Imágenes obtenidas mediante microscopía digital de la estructura superficial de las piezas con distinto contenido de microalgas: (a) 0 %, (b) 0,5 %, (c) 1 % y (d) 2 %, (e) 4 %, (f) 6 %, (g) 8 %, (h) 10 %, (i) 12 %	46
Figura 5-4 Evolución de la concentración relativa de CO_2 : (a) comportamiento completo del ensayo y (b) detalle de los primeros minutos.....	47
Figura 5-5 Dureza en función del contenido de microalga	48
Figura 5-6 Eliminación de Cu^{2+} en función del porcentaje de alga comercial en la pieza	49
Figura 5-7 Eliminación de PO_4^{3-} en función del porcentaje de alga comercial en la pieza.....	50
Figura 5-8 Eliminación de $NO_3 - N$ en función del porcentaje de alga comercial en la pieza	50
Figura 5-9 Eliminación de Al^{3+} en función del porcentaje de alga comercial en la pieza	51
Figura 5-10 Eliminación de Cu^{2+} en función del tiempo de inmersión en el cultivo de algas.....	52
Figura 5-11 Eliminación de PO_4^{3-} en función del tiempo de inmersión en el cultivo de algas.....	52
Figura 5-12 Eliminación de $NO_3 - N$ en función del tiempo de inmersión en el cultivo de algas	53
Figura 5-13 Eliminación de Al^{3+} en función del tiempo de inmersión en el cultivo de algas.....	53
Figura 5-14 Eliminación de Cu^{2+} en función del porcentaje de alga cultivada en la pieza.....	55
Figura 5-15 Eliminación de PO_4^{3-} en función del porcentaje de alga cultivada en la pieza.....	56
Figura 5-16 Eliminación de $NO_3 - N$ en función del porcentaje de alga cultivada en la pieza	56
Figura 5-17 Eliminación de Al^{3+} en función del porcentaje de alga cultivada en la pieza	57
Figura 5-18 Aspecto de las disoluciones de fosfato tras 30 minutos de contacto con filtros de distinto contenido de biomasa microalgal.....	58
Figura 5-19 Eliminación de contaminantes en función del porcentaje de alga comercial en la pieza	58
Figura 5-20 Eliminación de contaminantes en función del tiempo de la pieza en el cultivo	59
Figura 5-21 Eliminación de contaminantes en función del porcentaje de alga cultivada en la pieza	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1 Propiedades de Resina Estándar+ Clear, según fabricante [27]	29
Tabla 5-1 Porcentajes de mezcla y observaciones de impresión con microalga comercial	44
Tabla 5-2 Porcentajes de mezcla y observaciones de impresión con microalga cultivada	45
Tabla 5-4 Resultados de adsorción de la prueba I.....	49
Tabla 5-5 Resultados de adsorción de la prueba II.....	51
Tabla 5-6 Resultados de adsorción de la prueba III	54
Tabla 5-7 Resultados de adsorción de la prueba IV.....	55

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone el contexto y la motivación del trabajo, se definen los objetivos perseguidos y se describe la metodología adoptada para su desarrollo, así como la estructura general del documento.

1.1 Contexto y motivación

La disponibilidad de agua de calidad constituye uno de los pilares fundamentales para el desarrollo sostenible de las sociedades contemporáneas. El incremento de la presión demográfica, la intensificación de la actividad industrial y agrícola y la creciente generación de residuos han contribuido, en las últimas décadas, a una degradación progresiva de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos. Este deterioro se manifiesta en la presencia de contaminantes de diversa naturaleza —inorgánicos, orgánicos, microbiológicos y emergentes— cuya eliminación eficaz representa un desafío técnico y ambiental de primer orden.

Entre los contaminantes de mayor relevancia se encuentran los metales pesados, caracterizados por su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación. No obstante, la complejidad actual de las aguas residuales no se limita a este grupo, sino que incluye nutrientes en exceso, compuestos orgánicos persistentes y partículas microplásticas, entre otros. Esta diversidad composicional dificulta la aplicación de soluciones universales y exige el desarrollo de tecnologías capaces de adaptarse a distintos escenarios contaminantes.

Los tratamientos convencionales de depuración —físicos, químicos y biológicos— han demostrado eficacia en numerosos contextos; sin embargo, presentan limitaciones relacionadas con costes operativos, generación de residuos secundarios, baja selectividad frente a mezclas complejas o pérdida de eficiencia ante contaminantes en bajas concentraciones. En este contexto, la adsorción se ha instituido como una alternativa tecnológica relevante debido a su versatilidad y aplicabilidad frente a diferentes tipos de sustancias. No obstante, los materiales adsorbentes tradicionales, como el carbón activado, presentan también inconvenientes asociados a su coste y regeneración.

Paralelamente, el desarrollo de nuevos materiales funcionales ha abierto líneas de investigación orientadas a la utilización de recursos naturales y biomasa como alternativas sostenibles. La biomasa microalgal, en particular, ha sido objeto de creciente interés debido a la presencia en su estructura celular de grupos funcionales capaces de interactuar con iones metálicos y otras especies químicas. Estas características la posicionan como un material potencialmente adecuado para aplicaciones en tratamiento de aguas.

De forma complementaria, la evolución de la fabricación aditiva ha permitido superar restricciones geométricas propias de los procesos tradicionales de fabricación. Las tecnologías basadas en fotopolimerización de resinas ofrecen la posibilidad de diseñar estructuras porosas con geometrías internas controladas, optimizando el flujo del fluido y la superficie de contacto con el material activo. La integración de componentes funcionales en matrices poliméricas impresas constituye una línea de investigación emergente en el ámbito de los materiales compuestos avanzados.

En este marco convergen tres elementos tecnológicos de interés: la necesidad de nuevos sistemas de tratamiento más sostenibles y adaptables, el potencial adsorbente de la biomasa microalgal y la capacidad de la fabricación aditiva para generar estructuras optimizadas. La combinación de estos elementos fundamenta la motivación del presente trabajo.

1.2 Problemática

A pesar del creciente interés en el uso de biomasa como material adsorbente, su aplicación directa en sistemas de filtración presenta dificultades prácticas relacionadas con la recuperación del material, la estabilidad mecánica y la reproducibilidad del sistema. La utilización de biomasa en suspensión implica etapas adicionales de separación y puede limitar su aplicación en sistemas continuos.

Por otro lado, si bien la fabricación aditiva ha sido ampliamente empleada en la creación de estructuras personalizadas en diversos campos, la integración directa de biomasa microalgal en matrices fotopolimerizables para el desarrollo de filtros biofuncionalizados no ha sido explorada de forma sistemática. La incorporación de un componente biológico en una resina susceptible de fotocurado plantea desafíos asociados a la homogeneidad de la mezcla, la estabilidad estructural del material resultante y la preservación de la capacidad funcional de la biomasa.

El problema técnico abordado en este trabajo se formula como sigue: determinar la viabilidad de diseñar y fabricar filtros estructuralmente estables mediante impresión 3D en resina que incorporen biomasa microalgal y mantengan capacidad de interacción con contaminantes acuáticos.

La respuesta a esta cuestión requiere no solo el desarrollo de un procedimiento de fabricación adecuado, sino también la evaluación experimental del comportamiento del material frente a distintos contaminantes, con especial atención a aquellos de carácter persistente como los metales pesados.

Habida cuenta de la problemática expuesta, y para abordarla del modo más eficaz posible, el desarrollo del trabajo se ha estructurado en varias fases. En primer lugar, se realizará un análisis del estado del arte relativo a contaminación hídrica, tratamientos convencionales, fabricación aditiva y aplicaciones de microalgas en tratamiento de aguas. Posteriormente, se procederá a la preparación de mezclas de resina con biomasa microalgal.

Los filtros se fabricarán mediante una impresora 3D basada en tecnología de fotopolimerización, utilizando distintas mezclas resina-alga. Se realizará un estudio pormenorizado de las propiedades de los distintos filtros según la proporción de la mezcla hasta alcanzar la proporción adecuada para una pieza con el mayor porcentaje de biomasa posible, que asegure las exigencias de dureza y capacidad de retención establecidas. Finalmente, se llevarán a cabo ensayos preliminares de interacción con contaminantes en medio acuoso, evaluando parámetros relacionados con la adsorción y comportamiento estructural del sistema.

Por último, el presente documento se estructura en los siguientes capítulos. Tras esta introducción, se desarrollan los objetivos del Trabajo de Fin de Grado en el Capítulo 2. El Capítulo 3, *Estado del arte*, aborda la problemática de la calidad del agua, los contaminantes más relevantes, los tratamientos

convencionales y las tecnologías emergentes relacionadas con la fabricación aditiva y la biomasa microalgal. El Capítulo 4, *Materiales y métodos*, describe los materiales empleados y la metodología seguida. En el Capítulo 5, *Resultados y discusión*, se presentan y analizan los resultados obtenidos. Finalmente, el Capítulo 6, *Conclusiones y líneas futuras*, recoge las principales conclusiones del trabajo y propone posibles líneas de investigación futura.

2 OBJETIVOS

En coherencia con la problemática previamente expuesta, se define a continuación el concepto del trabajo, así como los objetivos que orientan su desarrollo.

Se establece, por tanto, como concepto del trabajo que la incorporación de biomasa microalgal, tanto cultivada como comercial, en una matriz polimérica fotopolimerizable permite obtener filtros impresos mediante fabricación aditiva que presenten estabilidad estructural y capacidad adsorbente frente a distintos contaminantes presentes en el agua. En este marco, el objetivo general del presente Trabajo Fin de Grado es diseñar, fabricar y evaluar dichos filtros biofuncionalizados mediante impresión 3D en resina con incorporación de biomasa microalgal.

Habida cuenta del objetivo general planteado, se definen los siguientes objetivos específicos:

- I. Preparar mezclas homogéneas de resina fotopolimerizable con biomasa microalgal, tanto cultivada como comercial.
- II. Fabricar prototipos de filtros mediante impresión 3D y evaluar su capacidad de procesado en función del contenido de biomasa.
- III. Analizar la estabilidad estructural, integridad y comportamiento mecánico de las piezas obtenidas.
- IV. Evaluar el comportamiento adsorbente del material frente a distintos contaminantes representativos en disolución.
- V. Estudiar la interacción entre el material impreso y el cultivo de microalgas mediante ensayos de adhesión.
- VI. Comparar el comportamiento de filtros fabricados con biomasa cultivada y biomasa comercial.

3 ESTADO DEL ARTE

Este apartado tiene como objeto suministrar un marco de referencia, en base a la literatura científica actual, que permita describir los distintos fenómenos relativos al presente trabajo. A lo largo del Estado del Arte se listarán todos aquellos contaminantes que se encuentran presentes con mayor persistencia en el recurso hídrico, así como comentar todos aquellos estudios, métodos y tratamientos relevantes en la conservación del agua. Se hará hincapié en los metales pesados como principal contaminante de estudio y la filtración —muy especialmente con biomasa— como principal tratamiento de agua residual.

3.1 El agua como recurso esencial y vulnerable

El agua constituye un recurso natural imprescindible para el desarrollo de la vida y para el funcionamiento de las sociedades humanas. Su papel como soporte de los ecosistemas, y factor primordial en actividades agrícolas e industriales convierte este recurso en un factor esencial de cara al desarrollo económico y a la conservación del planeta. Aunque el agua se encuentre en grandes cantidades, el uso de este recurso se ve limitado debido a las fuentes de agua útiles en la Tierra. Esta limitación confiere al agua un carácter de importancia crítica a tener en cuenta en la sociedad moderna. Atendiendo a la Figura 3-1 podemos definir el agua como recurso renovable pero finito. Siendo tan sólo el 0,007% del total de agua presente en el planeta aprovechable por el ser humano.

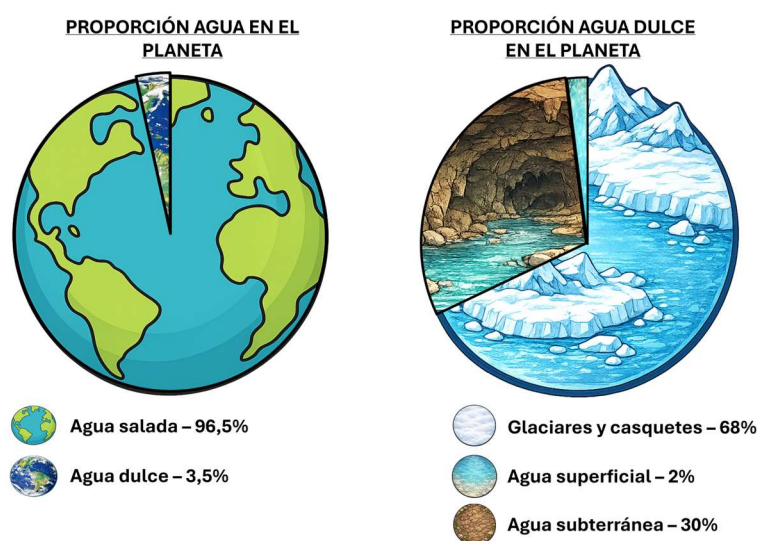


Figura 3-1 Distribución global del agua en la Tierra y proporción de sus principales reservas de agua dulce (Elaboración propia)

En este contexto, en las últimas décadas, el empleo exhaustivo de este recurso para fines urbanos, industriales y agrícolas está provocando el deterioro progresivo de la calidad del agua, consecuencia directa de la incorporación de contaminantes de diversa naturaleza a las fuentes de agua superficiales y subterráneas. Este hecho, unido a la creciente escasez de agua disponible [1], ha reforzado la contaminación del agua como el principal factor que compromete la disponibilidad de este recurso de forma segura, afectando tanto a la salud humana como al equilibrio de los ecosistemas acuáticos.

La relación entre la calidad del agua y la salud pública es especialmente relevante. Tal y como el doctor Ezequiel Ander-Egg señalaba hace ya cuarenta y nueve años en el informe de la OMS de 1977: «la crisis del agua es una realidad y bien pudiera constituir uno de los epígrafes de prensa más sugestivos y dramáticos de principios del siglo XXI» [2]. Numerosos organismos internacionales, entre ellos la Organización Mundial de la Salud [3], han señalado que el consumo de agua contaminada o deteriorada es la mayor causa de enfermedades de origen hídrico. De manera particular, la presencia de contaminantes químicos, microbiológicos y físicos en el agua puede tener efectos adversos que van desde enfermedades gastrointestinales e infecciosas hasta efectos a largo plazo debidos a la ingestión prolongada de estas sustancias. Como es de suponer, este problema crece en aquellas regiones donde el acceso a sistemas de saneamiento y tratamiento es limitado [1], [4].

En el ámbito ambiental, la degradación de la calidad del agua también tiene consecuencias que pueden resultar catastróficas en medios acuáticos y terrestres. El vertido de aguas residuales expone a los ecosistemas a una alta concentración de contaminantes y puede desencadenar procesos de eutrofización [5] y pérdida de biodiversidad. Estos efectos no se limitan solo al medio acuático, este medio puede ser la causa de propagación de estos efectos a otros medios, afectando al suelo, la atmósfera y, en última instancia, a los seres humanos.

En el contexto marino, por ejemplo, se ha documentado un aumento significativo de la entrada de residuos plásticos desde tierra hacia los océanos. La *American Association for the Advancement of Science* [6] estimó que millones de toneladas de residuos plásticos alcanzan anualmente el medio marino, evidenciando la magnitud del impacto derivado de una gestión inadecuada de residuos sólidos. Además, este fenómeno no solo afecta al ambiente marino, sino que también muestra cómo, a menudo, las actividades terrestres tienen terribles consecuencias en la degradación de océanos.

Otro caso significativo de degradación del agua se da en el ámbito de la agricultura (Figura 3-2). De hecho, la creciente demanda de esta actividad ha motivado una intensificación exponencial de la agricultura y ha conllevado un uso creciente de fertilizantes nitrogenados y fosfatados, haciendo de la agricultura una de las principales fuentes de contaminación en el planeta. El empleo excesivo de estos compuestos favorece su lixiviación hacia acuíferos y cursos superficiales, alterando la composición química del agua y contribuyendo a fenómenos como la eutrofización. El aporte descontrolado de nutrientes modifica el equilibrio ecológico de los sistemas acuáticos, generando proliferaciones algales y reducciones del oxígeno disuelto, con efectos adversos sobre la fauna y flora acuáticas [7].

En el ámbito industrial (Figura 3-2), la generación de efluentes líquidos con presencia de metales pesados, compuestos orgánicos persistentes y otros contaminantes emergentes ha añadido una dimensión adicional al problema. Los metales pesados, en particular, presentan características que agravan su impacto ambiental: son elementos no biodegradables, pueden bioacumularse en organismos vivos y biomagnificarse a lo largo de la cadena trófica, y poseen efectos tóxicos incluso a concentraciones relativamente bajas. Diversos estudios han señalado su persistencia en suelos y aguas, así como su potencial riesgo para la salud humana y la integridad de los ecosistemas.

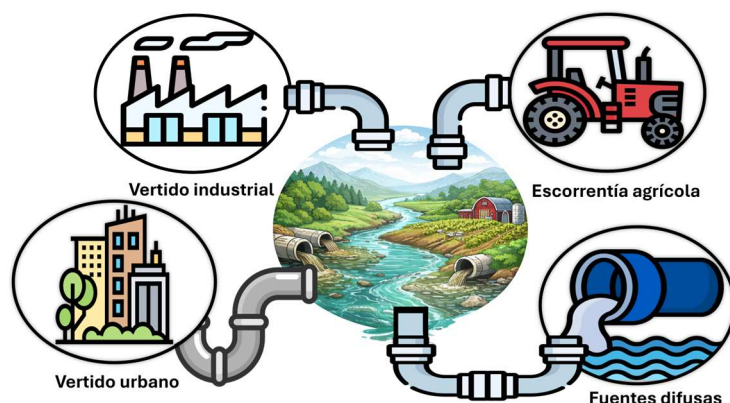


Figura 3-2 Esquema de principales vías de contaminación del agua (Elaboración propia)

Además de los contaminantes tradicionales, en las últimas décadas han emergido nuevas categorías de sustancias presentes en el agua, tales como microplásticos, productos farmacéuticos y compuestos de uso industrial reciente. Estas sustancias, frecuentemente denominadas contaminantes emergentes, no siempre están reguladas de forma exhaustiva y pueden presentar efectos ecotoxicológicos todavía en estudio. La revisión sobre microplásticos en el medio marino destaca su amplia distribución, su persistencia y su capacidad de interacción con otros contaminantes químicos, actuando potencialmente como vectores de transporte [8].

En conjunto, el deterioro de la calidad del agua no responde a un único factor, sino a la convergencia de múltiples presiones ambientales.

Por consiguiente, el control de calidad del agua es prioritario para la protección de los recursos hídricos, y no solo —como cabría esperar— mantener un control cuantitativo de este recurso. Las herramientas fundamentales para garantizar un consumo sostenible de agua son el tratamiento adecuado de aguas residuales con la eliminación eficiente de contaminantes en la misma, minimizando en todo lo posible el vertido de agua contaminada al medio natural. Además, dada la creciente complejidad de los contaminantes presentes en las aguas residuales actualmente, esto plantea importantes retos tecnológicos, que requieren el estudio y desarrollo de nuevas técnicas para tratar el agua, y que resulten eficaces y sostenibles [4].

Por todo ello, resulta crítico para la conservación ambiental y las necesidades sociales estudiar posibles nuevas soluciones para tratar el agua residual, y con ello mejorar su calidad. De este modo, antes de abordar propuestas concretas de tratamiento, resulta imprescindible comprender la relevancia del agua como recurso esencial, así como las causas y consecuencias de su vulnerabilidad frente a la contaminación, aspectos que constituyen el punto de partida del presente estado del arte.

Desde una perspectiva tecnológica y científica, el reconocimiento del agua como recurso esencial y vulnerable ha impulsado el desarrollo de sistemas de tratamiento cada vez más sofisticados. No obstante, la complejidad creciente de los contaminantes y su diversidad estructural plantean nuevos desafíos para los métodos convencionales de depuración.

En consecuencia, el análisis del estado actual de los recursos hídricos y de sus deficiencias no solo permite comprender la magnitud del problema, sino que justifica la investigación y el desarrollo de nuevos materiales y configuraciones tecnológicas orientadas a la mejora de la calidad del agua. Dentro de este marco general se inscribe el presente trabajo, que aborda la integración de biomasa microalgal en estructuras filtrantes fabricadas mediante técnicas de fabricación aditiva como posible estrategia para contribuir a la mitigación de la contaminación hídrica.

3.2 Tipos de contaminantes presentes en el agua

La degradación progresiva de la calidad de los recursos hídricos está asociada a la incorporación de una amplia variedad de sustancias y agentes de origen natural y antrópico. En el ámbito técnico-ambiental, los contaminantes presentes en el agua pueden clasificarse atendiendo a su naturaleza física, química o biológica, a su origen (doméstico, industrial, agrícola o urbano) y a su comportamiento en el medio acuático (disueltos, en suspensión o asociados a fases coloidales) (Figura 3-3).



Figura 3-3 Acumulación de residuos sólidos en un cuerpo de agua contaminado [9]

3.2.1 Clasificación general de contaminantes

En términos amplios, los contaminantes hídricos pueden agruparse en tres grandes categorías:

- I. Contaminantes físicos, tales como sólidos en suspensión, partículas sedimentables y turbidez, que alteran las propiedades ópticas y físicas del agua y pueden afectar procesos ecológicos como la fotosíntesis.
- II. Contaminantes químicos, que incluyen compuestos inorgánicos (metales pesados, sales, nutrientes) y orgánicos (hidrocarburos, pesticidas, productos farmacéuticos, compuestos industriales).
- III. Contaminantes biológicos, como bacterias patógenas, virus, protozoos y otros microorganismos capaces de generar riesgos sanitarios.

A esta clasificación tradicional se añade en las últimas décadas el concepto de contaminantes emergentes, que engloba sustancias cuya presencia en el medio acuático ha sido detectada recientemente o cuya regulación aún no está plenamente desarrollada, tales como microplásticos, productos de cuidado personal y residuos farmacéuticos.

La diversidad de contaminantes implica comportamientos fisicoquímicos distintos. Algunos compuestos se encuentran predominantemente en fase disuelta (por ejemplo, nitratos o ciertos metales en forma iónica), mientras que otros pueden asociarse a partículas sólidas o existir como coloides. Este comportamiento condiciona tanto su movilidad en el medio como los métodos de tratamiento aplicables.

3.2.2 Contaminantes de origen agrícola y urbano: nutrientes y materia orgánica

El sector agrícola constituye una de las principales fuentes difusas de contaminación hídrica (Figura 3-4). El uso intensivo de fertilizantes nitrogenados y fosfatados favorece la lixiviación de nitratos (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y fosfatos (PO_4^{3-}) hacia acuíferos y cursos superficiales. El empleo excesivo de fertilizantes nitrogenados ha sido identificado como un factor determinante en la alteración de la calidad del agua, generando incrementos significativos de la concentración de nitratos en sistemas acuáticos [7]. Los nutrientes en concentraciones elevadas pueden desencadenar procesos de eutrofización, caracterizados por el crecimiento acelerado de biomasa vegetal y fitoplanctónica, reducción del oxígeno disuelto y alteración de las comunidades biológicas.

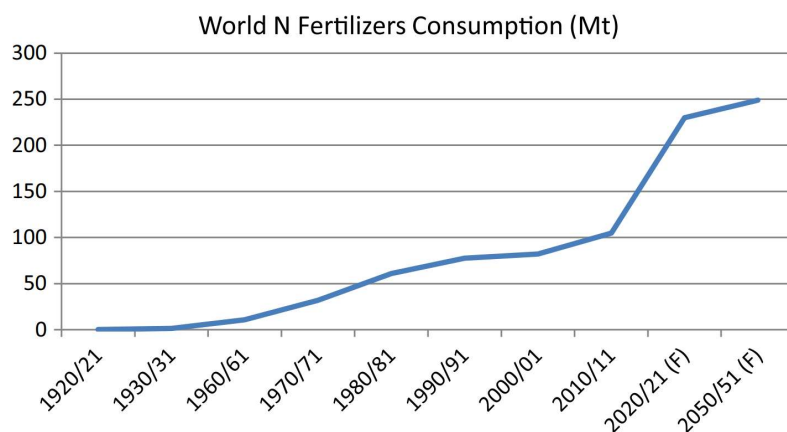


Figura 3-4 Crecimiento del consumo mundial de fertilizantes nitrogenados ([7])

En el aspecto urbano, los vertidos domésticos aportan materia orgánica biodegradable, detergentes, compuestos nitrogenados y microorganismos patógenos. La carga orgánica se evalúa comúnmente mediante parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o la demanda química de oxígeno (DQO), indicadores de la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia presente en el agua.

3.2.3 Contaminantes industriales y compuestos orgánicos persistentes

Los efluentes industriales pueden contener una amplia gama de sustancias químicas, dependiendo del sector productivo. Entre los compuestos más relevantes se encuentran hidrocarburos aromáticos, disolventes orgánicos, colorantes, surfactantes y subproductos de procesos químicos. Una revisión sistemática de la gestión de aguas industriales señala la creciente complejidad de los efluentes y la dificultad de aplicar soluciones universales debido a la variabilidad en composición y concentración [4].

En muchos casos, estos compuestos presentan carácter persistente, resistencia a la biodegradación y potencial toxicidad crónica. Su presencia en concentraciones incluso bajas puede generar efectos letales en organismos acuáticos y alterar procesos ecológicos esenciales.

3.2.4 Metales pesados

Entre los contaminantes inorgánicos, los metales pesados ocupan un lugar destacado debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación. Elementos como plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), cromo (Cr) o arsénico (As) pueden incorporarse al medio acuático a través de descargas industriales, actividades mineras, combustión de combustibles fósiles y procesos de fabricación diversos.

A diferencia de muchos contaminantes orgánicos, los metales pesados no son biodegradables y pueden permanecer en el ambiente durante largos periodos de tiempo. Su comportamiento químico depende del pH, la presencia de ligandos y las condiciones redox, pudiendo encontrarse en forma disuelta, complejada o asociada a partículas. La revisión sobre contaminación por metales pesados destaca su potencial tóxico, incluso a concentraciones relativamente bajas, y su tendencia a acumularse en tejidos biológicos, generando efectos adversos tanto en organismos acuáticos como en humanos [10].

Desde el prisma ecotoxicológico, los metales pueden interferir en procesos enzimáticos, alterar funciones celulares y afectar la reproducción y supervivencia de especies acuáticas. La biomagnificación a lo largo de la cadena trófica incrementa el riesgo para consumidores superiores, incluyendo al ser humano. Por estas razones, los metales pesados constituyen un modelo de estudio particularmente relevante en el ámbito del tratamiento de aguas.

3.2.5 Microplásticos y contaminantes emergentes

La presencia de microplásticos en sistemas acuáticos ha adquirido especial relevancia en la última década. Estas partículas, generalmente inferiores a 5 mm de tamaño, pueden originarse por fragmentación de residuos plásticos mayores o por liberación directa de productos industriales y domésticos. Estos microplásticos se encuentran distribuidos por todo el medio marino, de forma persistente y en constante interacción con contaminantes químicos adsorbidos en su superficie [8].

Los microplásticos pueden actuar como vectores de transporte de sustancias tóxicas, facilitando su dispersión y potencial ingestión por organismos acuáticos. Además, su tamaño reducido dificulta su eliminación mediante tratamientos convencionales de filtración.

De forma complementaria, estudios recientes han identificado una amplia gama de contaminantes emergentes en aguas residuales, incluyendo productos farmacéuticos, hormonas y compuestos de uso industrial reciente [5]. Estos compuestos, presentes habitualmente en concentraciones del orden de microgramos o nanogramos por litro, pueden ejercer efectos biológicos significativos a largo plazo.

3.2.6 Consideraciones sobre concentración y forma en el medio

A modo de aclaración, conviene señalar que la peligrosidad de un contaminante no depende exclusivamente de su concentración, sino también de su forma química y de su interacción con otros componentes del medio acuático. Algunos contaminantes se encuentran predominantemente en fase disuelta, lo que favorece su movilidad y biodisponibilidad; otros se adsorben sobre partículas en suspensión o sedimentos, pudiendo actuar como reservorios a largo plazo. En términos generales, las concentraciones de contaminantes en aguas naturales varían ampliamente en función del contexto geográfico y de las actividades antrópicas circundantes. Sin embargo, incluso concentraciones relativamente bajas de ciertos compuestos —como metales pesados o contaminantes emergentes— pueden resultar críticas debido a su toxicidad específica y a su persistencia ambiental.

En conjunto, la diversidad de contaminantes presentes en el agua, su distinta naturaleza fisicoquímica y su potencial impacto ambiental y sanitario ponen de manifiesto la complejidad del problema de la calidad hídrica. Este escenario exige el desarrollo y la evaluación de estrategias de tratamiento capaces de abordar una amplia gama de sustancias, con especial atención a aquellas de carácter persistente y bioacumulativo, como los metales pesados. A continuación, se revisan los tratamientos convencionales empleados en la depuración de aguas, así como sus principales limitaciones y áreas de mejora.

3.3 Tratamientos convencionales y tradicionales del agua

La creciente complejidad y diversidad de los contaminantes presentes en los recursos hídricos ha impulsado el desarrollo de múltiples tecnologías de tratamiento orientadas a la eliminación de sustancias físicas, químicas y biológicas. Tradicionalmente, los sistemas de depuración de aguas se estructuran en etapas sucesivas —pretratamiento, tratamiento primario, secundario y, en su caso, terciario— cada una de ellas diseñada para abordar fracciones específicas de la carga contaminante.

En este escenario, surgen todo tipo de tratamientos que pretenden paliar las deficiencias del medio hídrico aplicando propiedades físicas, químicas, biológicas y de otra índole, según el tipo de contaminante que se pretende eliminar. A este respecto, diversos estudios y revisiones establecen el método más eficiente a aplicar según las características del contaminante principal. Con el fin de sintetizar y facilitar la interpretación de esta información, los datos extraídos y analizados a partir de dichas fuentes se recogen de forma comparativa en la Figura 3-5.

			Tratamientos físicos	Tratamientos químicos				Tratamientos biológicos	Adsorción	Membranas
			Sedimentación-flotación-filtración	Coagulación-floculación	Precipitación química	Oxidación química	Intercambio iónico			
Contaminantes físicos	Sólidos en suspensión		MUY ALTA	ALTA	NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	BAJA	ALTA
	Microplásticos*		MODERADA	ALTA	NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	MODERADA	ALTA
Contaminantes químicos	Metales pesados	As, Cd	BAJA	MODERADA	ALTA	NECESARIA	MUY ALTA	NO APLICABLE	ALTA	MUY ALTA
		Cu	BAJA	MODERADA	ALTA	NO APLICABLE	ALTA	NO APLICABLE	ALTA	ALTA
		Fe	MODERADA	ALTA	ALTA	NECESARIA	MODERADA	NO APLICABLE	MODERADA	ALTA
	Sales disueltas		NO APLICABLE	BAJA	BAJA	NO APLICABLE	ALTA	NO APLICABLE	BAJA	MUY ALTA
	Compuestos orgánicos	Hidrocarburos	NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	ALTA	NO APLICABLE	MODERADA	ALTA	MODERADA
		Pesticidas	NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	MODERADA	NO APLICABLE	MODERADA	ALTA	ALTA
	Nutrientes	Nitratos	NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	ALTA	ALTA (desnitrificación)	MODERADA	ALTA
		Fosfatos	BAJA	NO APLICABLE	ALTA	NO APLICABLE	MODERADA	MODERADA	MODERADA	ALTA
		Amonio	NO APLICABLE	NO APLICABLE	BAJA	NO APLICABLE	ALTA	ALTA (nitrificación)	BAJA	ALTA
	Bacterias		NO APLICABLE	MODERADA	NO APLICABLE	ALTA (desinfección)	NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	MUY ALTA
Contaminantes biológicos	Virus		NO APLICABLE	BAJA	NO APLICABLE	ALTA (desinfección)	NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	MUY ALTA
	Protozoos		NO APLICABLE	MODERADA	NO APLICABLE	MODERADA	NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	MUY ALTA

Figura 3-5 Eficacia relativa de los tratamientos de agua según el tipo de contaminante (Elaboración propia a partir de: [3], [1], [10])

En la Figura 3-5 se presenta una síntesis comparativa de la eficacia de los principales tratamientos de depuración de aguas en función del tipo de contaminante, elaborada a partir de la información recopilada en distintas revisiones y estudios de referencia sobre tratamiento de aguas [5], [7], [11]. En ella se recogen, de forma esquemática, distintas categorías de contaminantes —físicos, químicos y biológicos— y su grado de eliminación mediante tratamientos físicos, químicos, biológicos, procesos de adsorción y tecnologías de membrana. La tabla permite identificar de manera rápida qué tecnologías resultan más adecuadas según la naturaleza del contaminante, evidenciando, por ejemplo, la elevada

eficacia de los tratamientos físicos frente a sólidos en suspensión, el buen comportamiento de los procesos químicos en la eliminación de metales pesados, o la alta capacidad de las membranas para la retención de una amplia variedad de especies.

El grado de eficacia de cada tratamiento se representa cualitativamente mediante una escala categórica asociada a intervalos de rendimiento: *muy alta* (>90 % de eliminación), *alta* (70–90 %), *moderada* (40–70 %) y *baja* (<40 %), indicando la capacidad relativa de eliminación del contaminante. Del mismo modo, la expresión *no aplicable* se emplea en aquellos casos en los que el tratamiento no resulta adecuado para ese tipo de contaminante, mientras que el término *necesaria* señala procesos que deben incorporarse de forma obligatoria para lograr su eliminación, como ocurre en determinadas etapas de oxidación. Esta representación permite ofrecer una visión global del comportamiento de las distintas tecnologías y facilita la comparación entre ellas sin necesidad de un análisis detallado de cada caso particular.

A partir de esta clasificación, los tratamientos se analizan a continuación siguiendo los principales grupos recogidos en la Figura 3-5: tratamientos físicos, químicos y biológicos, así como las tecnologías basadas en membranas y los procesos de adsorción.

3.3.1 Tratamientos físicos

Los tratamientos físicos se basan en la separación mecánica de sólidos y partículas presentes en el agua. Entre las operaciones más habituales se encuentran el desbaste, la sedimentación, la flotación y la filtración.

La sedimentación permite la eliminación de sólidos sedimentables mediante la acción de la gravedad, mientras que la flotación —frecuentemente asistida por aire disuelto— favorece la separación de partículas de menor densidad. La filtración, por su parte, emplea medios porosos (arena, carbón granular, membranas) para retener partículas en suspensión y reducir la turbidez (Figura 3-6).

Estas técnicas presentan ventajas claras en términos de simplicidad operativa y bajo consumo energético; sin embargo, su eficacia frente a contaminantes disueltos es limitada. Sustancias como nitratos, metales en forma iónica o compuestos orgánicos solubles no pueden eliminarse eficazmente mediante procesos puramente físicos.



Figura 3-6 Sistemas de filtración industriales con tanque de fibra de vidrio [12]

3.3.2 Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos incorporan reactivos destinados a transformar o precipitar contaminantes presentes en el agua. Entre los procesos más comunes se encuentran:

- Coagulación–floculación, utilizada para agrupar partículas coloidales y facilitar su posterior separación.
- Precipitación química, aplicada especialmente en la eliminación de metales pesados mediante la formación de compuestos insolubles (Figura 3-7).
- Oxidación química, mediante agentes como cloro, ozono o peróxido de hidrógeno, para degradar compuestos orgánicos o desinfectar el agua.

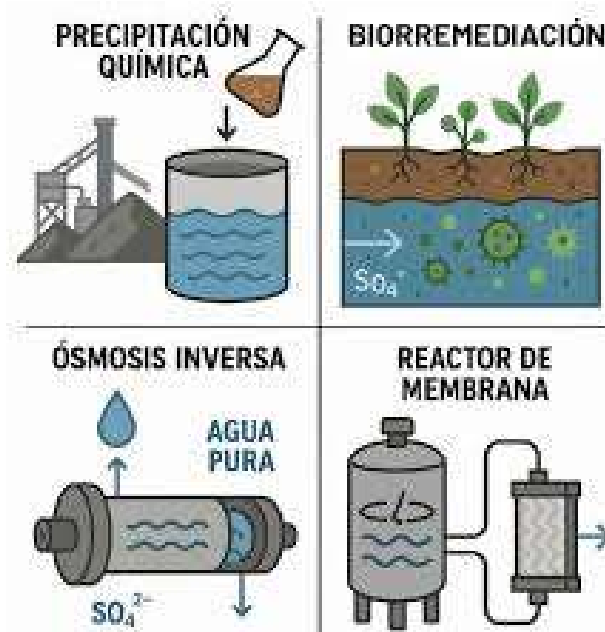


Figura 3-7 Esquema comparativo de distintos procesos de tratamiento de aguas para la eliminación de contaminantes, incluyendo precipitación química [13]

La precipitación química es una de las técnicas más empleadas para la eliminación de metales pesados en efluentes industriales. Sin embargo, este proceso puede generar grandes volúmenes de lodos que requieren gestión posterior, incrementando los costes operativos y el impacto ambiental asociado.

De acuerdo con la literatura consultada sobre técnicas de tratamiento de aguas residuales, muchos procesos químicos presentan elevada eficacia en condiciones controladas, pero implican consumo significativo de reactivos y energía, así como la posible generación de subproductos secundarios [14].

3.3.3 Tratamientos biológicos

Los tratamientos biológicos se basan en la capacidad de microorganismos para degradar materia orgánica y transformar ciertos compuestos químicos. Los sistemas de lodos activados, los reactores biológicos de lecho fijo y los humedales artificiales constituyen ejemplos representativos de esta categoría (Figura 3-8).



Figura 3-8 Planta de tratamiento biológico de aguas residuales con decantadores circulares [15]

Estos procesos resultan particularmente eficaces para la eliminación de materia orgánica biodegradable y nutrientes; no obstante, su rendimiento frente a contaminantes persistentes o metales pesados es limitado. En el caso de los metales, la toxicidad puede incluso inhibir la actividad microbiana, comprometiendo la estabilidad del sistema.

3.3.4 Tecnologías avanzadas y limitaciones: Tratamiento de filtración por membranas

En las últimas décadas se han desarrollado tecnologías avanzadas como la filtración por membranas (microfiltración, ultrafiltración, ósmosis inversa), los procesos de oxidación avanzada y los sistemas híbridos que combinan tratamientos físicos, químicos y biológicos.

Dentro de estas tecnologías avanzadas, destacan especialmente los procesos de filtración por membranas, los cuales constituyen una de las categorías recogidas en la Figura 3-5 debido a su elevada eficacia en la eliminación de múltiples contaminantes.

Las membranas permiten la eliminación eficiente de partículas, microorganismos y, en ciertos casos, solutos disueltos. Sin embargo, presentan limitaciones relacionadas con el ensuciamiento (fouling), el coste energético y la necesidad de mantenimiento especializado.

La literatura reciente sobre gestión de aguas industriales destaca que, aunque existen múltiples tecnologías disponibles, su aplicación óptima depende de la composición específica del efluente, la concentración de contaminantes y las condiciones económicas y regulatorias [4]. No existe, por tanto, una solución universal capaz de abordar con igual eficacia la totalidad de contaminantes presentes en sistemas hídricos complejos.

3.3.5 El tratamiento de adsorción como alternativa

Entre las tecnologías representadas en la Figura 3-5, la adsorción destaca como una alternativa especialmente versátil para la eliminación de una amplia gama de contaminantes, incluidos metales pesados, compuestos orgánicos y colorantes.

La adsorción es un proceso fisicoquímico mediante el cual moléculas o iones presentes en fase líquida se fijan a la superficie de un material sólido denominado adsorbente. Su eficacia depende de factores como:

- Superficie específica del material.
- Naturaleza química de la superficie.

- pH del medio.
- Temperatura.
- Presencia de especies competidoras.

El carbón activado ha sido históricamente uno de los adsorbentes más utilizados debido a su elevada área superficial y capacidad de retención de compuestos orgánicos. No obstante, su coste y la necesidad de regeneración periódica han impulsado la búsqueda de materiales alternativos más sostenibles y económicos. En el caso de los metales pesados, la adsorción ofrece ventajas frente a la precipitación química, especialmente cuando las concentraciones son bajas o cuando se requiere evitar la generación de lodos voluminosos. Diversos estudios han demostrado que materiales con grupos funcionales superficiales adecuados pueden interactuar con iones metálicos mediante mecanismos de intercambio iónico o atracción electrostática.

3.3.6 Necesidad de nuevos materiales adsorbentes

A pesar de los avances tecnológicos, los sistemas convencionales de tratamiento de aguas, tales como los procesos físicos, químicos y biológicos empleados habitualmente en estaciones de depuración, presentan limitaciones relacionadas con:

- Elevados costes de operación.
- Generación de residuos secundarios.
- Dificultad para tratar contaminantes en bajas concentraciones.
- Baja selectividad frente a mezclas complejas.

Este contexto ha favorecido el desarrollo de nuevos materiales adsorbentes basados en recursos naturales, residuos agroindustriales y biomasa. La búsqueda de alternativas sostenibles y de bajo impacto ambiental constituye una línea de investigación activa en el campo del tratamiento de aguas [16]. En particular, la incorporación de materiales biofuncionales capaces de interactuar con distintos contaminantes abre la posibilidad de diseñar sistemas de filtración más versátiles y adaptables. La combinación de principios de adsorción con configuraciones estructurales optimizadas representa una vía prometedora para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos de depuración. En este marco, el empleo de estructuras fabricadas mediante técnicas de fabricación aditiva ofrece oportunidades adicionales en términos de diseño geométrico, control de porosidad y personalización del material filtrante. Antes de abordar el papel específico de la biomasa microalgal como agente adsorbente, resulta pertinente analizar el estado actual y la evolución de la fabricación aditiva como tecnología habilitadora en el desarrollo de materiales funcionales.

3.4 Microalgas como biomasa biofuncional en el tratamiento de aguas

Las microalgas constituyen un grupo diverso de organismos fotosintéticos unicelulares, presentes en ambientes acuáticos continentales y marinos, que desempeñan un papel esencial en los ciclos biogeoquímicos globales. Desde una perspectiva biotecnológica, las microalgas han suscitado un interés creciente debido a su elevada productividad, su versatilidad metabólica y la riqueza de compuestos bioactivos que contienen.

3.4.1 Características generales y composición de la biomasa

Las microalgas comprenden múltiples divisiones taxonómicas, incluyendo clorofitas, diatomeas y cianobacterias, entre otras. Su biomasa se caracteriza por una composición compleja que incluye

proteínas, lípidos, carbohidratos, pigmentos y polisacáridos estructurales. La revisión sobre el potencial futuro de las microalgas destaca su diversidad metabólica y su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales (Figura 3-9) [16].

Desde el punto de vista químico, la pared celular de muchas microalgas contiene grupos funcionales tales como carboxilos ($-\text{COOH}$), hidroxilos ($-\text{OH}$), aminos ($-\text{NH}_2$) y fosfatos, que pueden participar en procesos de interacción con iones metálicos y otras especies químicas presentes en el agua. Esta característica resulta especialmente relevante en el contexto de la adsorción y bioadsorción de contaminantes.



Figura 3-9 Filamentos de *Arthrospira Plantensis* al microscopio [17]

3.4.2 Aplicaciones industriales y ambientales

Tradicionalmente, las microalgas han sido estudiadas por su potencial en la producción de biocombustibles, compuestos nutraceuticos, pigmentos y suplementos alimentarios. Su aplicación en acuicultura, por ejemplo, ha sido ampliamente documentada, utilizándose tanto en forma fresca como concentrada como fuente nutricional para organismos en fases larvarias [11]. Estos estudios demuestran la viabilidad del cultivo, procesamiento y utilización de biomasa microalgal a escala aplicada.

Igualmente, investigaciones sobre condiciones de cultivo específicas, como la mixotrofia en *Phaeodactylum tricornutum*, han mostrado mejoras en la productividad y composición de la biomasa [18]. Estos avances contribuyen a optimizar la producción de biomasa, aspecto relevante cuando se considera su utilización como material funcional. Desde el prisma ambiental, las microalgas han sido empleadas en sistemas de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de nutrientes y la captura de dióxido de carbono. Su capacidad para asimilar nitrógeno y fósforo ha sido ampliamente estudiada en el marco de estrategias de biorremediación.

3.4.3 Bioadsorción y eliminación de metales pesados

Más allá de su papel en la asimilación biológica, la biomasa microalgal —incluso en estado no viable— ha mostrado potencial como material adsorbente en la eliminación de metales pesados. El fenómeno de bioadsorción se basa en interacciones fisicoquímicas entre los grupos funcionales presentes en la superficie celular y los iones metálicos en solución.

Diversos estudios sobre contaminación por metales pesados han subrayado la necesidad de desarrollar métodos eficaces para su eliminación debido a su carácter persistente y tóxico [10]. Bajo este escenario, la biomasa algal ofrece ventajas potenciales frente a adsorbentes convencionales, tales como:

- Disponibilidad a partir de procesos de cultivo.

- Bajo coste relativo.
- Naturaleza renovable.
- Presencia de múltiples sitios activos de unión.

Los mecanismos implicados pueden incluir intercambio iónico, complejación, adsorción superficial y, en algunos casos, precipitación localizada. La eficacia de estos procesos depende de factores como el pH, la concentración inicial del metal, la competencia entre especies iónicas y la superficie específica disponible.

3.4.4 Biomasa cultivada y biomasa comercial

En aplicaciones prácticas, la biomasa microalgal puede proceder tanto de cultivos controlados como de productos comerciales ya procesados. La utilización de biomasa comercial presenta ventajas logísticas y de reproducibilidad, mientras que el cultivo propio permite adaptar las condiciones de crecimiento para modificar características específicas de la biomasa, como contenido en polisacáridos o composición de la pared celular.

Estudios sobre el secado de especies como *Scenedesmus obliquus* han analizado la cinética y modelado del proceso, evidenciando que el tratamiento posterior a la cosecha influye en las propiedades físicas del material [19]. Estos aspectos pueden afectar la accesibilidad de los sitios activos y, por tanto, el rendimiento adsorbente.

3.4.5 Sistemas de cultivo de microalgas

La producción de biomasa algal puede llevarse a cabo mediante diferentes sistemas de cultivo, que varían en complejidad, coste y grado de control del proceso. De forma general, estos sistemas pueden clasificarse en cultivos abiertos (estanques, lagunas) y cultivos cerrados (fotobiorreactores).

Los sistemas abiertos, como estanques o *raceways* (Figura 3-10), presentan la ventaja de su bajo coste y facilidad de operación. Sin embargo, su principal limitación es el escaso control de las condiciones de cultivo, lo que puede dar lugar a contaminaciones, variabilidad en la producción y menor eficiencia en la captación de luz y nutrientes [20].



Figura 3-10 Cultivo extensivo de macroalgas en sistema multitrófico (bahía de Sanggou, China) [20]

Por otra parte, los sistemas cerrados, entre los que destacan los fotobiorreactores, permiten un control mucho más preciso de parámetros como la luz, la temperatura, la concentración de nutrientes y el suministro de CO₂. Este mayor control se traduce en una mayor productividad y estabilidad del cultivo, así como en una reducción del riesgo de contaminación [20].

Dentro de estos sistemas, los fotobiorreactores destacan especialmente por su capacidad para optimizar el crecimiento algal mediante el control de la mezcla y la exposición a la luz, lo que favorece tanto la captación de energía como la eficiencia fotosintética [20]. Asimismo, permiten reproducir condiciones de cultivo de manera consistente, lo que resulta fundamental en aplicaciones experimentales y en la obtención de biomasa con propiedades homogéneas.

A este respecto, los sistemas cerrados, y en particular los fotobiorreactores, representan una solución especialmente adecuada cuando se requiere reproducibilidad, control del proceso y calidad constante de la biomasa producida, aspectos clave en aplicaciones tecnológicas y de investigación.

3.4.6 Integración de biomasa en matrices poliméricas

Uno de los desafíos asociados al uso de biomasa microalgal en sistemas de tratamiento radica en su recuperación y estabilidad. La utilización directa de microalgas en suspensión puede generar problemas de separación posterior y pérdida de material activo.

A este respecto, la integración de biomasa en matrices sólidas o soportes estructurales, conocidos habitualmente como andamiajes o *scaffolds*, representa una estrategia que permite combinar la funcionalidad química de la biomasa con la estabilidad mecánica de un material polimérico. La incorporación previa de biomasa en una matriz fotopolimerizable abre la posibilidad de fabricar estructuras compuestas en las que el componente biológico quede distribuido a lo largo de la superficie del material impreso.

Este enfoque permite concebir el filtro no únicamente como un soporte físico, sino como un material compuesto biofuncional en el que la biomasa actúa como agente adsorbente integrado en la estructura.

En conjunto, las microalgas constituyen un recurso biotecnológico versátil cuya biomasa presenta propiedades potencialmente aprovechables en el tratamiento de aguas, especialmente en la remoción de contaminantes persistentes como los metales pesados. La combinación de estas propiedades con las posibilidades de diseño estructural que ofrece la fabricación aditiva permite plantear nuevas configuraciones de filtros biofuncionalizados con geometrías a medida del entorno de actuación, cuyo estudio y evaluación se inscriben en el marco del presente trabajo.

A continuación, se revisa el marco normativo que regula la calidad del agua y los límites de vertido, con el fin de contextualizar los requisitos técnicos y ambientales que deben cumplir las tecnologías de tratamiento.

3.5 Fabricación aditiva como tecnología habilitadora en el diseño de materiales funcionales

El diseño de sistemas de filtración eficaces no depende exclusivamente del material adsorbente empleado, sino también de la configuración geométrica y estructural del dispositivo, ya que esta influye directamente en la superficie de contacto entre el agua y el material y en la forma en que el fluido atraviesa el filtro. De acuerdo con esto, la fabricación aditiva se presenta como una tecnología que permite un elevado grado de control sobre la arquitectura superficial del material, facilitando la integración de función estructural y funcional en un único elemento.

3.5.1 Evolución y fundamentos de la fabricación aditiva

La fabricación aditiva (*Additive Manufacturing*, AM) se define como el conjunto de tecnologías que permiten la construcción de objetos tridimensionales mediante la adición controlada de material capa a

capa a partir de un modelo digital (Figura 3-11). A diferencia de los procesos sustractivos convencionales, como el corte, el taladrado o el fresado, la AM posibilita la generación de geometrías tridimensionales complejas con elevada libertad de diseño y una reducción relativa del desperdicio de material.

En el contexto industrial contemporáneo, la fabricación aditiva ha dejado de limitarse al prototipado rápido para transformarse en una tecnología estratégica en la producción de componentes funcionales. Su papel en la transición hacia sistemas de producción inteligentes y personalizados ha sido ampliamente descrito en revisiones recientes, donde se subraya su capacidad para fabricar objetos con geometrías avanzadas, materiales innovadores y atributos funcionales específicos. Análogamente, el desarrollo de nuevos materiales y procesos ha ampliado su rango de aplicaciones, incluyendo sectores como la aeronáutica, la biomedicina y la ingeniería avanzada [21], [22].

En este contexto, la fabricación aditiva presenta un elevado potencial para su aplicación en el desarrollo de filtros biofuncionales, debido a su flexibilidad, su capacidad para trabajar con distintos materiales y, especialmente, su posibilidad de controlar la geometría superficial de las piezas.

ESQUEMA	EXTRUSIÓN DE MATERIAL	FOTOPOLIMERIZACIÓN EN CUBA	INYECCIÓN DE MATERIAL	INYECCIÓN DE AGLUTINANTE	FUSIÓN EN CAMA DE POLVO	DEPOSICIÓN DIRECTA DE ENERGÍA	LAMINACIÓN POR CAPAS
PROCESO	Deposición capa a capa de material fundido	Curado selectivo de material fotopolimerizable en un recipiente líquido	Deposición de material y curado posterior	Dispensación selectiva de aglutinante para unir el polvo en un lecho	Fusión de polvo en un lecho mediante la fusión selectiva de la región deseada	Fusión directa de la materia	Unión de láminas individuales de material
NOMBRES	FDM RC MJS SFF	SLA DLP LAMP 2PP	DOD MJ NPJ	BJ	SLS SLM DMLS EBM MJF	LENS EBAM DMT	LOM UC

Figura 3-11 Clasificación de los procesos de fabricación aditiva en el panorama actual (Elaboración propia)

3.5.2 Clasificación de tecnologías de fabricación aditiva

Las tecnologías de fabricación aditiva pueden clasificarse en distintos grupos en función del principio físico de consolidación del material durante el proceso. Entre estas categorías se incluyen la extrusión de material (*Material Extrusion*), la fusión en cama de polvo (*Powder Bed Fusion*), la inyección de aglutinante (*Binder Jetting*), la deposición de energía dirigida (*Directed Energy Deposition*) y la fotopolimerización en cuba (*Vat Photopolymerization*) (Figura 3-11) [23], [21]. Tecnologías como la fusión en cama de polvo y la deposición de energía dirigida —incluyendo variantes como SLM, LMD o LENS— se emplean principalmente con materiales metálicos y cerámicos, debido a las elevadas temperaturas necesarias para su fusión.

Entre ellas, la fotopolimerización en cuba incluye procesos como la estereolitografía (SLA) y el procesamiento digital de luz (DLP), en los cuales un material líquido fotopolimerizable es curado selectivamente mediante radiación lumínica. Estos procesos permiten obtener piezas con elevada resolución geométrica y acabado superficial superior respecto a otras tecnologías basadas en extrusión.

Aunque las tecnologías de fabricación aditiva abarcan un amplio rango de materiales, incluyendo metales y materiales avanzados, en el presente trabajo el interés se centra en la fotopolimerización de resinas poliméricas, dada su idoneidad para la fabricación de estructuras porosas de precisión.

3.5.3 Fotopolimerización de resinas: fundamentos y características

La fotopolimerización se basa en la reacción química de monómeros o prepolímeros sensibles a la luz, generalmente de naturaleza acrílica o epoxi-acrílica, que polimerizan tras la activación de un fotoiniciador. Este mecanismo permite la solidificación selectiva del material en función del patrón de exposición lumínica [24].

Las revisiones sobre materiales y procesos en fabricación aditiva destacan que la formulación del material tiene una influencia directa en las propiedades finales de la pieza, incluyendo resistencia mecánica, estabilidad dimensional y comportamiento superficial [24], [23]. La incorporación de diferentes proporciones de componentes poliméricos o aditivos modifica las características finales del material impreso.

Este aspecto adquiere especial relevancia cuando se pretende incorporar cargas sólidas o componentes funcionales en la matriz polimérica, ya que la presencia de partículas puede alterar la viscosidad, la penetración de la luz y el grado de curado del sistema [21].

3.5.4 Diseño para fabricación aditiva (DfAM) y control geométrico

Uno de los principales aportes de la fabricación aditiva frente a métodos tradicionales es la posibilidad de aplicar principios de *Design for Additive Manufacturing* (DfAM), orientados a explotar las ventajas geométricas del proceso [22], [23].

En este marco, la optimización topológica, el diseño de estructuras reticulares y el control de porosidad permiten adaptar la geometría interna de la pieza a requisitos funcionales específicos. Las revisiones sobre diseño en AM destacan la importancia de considerar simultáneamente parámetros geométricos, funcionales y de proceso para maximizar el rendimiento del componente fabricado [22], [23].

En aplicaciones relacionadas con el tratamiento de fluidos, el control de la porosidad y de la trayectoria interna del flujo puede resultar determinante para aumentar la superficie de contacto entre el fluido y el material activo. Este principio es especialmente relevante en el diseño de filtros funcionales.

3.5.5 Materiales compuestos impresos y funcionalización

La fabricación aditiva no se limita a la producción de estructuras homogéneas, sino que permite la obtención de materiales compuestos mediante la incorporación de cargas o fases funcionales en la matriz base. En el contexto de la evolución de la AM, se ha señalado el creciente interés por el desarrollo de materiales con funcionalidades específicas, incluyendo materiales inteligentes y multifuncionales [24], [23]. La integración de un componente activo en una matriz estructural posibilita la fabricación de piezas en las que la función no depende exclusivamente de la geometría, sino también de la naturaleza química del material. Sin embargo, este enfoque plantea desafíos asociados a la homogeneidad de la dispersión, la estabilidad mecánica y la compatibilidad entre fases.

En el caso particular de filtros para tratamiento de agua, la incorporación de un material adsorbente directamente en la matriz polimérica permitiría integrar soporte estructural y función química en un único elemento, evitando la necesidad de lechos granulares o cartuchos intercambiables.

3.5.6 Aplicación potencial en sistemas de filtración

La aplicación de fabricación aditiva en sistemas de tratamiento de agua ha comenzado a explorarse con materiales impresos para aplicaciones ambientales [24]. Las ventajas potenciales incluyen:

- Personalización geométrica.
- Optimización del flujo.
- Reducción de ensamblajes.
- Integración de funciones en una sola pieza.

El desarrollo de filtros biofuncionalizados mediante impresión 3D en resina representa una aproximación que combina la libertad geométrica de la AM con la funcionalidad química de un material adsorbente incorporado.

En este escenario, la fabricación aditiva mediante fotopolimerización no actúa únicamente como técnica de conformado, sino como tecnología habilitadora para la integración estructural de biomasa microalgal en una matriz polimérica estable, configurando un sistema compuesto cuya evaluación experimental constituye el núcleo del presente trabajo.

3.6 Marco normativo del agua y su tratamiento

La protección de los recursos hídricos no responde únicamente a criterios técnicos o ambientales, sino que se encuentra regulada por un conjunto de disposiciones normativas de carácter internacional, europeo y nacional que establecen estándares de calidad y límites de vertido. Estos marcos regulatorios constituyen una referencia fundamental para el diseño y evaluación de tecnologías de tratamiento, ya que definen los niveles máximos admisibles de contaminantes en función del uso previsto del agua.

3.6.1 Recomendaciones internacionales

A nivel internacional, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece directrices para la calidad del agua destinada al consumo humano. Los estándares establecidos por la OMS [1] proporcionan valores guía para numerosos parámetros físicos, químicos y microbiológicos, incluyendo metales pesados como plomo, cadmio, arsénico y mercurio. Estas recomendaciones se basan en criterios toxicológicos y epidemiológicos, y consideran tanto efectos agudos como crónicos derivados de la exposición prolongada a contaminantes.

Los valores guía definidos por la OMS no constituyen, en sentido estricto, normas obligatorias, pero sirven de referencia para la elaboración de legislaciones nacionales y regionales. En el caso de los metales pesados, los límites establecidos reflejan la necesidad de minimizar riesgos asociados a su bioacumulación y toxicidad sistémica.

3.6.2 Marco normativo europeo

En el ámbito europeo, la política de aguas se articula en torno a la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE) [25], cuyo objetivo principal es alcanzar y mantener el buen estado ecológico y químico de las masas de agua. Esta directiva establece un enfoque integrado basado en la gestión por cuencas hidrográficas y contempla tanto la protección frente a la contaminación como la prevención del deterioro adicional.

Complementariamente, la Directiva relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano fija límites obligatorios para diversos contaminantes, armonizando los estándares en los Estados

miembros. Estos límites incluyen concentraciones máximas para nitratos, metales pesados y otros compuestos potencialmente nocivos.

En el caso de sustancias prioritarias y contaminantes específicos, la normativa europea establece normas de calidad ambiental (NCA) orientadas a proteger los ecosistemas acuáticos [26]. Estas normas consideran no solo la salud humana, sino también la integridad ecológica de los sistemas hídricos.

3.6.3 Legislación nacional y criterios de vertido

El marco normativo vigente impone requisitos cada vez más exigentes en términos de reducción de contaminantes y protección de los ecosistemas acuáticos. La tendencia hacia estándares más restrictivos responde tanto a avances en el conocimiento científico como a la creciente conciencia ambiental.

Para las tecnologías de tratamiento, ello implica la necesidad de:

- Alcanzar eficiencias elevadas de eliminación.
- Mantener estabilidad operativa en condiciones variables.
- Minimizar la generación de residuos secundarios.
- Garantizar la seguridad del material utilizado.

En particular, la eliminación de metales pesados y contaminantes persistentes adquiere relevancia no solo desde el punto de vista técnico, sino también regulatorio. El cumplimiento de los valores límite establecidos constituye un criterio objetivo para evaluar la viabilidad y eficacia de nuevas configuraciones de filtración.

En resumen, el marco normativo internacional, europeo y nacional configura un entorno en el que la mejora continua de las tecnologías de tratamiento de agua resulta indispensable. La creciente exigencia en los estándares de calidad y vertido refuerza la necesidad de desarrollar soluciones innovadoras, sostenibles y adaptables a distintos tipos de contaminantes. Dentro de este contexto, la integración de biomasa microalgal en estructuras filtrantes fabricadas mediante técnicas de fabricación aditiva se plantea como una propuesta orientada a explorar nuevas vías de tratamiento, con potencial aplicación en escenarios donde la reducción de contaminantes persistentes, como los metales pesados, constituye una prioridad ambiental y regulatoria.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se presentan los materiales utilizados y la metodología experimental seguida para la fabricación y caracterización de los filtros biofuncionalizados. Se especifican los parámetros de impresión, la preparación de las mezclas resina-biomasa y las condiciones de ensayo, con el objetivo de asegurar la trazabilidad y reproducibilidad del proceso.

4.1 Materiales

Se describen a continuación los materiales empleados en la fabricación de los filtros biofuncionalizados, incluyendo la resina fotopolimerizable utilizada como mezcla y la biomasa microalgal incorporada, tanto de origen comercial como procedente de cultivo.

4.1.1 Tipo de polímero empleado

Se empleará la resina *Anycubic Standard Clear Resin+* (Figura 4-4), una resina acrílica fotopolimerizable diseñada para procesos de impresión MSLA/SLA. Las características de esta resina, según el fabricante, se muestran en la Tabla 4-1.

Parámetro	Valor
Precisión	$\pm 0,1$ mm
Viscosidad	150-200 $cp/mPa \cdot s$
Extensibilidad	18,2%
Módulo de flexión	1599,33 MPa
Longitud de onda UV	365-405 nm
Densidad	1,05-1,25 g/cm^3
Dureza	84D
Precio	37€

Tabla 4-1 Propiedades de *Resina Estándar+ Clear*, según fabricante [27]

Valorando las características de la resina Anycubic Standard Clear Resin+, presentadas en la Tabla 4-1, se eligió la versión transparente (Clear) (Figura 4-4) porque facilita la observación microscópica del material compuesto. Al no contener pigmentos, permite visualizar con mayor claridad la distribución de la biomasa en la matriz polimérica, lo que ayuda a evaluar la homogeneidad de la mezcla alga-resina y a identificar posibles aglomeraciones o defectos internos.

4.1.2 Biomasa microalgal

En el siguiente apartado se especifica la biomasa empleada en la elaboración de los filtros. Se utilizarán microalgas de origen comercial y microalgas cultivadas, con el fin de realizar posteriormente un estudio comparativo sobre las diferencias que presenta cada una en relación con las propiedades y el funcionamiento del filtro. En el presente trabajo se emplean dos tipos de biomasa microalgal, con el fin de comparar su comportamiento en la formulación de los filtros:

- Microalgas comerciales.
- Microalgas cultivadas en el laboratorio del Centro Universitario de la Defensa de la Escuela Naval Militar.

Microalgas comerciales.

Se selecciona *Spirulina (Arthrospira)* como fuente de biomasa debido a su elevada concentración proteica (60–70 % del peso seco) y a su composición rica en aminoácidos esenciales, lo que la convierte en una de las microalgas con mayor valor biológico documentado [28]. Asimismo, su composición incluye carbohidratos ($\approx 15\text{--}25\%$), ácidos grasos esenciales y una fracción significativa de pigmentos como ficocianina y clorofila [29], compuestos que aportan grupos funcionales potencialmente activos en procesos de interacción con contaminantes.

En comparación con otras microalgas empleadas como suplemento, *Spirulina* presenta un menor contenido en ácidos nucleicos (aproximadamente 4–6 % del peso seco), lo que facilita su manejo y procesamiento como biomasa [28]. Además, su pared celular es relativamente más sencilla y carece de celulosa estructural compleja, lo que favorece su digestibilidad y, desde un enfoque tecnológico, su dispersión en matrices poliméricas [29].

Por otra parte, *Spirulina* (Figura 4-1) es una de las microalgas con mayor implantación comercial a nivel internacional, con producción industrial consolidada y disponibilidad estandarizada [29]. Esta condición garantiza reproducibilidad en la composición del material y estabilidad en el suministro, aspectos clave en un estudio experimental.

Finalmente, diversos trabajos la consideran una de las cepas más prometedoras entre las microalgas utilizadas como complemento, tanto por su perfil nutricional como por su seguridad y ausencia de toxicidad reportada [28].

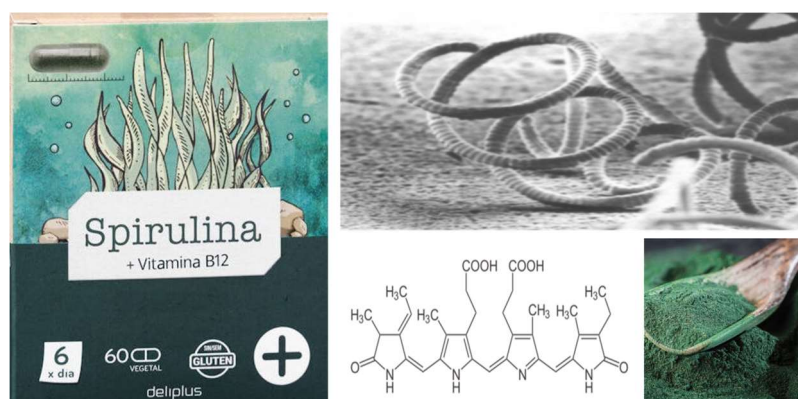


Figura 4-1 Representación comercial, microscópica y molecular de la biomasa de *Spirulina* (Elaboración propia)

Microalgas cultivadas en el laboratorio del CUD-ENM.

También se obtuvo biomasa mediante cultivo en agua marina natural bajo condiciones de laboratorio (detallado en el apartado 4.2.6), con el objetivo de comparar su eficacia frente a la biomasa comercial.

4.2 Métodos

En el apartado Métodos se encuentran, de forma concisa, todos los procedimientos, técnicas y métodos explicados, que se han empleado para la elaboración del trabajo y justificación de este. La secuencia de etapas experimentales llevadas a cabo en este estudio puede visualizarse en la Figura 4-2. Este diagrama de flujo sintetiza las ramas paralelas de trabajo —impresión con biomasa comercial y procesamiento de biomasa cultivada—, así como las pruebas analíticas posteriores que permiten comparar rendimiento y comportamiento de los filtros en distintos ensayos.



Figura 4-2 Diagrama de flujo del diseño experimental general

Por tanto, de acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 4-2, el apartado de Métodos se estructura en tres líneas de acción principales: la impresión de filtros mediante biomasa comercial de espirulina, la preparación y tratamiento de un cultivo microalgal para la realización de ensayos de adhesión, y la obtención de biomasa cultivada destinada a su posterior incorporación en el proceso de impresión. El objetivo de cada una de ellas es alcanzar, mediante métodos distintos, la unión del alga a la pieza, para, posteriormente, comparar las propiedades de cada filtro y determinar el más eficaz.

4.2.1 Diseño del filtro

Para el diseño del filtro se partió de una geometría en base a la experiencia previa de los investigadores del CUD, con dimensiones de 30 mm en cada eje (Figura 4-3-a). Dicha geometría fue posteriormente modificada mediante el software *Autodesk Inventor*®, para obtener un modelo final reduciendo su tamaño en cada eje, hasta 10 mm en cada una de sus dimensiones (Figura 4-3-b). De este modo, la geometría resultante es un andamiaje cúbico de 1mm × 1mm × 1mm.

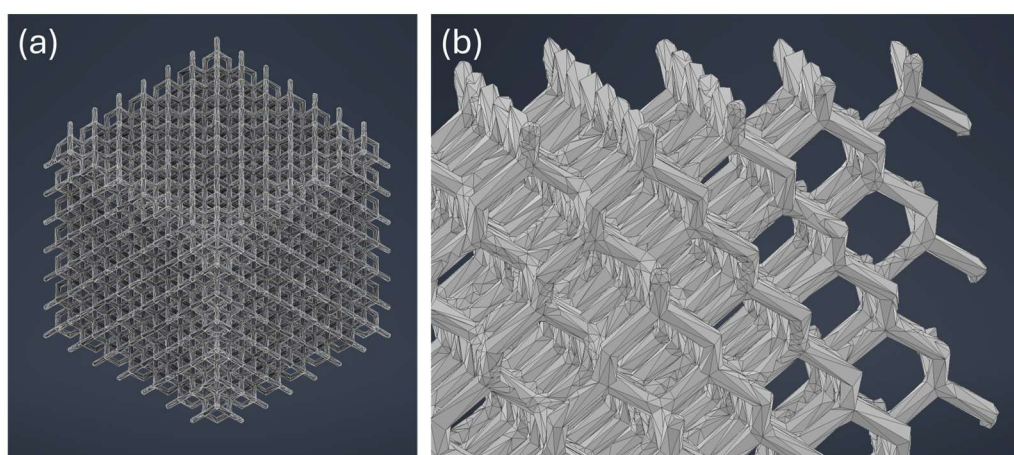


Figura 4-3 Geometría del filtro empleada en el estudio: (a) vista general del modelo tridimensional, (b) detalle de la estructura reticular tras su modificación en Autodesk Inventor®.

Esta reducción de tamaño se llevó a cabo por varias razones. En primer lugar, permitió aumentar el número de piezas obtenidas en cada proceso de impresión, pasando de 6 a 16 unidades por lote, lo que incrementó la eficiencia experimental. En segundo lugar, el menor tamaño de las piezas redujo el volumen de disolución de contaminantes necesario en los ensayos, ya que estas quedaban completamente sumergidas con una menor cantidad de reactivo. Por último, la disminución del tamaño contribuyó a reducir la probabilidad de fallo durante la impresión, especialmente para elevados porcentajes de biomasa, acortando además los tiempos de fabricación y mejorando la reproducibilidad de las piezas obtenidas.

4.2.2 Técnica de impresión utilizada

Para la fabricación de los soportes de base polimérica de los filtros se ha utilizado la tecnología de fotopolimerización en cuba (*vat photopolymerization*) por su elevada precisión dimensional, alta resolución superficial y capacidad para reproducir geometrías complejas con control del espesor de capa, aspectos relevantes en el diseño de filtros donde la geometría interna influye en la interacción con el contaminante.

Frente a tecnologías basadas en extrusión térmica, como FDM, la fotopolimerización permite trabajar con el material en estado líquido, facilitando la mezcla directa de biomasa (en forma de partículas) en la resina sin necesidad de fabricar previamente un filamento compuesto ni someter el material a altas temperaturas que puedan degradar componentes biológicos. Cabe destacar que la

ausencia de conductos estrechos reduce el riesgo de obstrucciones cuando se emplean mezclas con partículas en suspensión.

Además, este sistema simplifica las operaciones de limpieza y sustitución de material entre ensayos, lo que resulta especialmente relevante en un estudio experimental con distintas proporciones de biomasa, al minimizar el riesgo de contaminación cruzada.

4.2.3 Elección de impresora 3D

Dentro de las impresoras basadas en fotopolimerización en cuba, se selecciona el modelo *Elegoo Mars 3 Pro* (Figura 4-4) por tratarse de un equipo de tecnología MSLA (*Masked Stereolithography*) que combina una fuente de luz UV de longitud de onda compatible con resinas comerciales estándar ($\lambda \approx 405$ nm [30]) y una pantalla monocroma de alta resolución, lo que permite alcanzar un buen compromiso entre precisión, repetibilidad y coste.

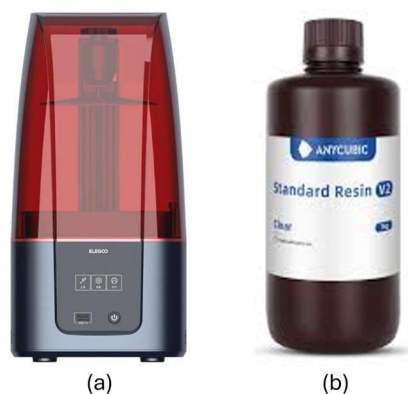


Figura 4-4 Sistema de impresión empleado: (a) impresora de fotopolimerización *Elegoo Mars 3 Pro* [30] y (b) resina fotopolimerizable utilizada [27]

La elección de este equipo responde a los requisitos establecidos para la fabricación de las piezas. En particular, destaca su elevada resolución XY (18 μ m), adecuada para la obtención de filtros de pequeño formato con detalle geométrico. Asimismo, el sistema de fotopolimerización mediante fuente de luz UV tipo COB garantiza un curado homogéneo, aspecto especialmente relevante dado el contenido de partículas en suspensión en la mezcla. Por último, la facilidad de uso y la estabilidad del proceso favorecen la reproducibilidad experimental, condición necesaria para la evaluación de las formulaciones alga-resina.

De este modo, el modelo seleccionado ofrece las prestaciones necesarias para el desarrollo del estudio.

4.2.4 Parámetros de la impresión

Los parámetros de impresión empleados fueron definidos mediante el software *Chitubox*® (Figura 4-5), utilizado para la preparación de los modelos en impresoras de resina. Los principales ajustes utilizados fueron los siguientes:

- Tiempo de exposición: 2,5 s.
- Tiempo de exposición de capas iniciales: 30 s.
- Altura de capa: 0,050 mm (50 μ m).

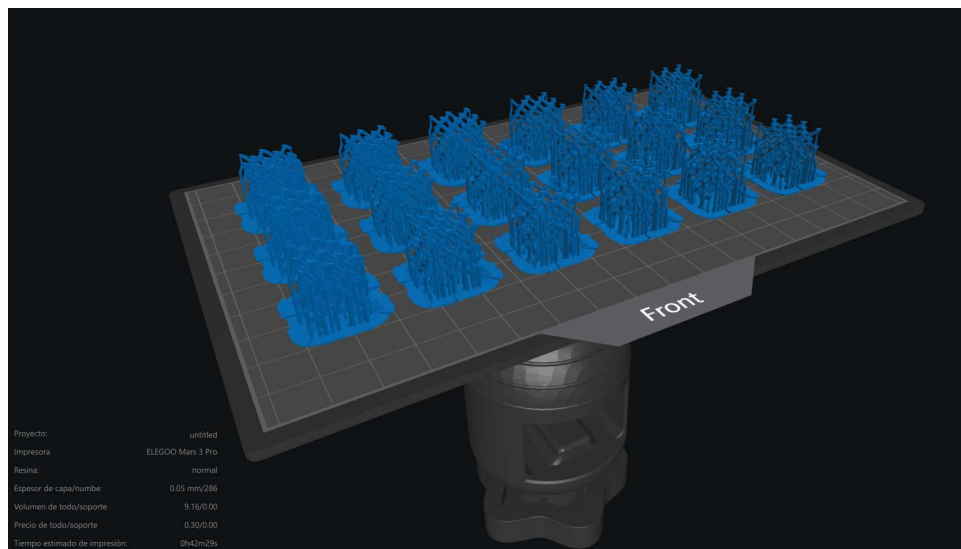


Figura 4-5 Preparación de las piezas en el software *Chitubox*, mostrando la disposición y generación de soportes para la impresión

Igualmente, el software permitió estimar el consumo de resina y el tiempo de fabricación de cada lote de piezas, obteniéndose valores aproximados de:

- Consumo de resina: 8,83 mL
- Tiempo de impresión: 45 minutos

Estos parámetros representan un compromiso entre resolución, estabilidad estructural y eficiencia del proceso de fabricación.

4.2.5 Procedimiento de impresión

El procedimiento seguido para la preparación de la mezcla y la impresión de las piezas fue el siguiente. En primer lugar, se llevó a cabo el pesado de la biomasa, determinando la cantidad de microalga comercial necesaria para alcanzar el porcentaje deseado en la mezcla resina-biomasa. A continuación, se procedió a la dosificación de la resina, añadiendo esta hasta completar un total aproximado de 70 g de mezcla (resina + biomasa).

Posteriormente, la mezcla se agitó durante 10 minutos utilizando un agitador magnético, hasta lograr un resultado homogéneo. Una vez preparada, la mezcla de resina y biomasa se vertió en la cuba de la impresora 3D para su procesamiento. El proceso de fabricación seguido se resume en la Figura 4-6.

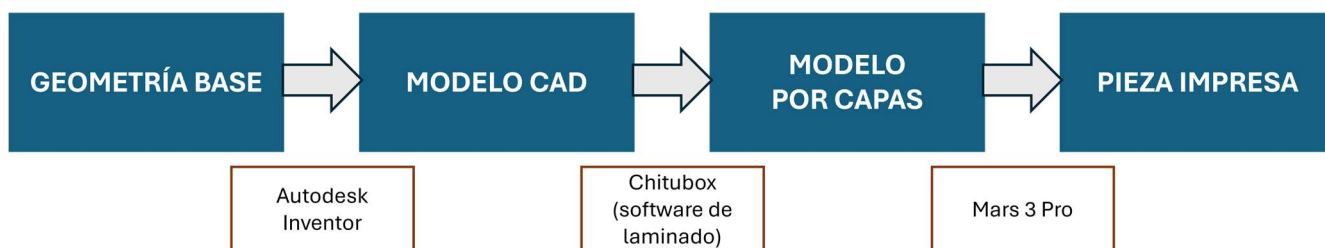


Figura 4-6 Esquema del proceso de fabricación de las piezas mediante impresión 3D

La impresión se ejecutó con los parámetros configurados para la resina base, manteniendo constantes el tiempo de exposición y la velocidad de construcción; el tiempo típico de impresión por lote fue de aproximadamente 45 minutos. Finalizada la impresión, las estructuras impresas se retiraron de la placa metálica de construcción empleando una espátula (Figura 4-7). Se realizaron ensayos de impresión con mezclas resina-biomasa que abarcaban contenidos de alga entre el 0 % y el 20 % en peso, con el objetivo de analizar la influencia del porcentaje de biomasa en el comportamiento del material y en la calidad de las piezas obtenidas.

Por último, se realizó el posprocesamiento de las piezas, comenzando con un lavado inicial en alcohol isopropílico al 99 % para eliminar la resina no polimerizada adherida a la superficie. Tras este paso, se eliminó el material excedente correspondiente a los soportes generados durante la impresión.



Figura 4-7 Piezas impresas adheridas a la placa de construcción tras el proceso de impresión.

4.2.6 Preparación y tratamiento del cultivo de biomasa microalgal

En este trabajo, el cultivo de microalgas se llevó a cabo mediante un sistema de tipo fotobiorreactor a pequeña escala (Figura 4-8), empleando agua marina natural como medio de cultivo. Este tipo de sistema permite un mayor control de las condiciones de crecimiento, favoreciendo la reproducibilidad del proceso y la obtención de biomasa homogénea, adecuada para su posterior incorporación al material compuesto de resina empleado en la impresión 3D.

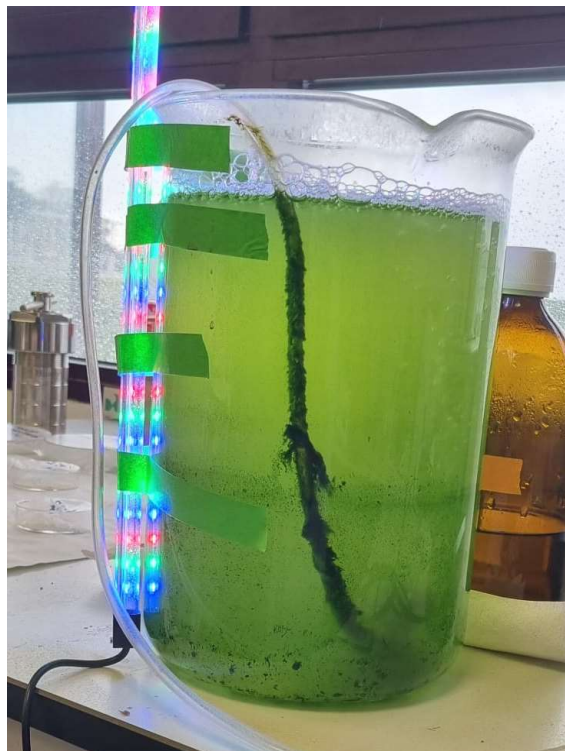


Figura 4-8 Cultivo de microalgas en la tercera semana

La metodología seguida para el cultivo y crecimiento de las microalgas de laboratorio fue la siguiente:

I. Preparación del medio de cultivo:

Se tomaron aproximadamente 3 L de agua de la dársena de la Escuela Naval Militar y se transfirieron a un recipiente de cultivo con la capacidad suficiente. El agua natural proporciona sales minerales y elementos traza necesarios para el crecimiento algal en cultivo, como se describe en metodologías de cultivo de microalgas que emplean medios basados en agua natural o formulaciones sintéticas.

II. Oxigenación del medio:

Para asegurar una oxigenación constante y evitar la sedimentación de las células, se instaló un sistema de aireación continua mediante un difusor situado en el fondo del recipiente. La aireación favorece el intercambio oxígeno-dióxido de carbono entre el medio y la atmósfera y mantiene las células en suspensión.

III. Iluminación artificial:

Se incorporó una fuente de luz LED programada para funcionar durante 16 h al día. El aporte de luz artificial complementa la radiación solar disponible y permite mantener actividad fotosintética incluso cuando las condiciones de iluminación natural son variables, lo que es acorde con las recomendaciones generales para cultivos experimentales de microalgas en sistemas de laboratorio.

IV. Alimentación del cultivo:

Cada tres días se añadió una solución nutritiva líquida de aproximadamente 5 mL con la finalidad de aportar nutrientes necesarios para el crecimiento algal.

V. Mantenimiento del volumen:

Se repuso periódicamente el volumen de agua evaporada, manteniendo aproximadamente constante el volumen del medio de cultivo y evitando variaciones significativas en la concentración de nutrientes y en la densidad celular durante el periodo de crecimiento. Tras varias semanas de cultivo, se alcanzó una densidad celular adecuada para su aprovechamiento. En este punto, se procedió a la cosecha y acondicionamiento de la biomasa.

VI. Separación de la biomasa:

La biomasa microalgal se separó del medio mediante un proceso combinado de filtración y centrifugación, con el objetivo de concentrar las células y eliminar la mayor parte del agua. El material obtenido se recogió en un recipiente adecuado.

VII. Secado:

La biomasa concentrada se sometió a un proceso de secado a 105 °C durante 24 horas, con el fin de eliminar el agua residual y obtener un material sólido estable.

VIII. Molienda:

Finalmente, el material seco se molió a mano con un mortero hasta obtener un polvo fino y homogéneo, adecuado para su posterior mezcla con la resina. Este tratamiento permite mejorar la dispersión del material en la matriz polimérica y facilita su procesado en la impresora 3D.

4.2.7 Ensayo de adhesión

Con el objetivo de evaluar la capacidad de adhesión de la biomasa microalgal sobre la superficie de los materiales impresos, se introdujeron varias piezas en el cultivo de microalgas descrito en el apartado anterior. Se emplearon distintos tipos de filtros con el fin de comparar su comportamiento frente a la formación de una capa superficial de biomasa (Figura 4-9).

Las piezas se mantuvieron sumergidas en el cultivo durante intervalos de tiempo definidos, permitiendo analizar la evolución del proceso de adhesión sobre la superficie del material. Tras su extracción, las piezas se sometieron a un lavado para eliminar el exceso de medio y biomasa no adherida.

Finalmente, las muestras obtenidas se emplearon en los ensayos de adsorción de contaminantes descritos en los apartados siguientes, con el fin de evaluar la influencia de la capa de microalgas adherida en el comportamiento del material.



Figura 4-9 Montaje utilizado para el ensayo de adhesión de microalgas

4.2.8 Caracterización de las muestras obtenidas por fabricación aditiva

Con el propósito de caracterizar las piezas impresas y justificar experimentalmente la selección de la mezcla óptima para su funcionamiento como filtro, se diseñaron y desarrollaron una serie de pruebas, físico-mecánicas y de interacción con el entorno, complementarias. Dichas pruebas permiten evaluar parámetros relevantes de las estructuras, tales como resistencia estructural, dureza superficial, respuesta frente a fisura y capacidad de adsorción de CO_2 .

Las siguientes pruebas fueron consideradas:

Caracterización morfológica superficial.

Para evaluar la homogeneidad de la mezcla y la presencia de posibles fisuras internas, se empleó microscopía digital. Las muestras se observaron a ampliaciones adecuadas para identificar discontinuidades, zonas no adheridas o defectos relevantes en el material compuesto. Las condiciones de observación, ampliación y sistema de microscopio se documentaron para asegurar la reproducibilidad.

Para este propósito se empleó el microscopio digital fabricado por Dino-Lite, modelo Edge (Figura 4-10), con capacidad de aumento ajustable de hasta aproximadamente 700–900x y una resolución de 1,3 megapíxeles (1280×1024), lo que permite la observación detallada de la estructura superficial de las piezas.



Figura 4-10 Microscopio digital Dino-Lite Edge

Caracterización de las propiedades mecánicas de las muestras.

Las muestras fueron caracterizadas mecánicamente realizando ensayos sistemáticos de dureza. En este trabajo se empleó la escala de dureza Shore A, que es la escala más común para materiales poliméricos, y mide la resistencia a la indentación de la superficie mediante un durómetro. El durómetro empleado es de PCE Instruments y tiene una precisión de ± 1 unidad Shore A (Figura 4-11).

La dureza Shore A es una magnitud adimensional empleada para caracterizar materiales poliméricos y elastoméricos, con valores comprendidos entre 0 (material muy blando) y 100 (material rígido dentro de esta escala). En general, los polímeros flexibles presentan valores en el rango de 70–90 Shore A, lo que permite contextualizar los resultados obtenidos en este trabajo y tomar como referencia la muestra sin biomasa [31].

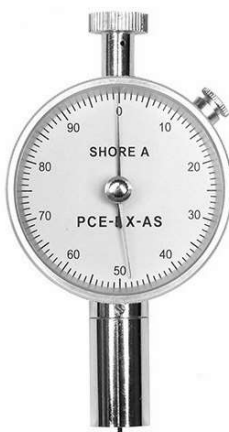


Figura 4-11 Durómetro Shore A empleado en la medición de la dureza (modelo PCE-DX-AS)

Para cada pieza se realizaron tres mediciones sobre la pieza siguiendo el mismo procedimiento: el durómetro se presionó contra la superficie del material, se aplicó la fuerza indicada por el instrumento y se registró la lectura. Se tomaron tres mediciones por pieza para obtener un valor representativo de dureza promedio por cada porcentaje de microalga en la mezcla.

Ensayo de adsorción de CO_2 .

La capacidad de adsorción de dióxido de carbono se evaluó mediante un ensayo en cámara cerrada. Para ello, las piezas impresas se colocaron junto con un medidor de CO_2 (Figura 4-12) en un recipiente cerrado durante un tiempo fijo de exposición (90 min). El protocolo consistió en comparar las lecturas obtenidas de concentración de CO_2 en ausencia de piezas (control), con piezas impresas sin microalga (0 %) y con piezas impresas con la proporción seleccionada de microalga (12 %). Este procedimiento permite estimar diferencias en la evolución de la concentración de CO_2 en función de la presencia y composición de las piezas (Figura 4-12).



Figura 4-12 Ensayo de adsorción de CO_2 en cámara cerrada con medidor M2000C y filtros 0 % de alga

El medidor de CO_2 empleado fue el M2000C de Temtop mostrado en la Figura 4-12, capaz de medir la concentración del gas en partes por millón (ppm), y se calibró para que realizara una medición cada minuto.

4.2.9 Metodología empleada para los ensayos de adsorción de contaminantes

Con el objetivo de evaluar la capacidad adsorbente del material compuesto de resina y microalga, se realizaron ensayos de adsorción empleando distintos contaminantes representativos presentes en aguas naturales y residuales.

Tipos de piezas evaluadas.

Se ensayaron cuatro tipos de materiales adsorbentes, en función de su composición y tratamiento previo:

- Prueba I: Piezas impresas con microalga comercial.
- Prueba II: Piezas sin contenido de alga en la impresión (0 %) sometidas a un proceso de adhesión de microalga a la capa superficial de la pieza, durante 24, 48 y 72 horas.
- Prueba III: Piezas con microalga comercial, sometidas a un proceso de adhesión en cultivo durante 7 días.
- Prueba IV: Piezas impresas con biomasa microalgal procedente de cultivo.

El conjunto de ensayos realizados se resume en la tabla mostrada en la Figura 4-13.

		PRUEBA I	PRUEBA II	PRUEBA III	PRUEBA IV
Método	Impresión	✓		✓	✓
	Adhesión		✓	✓	
Alga	Sin alga		✓		
	Comercial (espirulina)	✓		✓	
	Cultivada			0	✓
Variables	% mezcla	0.5%- 1%- 2%- 3%- 4%- 8%- 10% -12%	No procede	12%	2%- 4%- 8%
	Tiempo adhesión	No procede	24h- 48h- 72h	7 días	-
	Contaminantes empleados	Cobre - Fosfatos - Nitratos - Aluminio			

Figura 4-13 Tabla explicativa de la metodología empleada en la prueba de adsorción

Preparación de las muestras para los ensayos de adsorción.

Para cada contaminante, se preparó una disolución inicial con la concentración correspondiente. Posteriormente, la disolución se repartió en recipientes independientes, añadiendo 60 mL en cada uno de ellos. En cada recipiente se introdujeron las piezas adsorbentes correspondientes al ensayo, en función del tipo de material y porcentaje de biomasa considerado.

Una vez añadidas las piezas, las muestras se sometieron a agitación durante 30 minutos mediante un mezclador, con el fin de favorecer el contacto entre el contaminante en disolución y el material adsorbente. Finalizado este periodo, se procedió a la determinación de la concentración residual del contaminante.

Determinación analítica de los contaminantes.

La concentración de los contaminantes se determinó mediante un fotómetro multiparamétrico modelo HI83300 (Figura 4-14), siguiendo los métodos analíticos indicados por el fabricante para cada parámetro [32].



Figura 4-14 Fotómetro multiparamétrico HI83300 empleado para la determinación de contaminantes

Selección de los contaminantes estudiados.

Los contaminantes estudiados se seleccionaron con el objetivo de evaluar el comportamiento del material frente a distintas especies químicas presentes en aguas naturales y residuales, incluyendo tanto cationes metálicos como aniones inorgánicos. En particular, se analizaron los siguientes compuestos:

- Cobre (Cu^{2+}), representativo de metales pesados presentes en efluentes industriales [10].
- Fosfato (PO_4^{3-}), nutriente presente en los procesos de eutrofización de masas de agua [1].
- Nitrato (NO_3^-), uno de los principales nutrientes responsables de la contaminación difusa de origen agrícola [1], [7].
- Aluminio (Al^{3+}), un catión trivalente común en procesos de tratamiento de agua [1], [10].

La selección de estos contaminantes permitió evaluar la capacidad del material adsorbente frente a iones de distinta carga y naturaleza química.

Adsorción de cobre.

Para el ensayo de adsorción de cobre se preparó una disolución 0,5 M de sulfato de cobre (II) pentahidratado (Cu^{2+}). Esta concentración se seleccionó con el objetivo de asegurar una cantidad suficiente de contaminante en disolución que permitiera observar diferencias en la capacidad de adsorción del material. En cada uno de los recipientes se introdujeron cinco piezas adsorbentes, correspondientes a los distintos porcentajes de biomasa, y se añadieron 60 mL de disolución.

Adsorción de nitrato.

Para el ensayo de adsorción de nitrato se empleó una disolución preparada a partir de nitrato de potasio, con una concentración equivalente a 5 mg/L de nitrato (NO_3^-). Esta concentración se encuentra dentro del rango habitual utilizado en estudios de tratamiento de aguas y adsorción de nutrientes. En cada recipiente se introdujeron tres piezas adsorbentes, añadiendo 60 mL de disolución en cada muestra.

Adsorción de fosfato.

El ensayo de adsorción de fosfato se realizó empleando una disolución de 5 mg/L de fosfato (PO_4^{3-}), preparada a partir de una disolución madre previamente obtenida en laboratorio. Esta concentración se seleccionó por ser representativa de niveles elevados de fósforo en aguas susceptibles de sufrir procesos de eutrofización. En cada recipiente se introdujeron tres piezas adsorbentes, añadiendo 60 mL de disolución en cada muestra.

Adsorción de aluminio.

Para el estudio de la adsorción de aluminio se preparó una disolución a partir de nitrato de aluminio nonahidratado ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$), con una concentración de Al^{3+} en disolución de 10 mg/L. Esta concentración, superior a los valores habituales en agua potable, se seleccionó con el fin de facilitar la detección experimental mediante el equipo empleado. En cada recipiente se introdujeron tres piezas adsorbentes, añadiendo 60 mL de disolución en cada muestra.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados sobre las piezas fabricadas. En primer lugar, se recogen los resultados de las pruebas preliminares, orientadas a la validación estructural y funcional del material. Posteriormente, se exponen los resultados de los ensayos de adsorción de contaminantes, que constituyen el objetivo principal del estudio.

5.1 Impresión aditiva de piezas alga-resina

Las piezas analizadas en este apartado han sido fabricadas mediante tecnología de fotopolimerización en cuba a partir de mezclas de resina con biomasa microalgal. Se han considerado dos tipos de biomasa —microalga comercial (*Spirulina*) y microalga procedente de cultivo— con el fin de evaluar su influencia en el comportamiento del material. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en función del contenido de biomasa incorporada.

Microalga comercial.

Durante el presente trabajo se llevaron a cabo múltiples ensayos de impresión con distintos porcentajes de biomasa microalgal incorporada en la resina, con el objetivo de determinar la proporción máxima de biomasa en la resina imprimible sin comprometer la integridad geométrica de las piezas. Las proporciones de microalga comercial en peso consideradas en la mezcla fueron sucesivamente: 0 %, 0,5 %, 1 %, 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 %, 12 % y 14 % (Figura 5-1); cada ensayo consistió en la impresión de un total de 16 piezas por cada porcentaje de mezcla (Tabla 5-1).

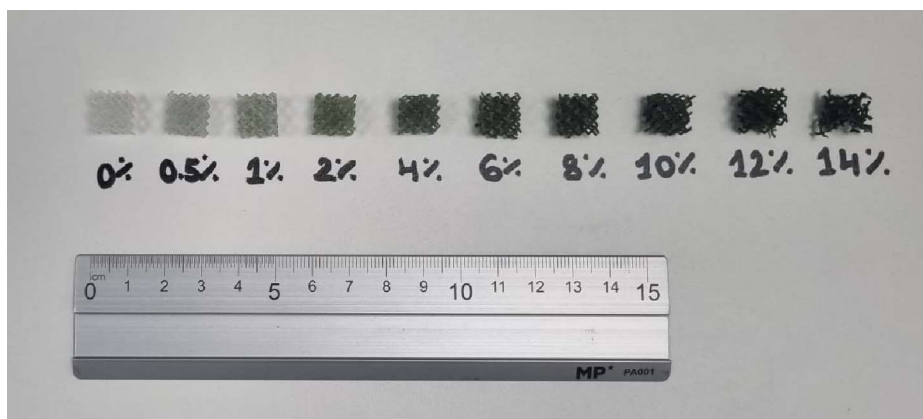


Figura 5-1 Comparación de piezas impresas según su porcentaje de biomasa comercial empleado

Porcentaje de alga comercial (%)	Número de piezas obtenidas	Observaciones de la impresión
0 (Referencia)	16	Impresión sin dificultad
0,5	16	Impresión estable
1,0	16	Buena calidad de piezas; sin fallos evidentes
2,0	16	Mantiene buena reproducibilidad
4,0	16	Se aprecia tendencia a estructuras menos rígidas
6,0	14	Inicio de ligera rugosidad superficial
8,0	14	Aumento de fragilidad y ligera deformación local
10,0	14	Piezas obtenidas, con signos de menor dureza y cohesión interna
12,0	12	Dificultad creciente en la cohesión de capas
14,0	5	Escasa productividad; estructuras deformadas
20,0	0	No imprimible

Tabla 5-1 Porcentajes de mezcla y observaciones de impresión con microalga comercial

Observando la Figura 5-1, se aprecia como, según aumenta el porcentaje de alga en la mezcla, las piezas van tomando un color cada vez más verde

Por otro lado, dado que el ensayo con 20 % de biomasa no produjo ninguna pieza válida, se acotó el estudio experimental al rango de valores dado: 10-20%. Con mezclas superiores al 12 % se observaron dificultades de impresión atribuibles a la presencia excesiva de partículas sólidas en suspensión, lo que dificulta el proceso de fotopolimerización y la cohesión de las capas durante la construcción de la pieza.

Microalga cultivada.

A parte de los ensayos realizados con microalga comercial, se llevaron a cabo nuevas pruebas de impresión empleando biomasa microalgal obtenida del cultivo descrito en el apartado 4.2.6, con el objetivo de evaluar su comportamiento en el proceso de fabricación aditiva.

En este caso, se seleccionaron concentraciones en peso del 2 %, 4 % y 8 % de microalga en la mezcla resina–alga. Para cada una de estas proporciones se imprimieron un total de 16 piezas, cuyos resultados se recogen en la Tabla 5-2.

El número de concentraciones ensayadas con biomasa microalgal procedente de cultivo (Figura 5-2) fue inferior al considerado en el caso de la microalga comercial, debido a la limitada cantidad de biomasa disponible. Esta restricción experimental, derivada de las propias limitaciones del sistema de cultivo empleado, condicionó la selección de únicamente tres proporciones en peso (2 %, 4 % y 8 %), consideradas representativas dentro del rango previamente estudiado.

Porcentaje de alga cultivada (%)	Número de piezas obtenidas	Observaciones de la impresión
2	15	Impresión estable
4	12	Inicio de ligera rugosidad superficial
8	10	Escasa productividad; estructuras deformadas

Tabla 5-2 Porcentajes de mezcla y observaciones de impresión con microalga cultivada



Figura 5-2 Muestra procesada de microalga cultivada

5.2 Resultados preliminares

El presente apartado recoge los resultados obtenidos en las pruebas preliminares realizadas sobre las piezas fabricadas, con el objeto de evaluar su comportamiento estructural y funcional. Estas pruebas permiten validar la idoneidad del material desarrollado antes de su aplicación en los ensayos de adsorción, proporcionando información sobre la calidad de impresión, la integridad del material y sus propiedades mecánicas básicas.

5.2.1 Morfología superficial de los andamiajes fabricados

La Figura 5-3 es una muestra las imágenes obtenidas mediante observación por microscopía digital de la estructura superficial de las piezas para distintos porcentajes de microalga, con el fin de estudiar y analizar la morfología superficial de los andamiajes fabricados según aumenta el porcentaje de microalga en la pieza.

Estas imágenes demuestran que, aunque se observa una fracción de la biomasa contenida en el interior de la pieza, la mayor parte de esta se encuentra en la capa superficial. Además, se aprecia que, para porcentajes más bajos, la biomasa se encuentra distribuida de forma menos homogénea, formando, en algunos casos, partículas aglomeradas, mientras que, para los porcentajes más altos (6 %, 8 %, 10% y 12 %) la biomasa se integra de forma más uniforme con la resina, siendo más visible en la superficie de la pieza.

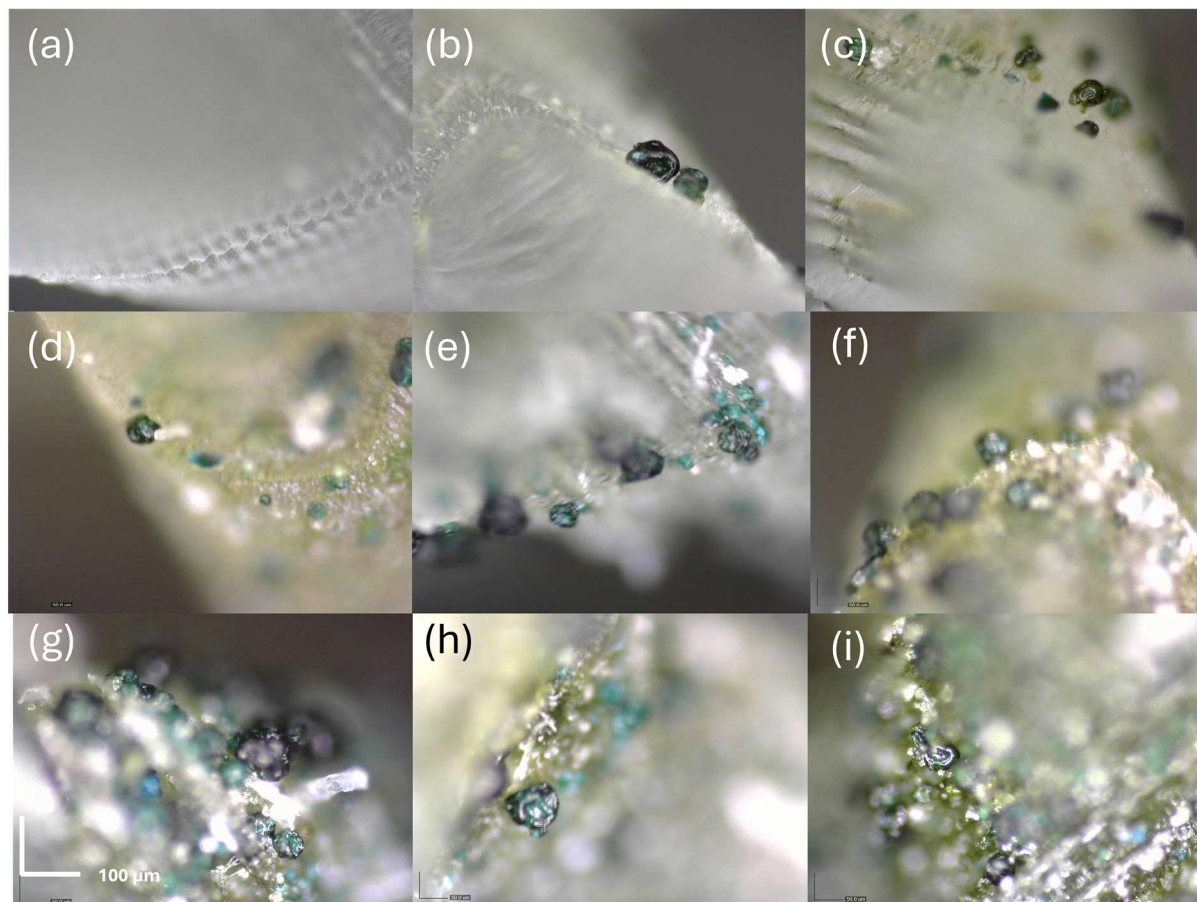


Figura 5-3 Imágenes obtenidas mediante microscopía digital de la estructura superficial de las piezas con distinto contenido de microalgas: (a) 0 %, (b) 0,5 %, (c) 1 % y (d) 2 %, (e) 4 %, (f) 6 %, (g) 8 %, (h) 10 %, (i) 12 %

En las muestras sin contenido de biomasa (0 %) se observa una estructura homogénea y continua, sin presencia de discontinuidades apreciables entre capas. Para bajos porcentajes de microalga (0,5 %), la distribución del alga en la matriz de resina se mantiene uniforme, sin alteraciones significativas de la integridad estructural. Se aprecia una ligera coloración verde en las muestras, con zonas aisladas donde se observa una acumulación de algas (Figura 5-3).

A medida que aumenta el contenido de biomasa (8 % y 12 %), se aprecia una mayor presencia de partículas de microalga dispersas en la matriz polimérica, manteniéndose en general una adecuada cohesión entre capas. No obstante, en los porcentajes más elevados se observa cierta heterogeneidad en la distribución del material, así como la aparición puntual de pequeñas irregularidades.

Análogamente, se observa que, a medida que aumenta el tono verdoso de las muestras, se incrementa la presencia de biomasa microalgal, lo que constituye un indicador visual de una mayor concentración de algas en la superficie del material. Del mismo modo, una elevada presencia de biomasa en la superficie puede asociarse a una mayor interacción con el medio circundante, lo que sugiere una mayor tasa de intercambio con el medio.

Por otro lado, las imágenes evidencian un aumento de la rugosidad superficial en las muestras con mayor contenido de microalgas. Esta característica puede contribuir a una mayor capacidad de adsorción, al incrementar la superficie de contacto disponible tanto por la geometría del material como por la presencia de biomasa adherida.

En conjunto, no se detectan fisuras ni defectos microscópicos significativos que comprometan la continuidad del material ni su posible aplicación como elemento filtrante.

5.2.2 Resultados de la prueba de adsorción de dióxido de carbono

La Figura 5-4 muestra la evolución relativa de la concentración de CO_2 en función del tiempo para las distintas muestras ensayadas.

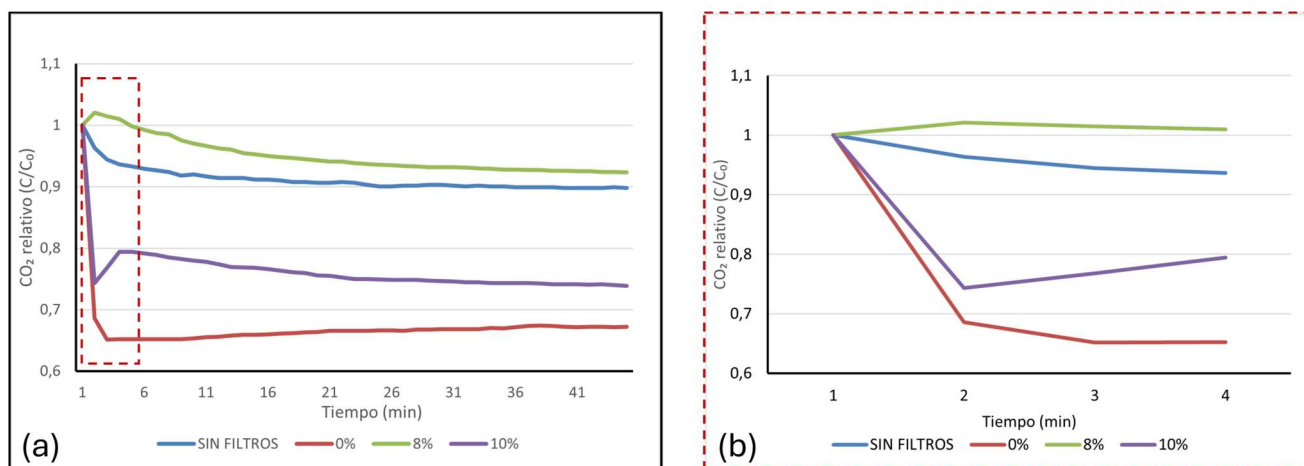


Figura 5-4 Evolución de la concentración relativa de CO_2 : (a) comportamiento completo del ensayo y (b) detalle de los primeros minutos

Se observa una disminución inicial de la concentración en todos los casos, seguida de una estabilización progresiva. La muestra sin filtro y la correspondiente a resina sin microalga presentan comportamientos comparables.

En las muestras con biomasa microalgal (8 % y 10 %), no se aprecia una reducción significativamente mayor respecto a las anteriores, observándose incluso valores superiores en algunos casos. Por tanto, no se identifica una relación clara entre el contenido de biomasa y la capacidad de reducción de CO_2 en las condiciones ensayadas.

No obstante, es importante señalar ciertas limitaciones asociadas al ensayo realizado. El recipiente empleado no era completamente estanco, por lo que posibles fugas o intercambios de CO_2 con el ambiente exterior pudieron afectar a la evolución de la concentración medida. Este hecho introduce una incertidumbre en los resultados obtenidos, especialmente en la fase de estabilización de las curvas.

En este sentido, el comportamiento observado al inicio del experimento (Figura 5-4-b), donde se produce una rápida disminución de la concentración de CO_2 antes de alcanzar un régimen más estable, podría estar indicando un proceso efectivo de captura o interacción con el material. Sin embargo, la falta de un sistema completamente cerrado impide confirmar con certeza la magnitud de este efecto.

En consecuencia, la utilización de un recipiente hermético en futuros ensayos permitiría aislar el sistema del entorno y evaluar con mayor precisión la capacidad real de adsorción de CO_2 de los materiales estudiados.

5.2.3 Resultados de la prueba de dureza

Los valores medios de dureza obtenidos para las distintas composiciones de material se recogen en el gráfico de la Figura 5-5.

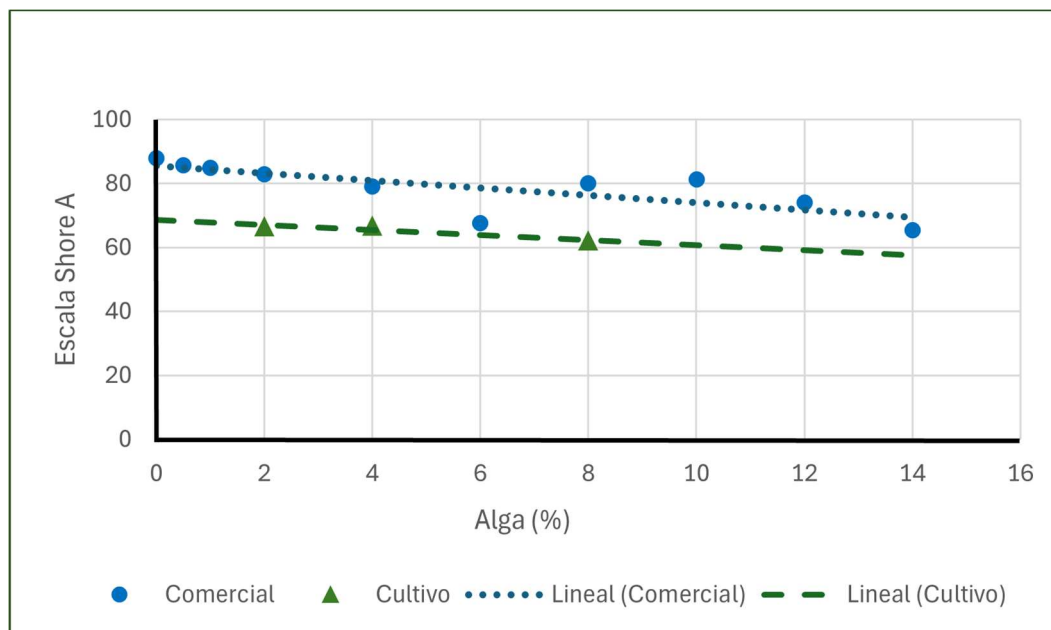


Figura 5-5 Dureza en función del contenido de microalga

En el caso de las piezas fabricadas con microalga comercial, se observa una tendencia general de disminución de la dureza a medida que aumenta el porcentaje de biomasa, especialmente a partir de concentraciones superiores al 6 %, donde la reducción resulta más acusada. En términos cuantitativos, la dureza pasa de valores próximos a 90 *Shore A* en la muestra sin biomasa a valores del orden de 70 *Shore A* para los mayores porcentajes, lo que supone una disminución aproximada de 20 unidades *Shore A*.

Por su parte, las piezas elaboradas con biomasa procedente de cultivo presentan valores de dureza inferiores en comparación con las obtenidas con microalga comercial, manteniéndose en un rango más limitado y sin una tendencia claramente definida en función del porcentaje de alga.

En conjunto, los resultados indican que la incorporación de biomasa microalgal tiende a reducir la resistencia mecánica del material, siendo este efecto más evidente a mayores concentraciones.

Se determina el porcentaje del 12 % de alga comercial y del 8 % de alga cultivada como valores críticos a partir de los cuales se ven comprometidas las capacidades estructurales del material.

5.3 Resultados de la adsorción de contaminantes

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de adsorción de contaminantes realizados sobre las distintas configuraciones del material. Se analizan las concentraciones residuales medidas tras el contacto con las piezas, con el fin de evaluar su comportamiento adsorbente frente a los contaminantes considerados. En este ensayo, las muestras se sumergieron en disoluciones que contenían distintos contaminantes, y tras 30 minutos de contacto se midieron las concentraciones residuales en el medio, con el objetivo de evaluar la capacidad adsorbente del material en función del contenido de biomasa incorporada.

5.3.1 Prueba I: Adsorción de piezas impresas con mezcla resina-alga comercial

Los resultados obtenidos en el ensayo de adsorción de contaminantes realizado con las piezas impresas con mezcla resina-alga comercial se presentan en la Tabla 5-3.

Porcentaje de alga en la pieza	Concentración Cobre (mg/L)	Concentración Fosfato (mg/L)	Concentración Nitrato (mg/L)	Concentración Aluminio (mg/L)
0,0%	9,96	7,1	0,6	1,34
0,5%	9,32	7,8	3,2	1,40
1,0%	8,92	8,6	1,0	1,44
2,0%	8,68	8,2	1,1	1,00
4,0%	10,36	9,0	0,0	1,86
8,0%	7,60	10,7	0,0	0,80
10,0%	8,92	8,9	0,0	0,74
12,0%	5,04	12,2	0,0	0,74

Tabla 5-3 Resultados de adsorción de la prueba I

Las concentraciones residuales obtenidas en los ensayos de adsorción se presentan en la Tabla 5-3. A partir de estos datos se calculó el porcentaje de eliminación de cada contaminante, cuya evolución en función del contenido de microalga se muestra en los gráficos de la Figura 5-6 a la Figura 5-9 .

El porcentaje de eliminación de cada contaminante se calculó a partir de las concentraciones, inicial y final, obtenidas en los ensayos de adsorción, según la expresión 5-1, siendo C_0 la concentración inicial experimental del contaminante, y C_f la concentración final tras el ensayo de adsorción.

$$\text{Eliminación (\%)} = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100 \quad 5-1$$

A modo de aclaración, resulta importante señalar que el porcentaje de eliminación se interpreta en relación con la muestra de referencia (pieza con 0 % de microalga). Es por ello que valores superiores al 100 % indican una capacidad de eliminación mayor que la del material base, mientras que valores negativos reflejan una menor eficacia relativa o incluso un aumento de la concentración del contaminante en disolución.

- **Adsorción del cobre:**

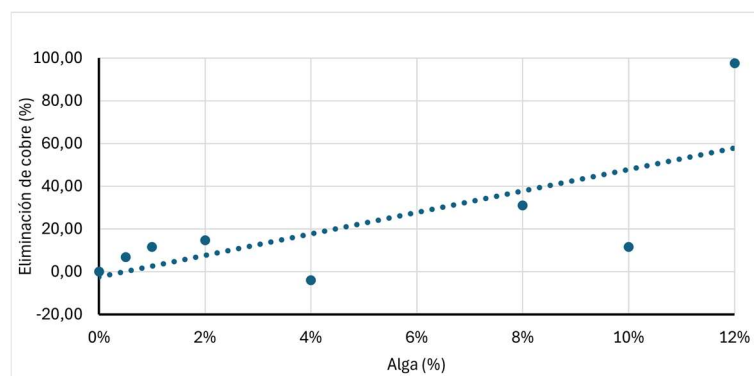


Figura 5-6 Eliminación de Cu^{2+} en función del porcentaje de alga comercial en la pieza

Los resultados de la Figura 5-6 muestran un incremento general de la eliminación de cobre a medida que aumenta el contenido de biomasa en el material. El mayor valor de eliminación se obtiene para el material con 12 % de alga.

- **Adsorción del fosfato:**

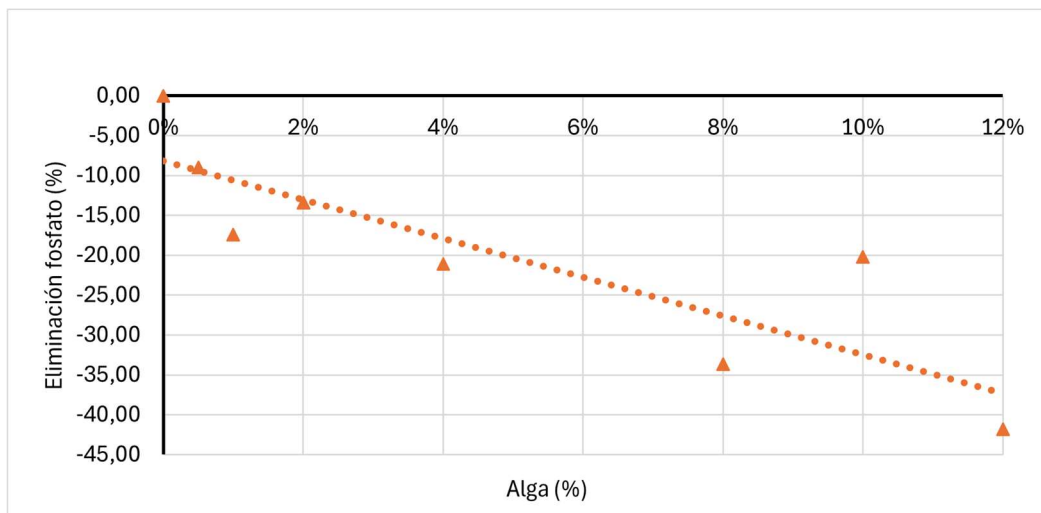


Figura 5-7 Eliminación de PO_4^{3-} en función del porcentaje de alga comercial en la pieza

En el caso del fosfato se observa en la Figura 5-7 un comportamiento distinto, con valores negativos de eliminación para todos los porcentajes de biomasa analizados, lo que indica un aumento de la concentración del anión en disolución tras el contacto con el material.

- **Adsorción del nitrato:**

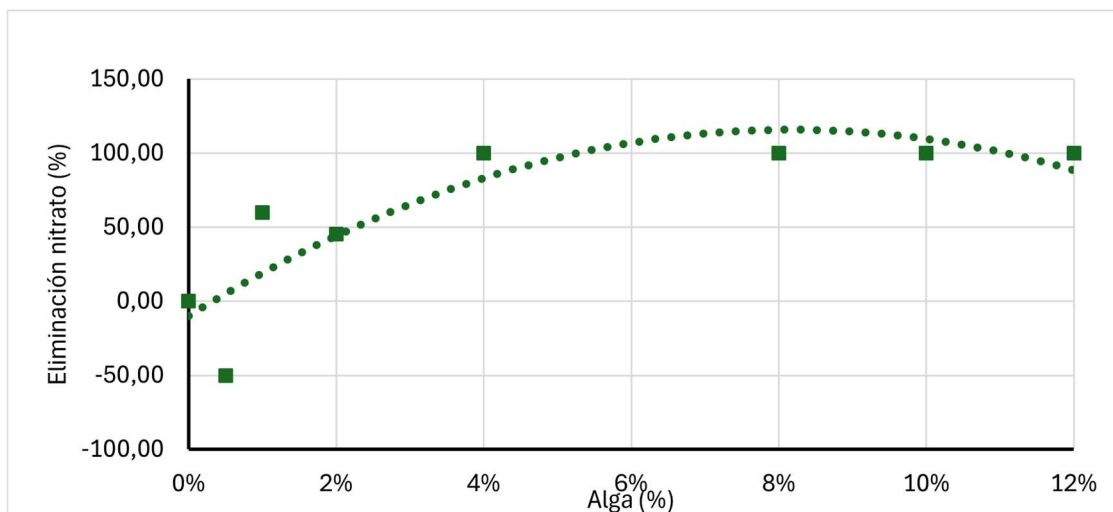


Figura 5-8 Eliminación de $NO_3 - N$ en función del porcentaje de alga comercial en la pieza

La eliminación de nitrato muestra en la Figura 5-8 un aumento significativo a partir de porcentajes moderados de biomasa, alcanzando valores cercanos al 100 % en los filtros con mayor proporción de biomasa.

- **Adsorción del aluminio:**

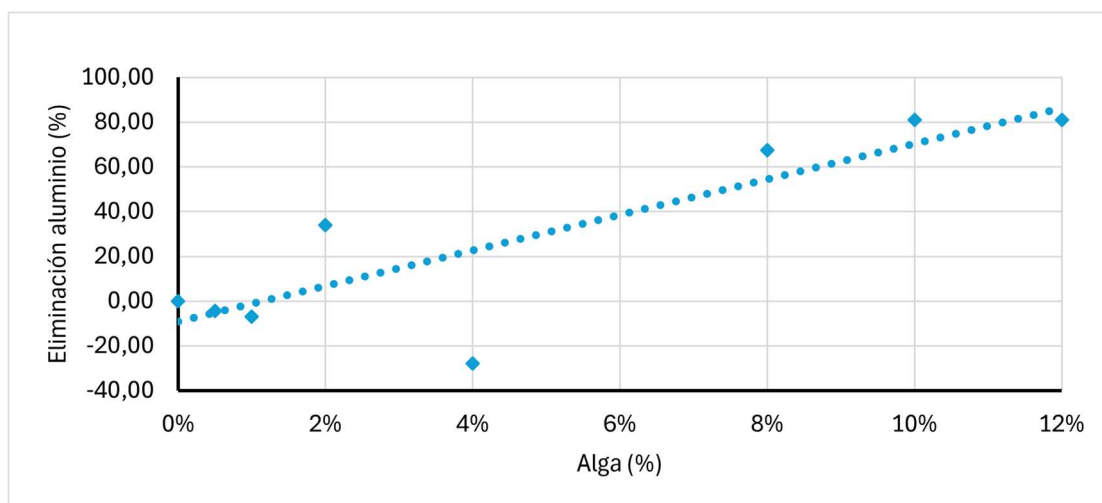


Figura 5-9 Eliminación de Al^{3+} en función del porcentaje de alga comercial en la pieza

En el caso del aluminio (Figura 5-9) se observa una mejora progresiva de la eliminación al aumentar el contenido de biomasa, alcanzando los valores más elevados para porcentajes superiores de alga.

5.3.2 Prueba II: Adsorción de piezas impresas con resina tras una prueba de adhesión

Los resultados de los ensayos de adsorción correspondientes a las piezas sometidas a distintos tiempos de inmersión en el cultivo se presentan en la Tabla 5-4. En ella se recogen las concentraciones residuales de los contaminantes analizados en función del tiempo de exposición del material al medio de cultivo.

Tiempo de inmersión en cultivo	Concentración Cobre (mg/L)	Concentración Fosfato (mg/L)	Concentración Nitrato (mg/L)	Concentración Aluminio (mg/L)
0 h	9,96	7,1	0,6	1,34
24 h	6,80	8,2	1,6	1,16
48 h	6,12	8,5	0,7	1,16
72 h	6,30	8,6	0,5	1,11

Tabla 5-4 Resultados de adsorción de la prueba II

Haciendo uso de la expresión 5-1 para calcular el porcentaje de eliminación de cada contaminante se obtienen los resultados expresados en los gráficos de la Figura 5-10 a la Figura 5-13.

- **Adsorción del cobre:**

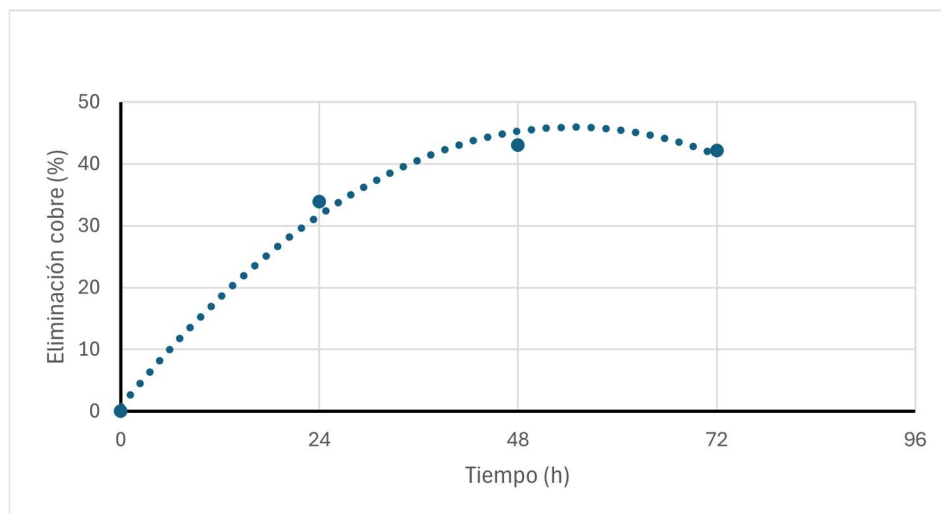


Figura 5-10 Eliminación de Cu^{2+} en función del tiempo de inmersión en el cultivo de algas

La Figura 5-10 muestra la evolución del porcentaje de eliminación de cobre en función del tiempo de inmersión de las piezas en el cultivo. Se observa un incremento significativo de la capacidad de adsorción entre las 0 y las 48 horas, alcanzándose valores máximos en torno a este intervalo. A partir de este punto, la eliminación se estabiliza, lo que sugiere que el efecto del tratamiento en cultivo alcanza un estado prácticamente estacionario en cuanto a la mejora de la capacidad adsorbente frente a este contaminante.

- **Adsorción del fosfato:**

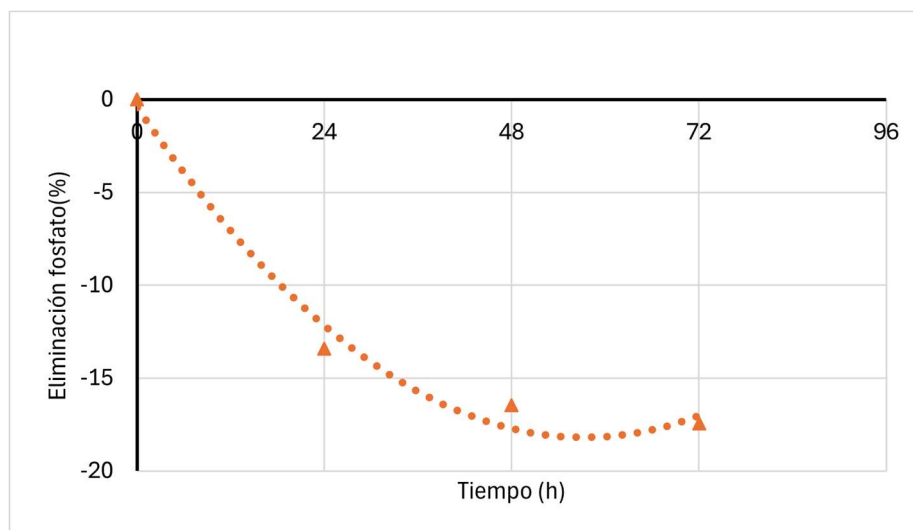


Figura 5-11 Eliminación de PO_4^{3-} en función del tiempo de inmersión en el cultivo de algas

En la Figura 5-11 se representa la evolución de la eliminación de fosfato con respecto al tiempo de inmersión. Se aprecia una disminución progresiva del porcentaje de eliminación, con valores negativos que aumentan en magnitud a medida que transcurre el tiempo. Este comportamiento indica un incremento de la concentración de fosfato en disolución tras el contacto con el material —tal y como indicaba la prueba de adsorción de piezas impresas con resina y alga comercial— lo que sugiere la posible liberación de compuestos fosforados desde la biomasa o la resina de la pieza. Este

comportamiento también podría deberse a un error de lectura del fotómetro por una posible decoloración de las piezas en la disolución.

- **Adsorción del nitrato:**

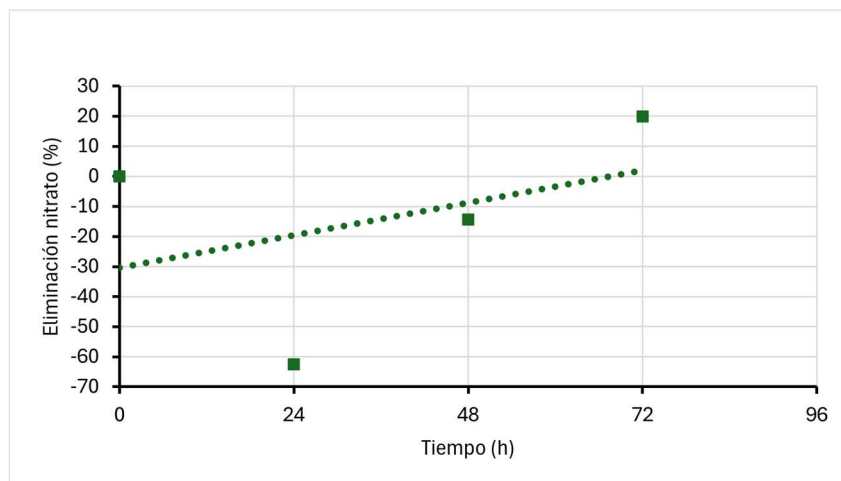


Figura 5-12 Eliminación de $\text{NO}_3 - \text{N}$ en función del tiempo de inmersión en el cultivo de algas

La Figura 5-12 muestra un comportamiento variable en la eliminación de nitrato. Inicialmente, se observa una reducción significativa a las 24 horas, alcanzando valores negativos. Sin embargo, a partir de este punto, se produce una recuperación progresiva, obteniéndose valores positivos a las 72 horas.

Este comportamiento podría estar relacionado con la actividad metabólica de la biomasa microalgal, que en determinadas fases podría liberar compuestos nitrogenados al medio, aumentando la concentración de nitratos, para posteriormente volver a asimilarlos como nutriente. Este efecto resulta menos evidente en el caso del fosfato, probablemente debido a sus mayores concentraciones iniciales.

- **Adsorción del aluminio:**

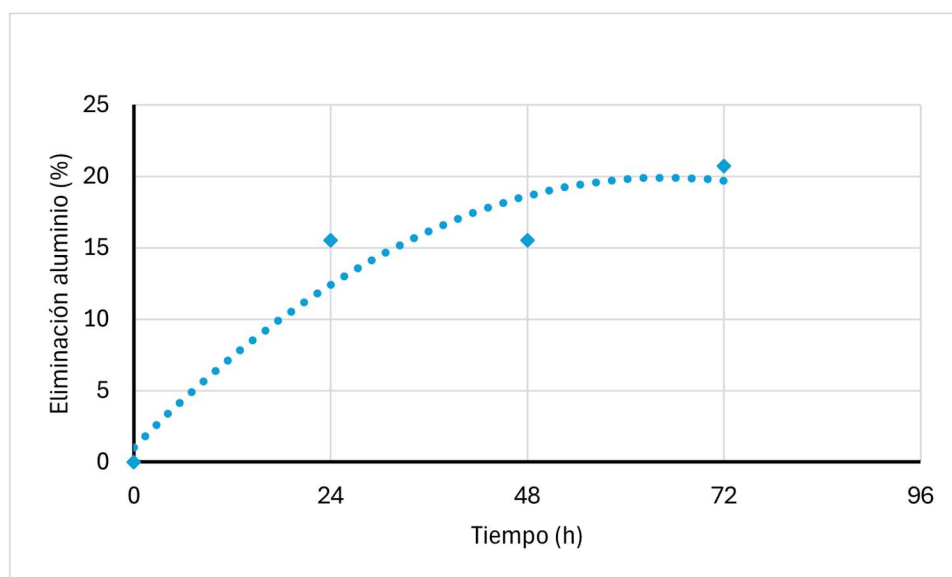


Figura 5-13 Eliminación de Al^{3+} en función del tiempo de inmersión en el cultivo de algas

En la Figura 5-13 se observa un incremento progresivo del porcentaje de eliminación de aluminio con el tiempo de inmersión en el cultivo. La mayor mejora se produce en las primeras 24 horas, tras lo

cual la eliminación tiende a estabilizarse, alcanzando valores máximos a las 72 horas. Este comportamiento sugiere una mejora sostenida de la capacidad adsorbente de la pieza frente a este contaminante como consecuencia de la adhesión de biomasa en la pieza.

5.3.3 Prueba III: Adsorción de piezas impresas con mezcla resina-alga comercial tras una prueba de adhesión

Con el fin de evaluar la influencia de la inmersión prolongada en el cultivo sobre el comportamiento adsorbente del material, se analizaron las piezas con 12 % de contenido de microalga comercial tras una prueba de adhesión en el cultivo de algas de 7 días. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5-5.

Tiempo de inmersión en cultivo	Concentración Cobre (mg/L)	Concentración Fosfato (mg/L)	Concentración Nitrato (mg/L)	Concentración Aluminio (mg/L)
0 días (pieza 0 %)	9,96	7,1	0,6	1,34
0 días (pieza 12 %)	5,04	12,2	0,0	0,74
7 días (pieza 12 %)	7,96	9,1	2,2	1,74

Tabla 5-5 Resultados de adsorción de la prueba III

- **Adsorción del cobre:**

En el caso del cobre, se observa un incremento de la concentración residual tras siete días de inmersión en comparación con el valor correspondiente a la pieza sin tratamiento. Este resultado indica una disminución de la capacidad de adsorción del material tras la exposición prolongada al cultivo.

- **Adsorción del fosfato:**

Para el fosfato, se aprecia una disminución de la concentración en disolución tras siete días de inmersión respecto al valor inicial para la pieza con 12 % de microalga. Este comportamiento sugiere una reducción del efecto de liberación de compuestos fosforados observada previamente.

- **Adsorción del nitrato:**

En el caso del nitrato, se observa un aumento de la concentración residual tras siete días de inmersión en comparación con la pieza sin tratamiento, lo que indica una pérdida de la capacidad de eliminación del material tras la exposición prolongada al cultivo.

La posible explicación de este fenómeno concuerda con lo referido para el caso del nitrato en la prueba II, y es que entre las 24 y las 48 horas, debido al proceso metabólico de la biomasa microalgal, esta podría liberar componentes nitrogenados al medio que, que tras 48 horas vuelve a absorber en forma de nutrientes, lo que explicaría la evolución observada en la concentración del contaminante.

- **Adsorción del aluminio:**

Para el aluminio, se registra un incremento de la concentración en disolución tras siete días de inmersión respecto al valor inicial, lo que sugiere un deterioro del comportamiento adsorbente del material frente a este contaminante.

5.3.4 Prueba IV: Adsorción de piezas impresas con mezcla resina-alga cultivada

En la Tabla 5-6 se encuentran los datos obtenidos tras la realización de las pruebas de adsorción de los filtros impresos con una mezcla de resina y alga procedente del cultivo para los cuatro contaminantes seleccionados.

Porcentaje de alga cultivada	Concentración Cobre (mg/L)	Concentración Fosfato (mg/L)	Concentración Nitrato (mg/L)	Concentración Aluminio (mg/L)
0	9,96	7,1	0,6	1,34
2	5,12	7,3	1,4	0,76
4	4,75	8,7	0,9	0,76
8	4,39	9,0	2,7	0,50

Tabla 5-6 Resultados de adsorción de la prueba IV

Aplicando la expresión 5-1, se calcula el porcentaje de contaminante que eliminan las piezas de la disolución inicial. Los resultados de este estudio se encuentran representados en los gráficos de la Figura 5-14 a la Figura 5-17.

- **Adsorción del cobre:**

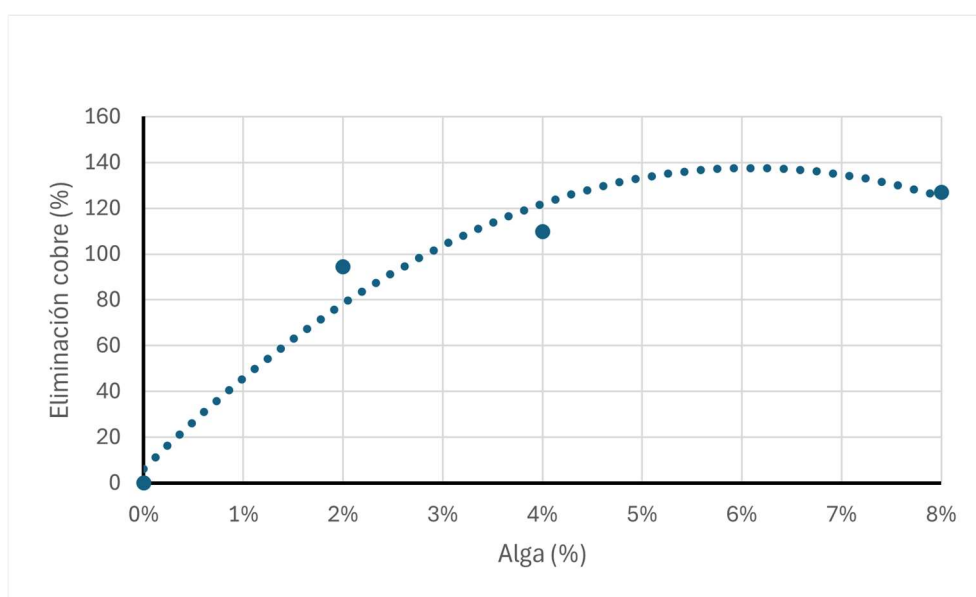


Figura 5-14 Eliminación de Cu^{2+} en función del porcentaje de alga cultivada en la pieza

En el caso del cobre, se observa un incremento progresivo de la capacidad de adsorción con el porcentaje de biomasa, alcanzando valores máximos para las concentraciones más elevadas.

- **Adsorción del fosfato:**

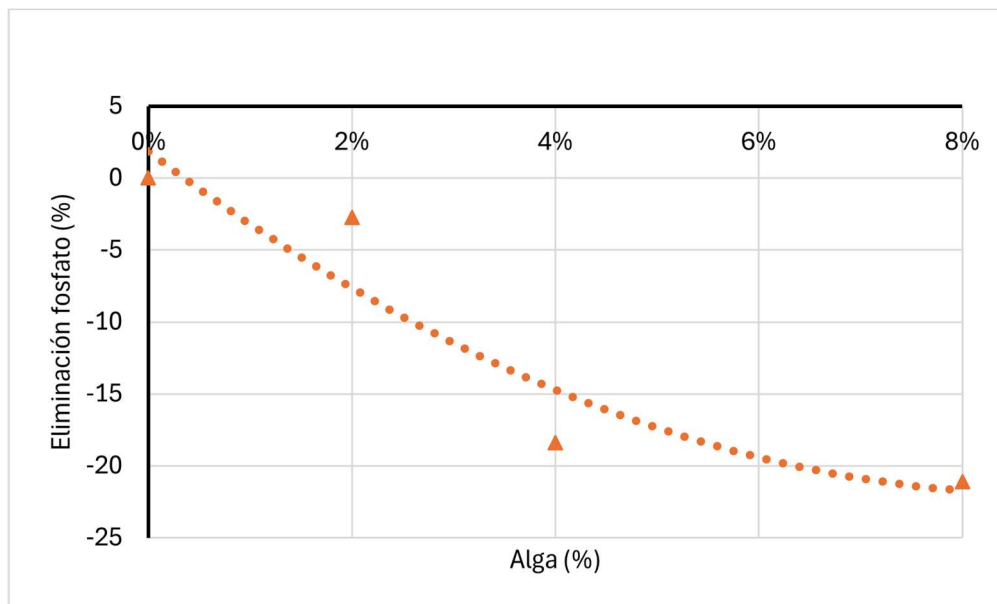


Figura 5-15 Eliminación de PO_4^{3-} en función del porcentaje de alga cultivada en la pieza

Por el contrario, el fosfato presenta una tendencia descendente, con valores de eliminación negativos a partir de porcentajes moderados, lo que indica un aumento de su concentración en disolución.

- **Adsorción del nitrato:**

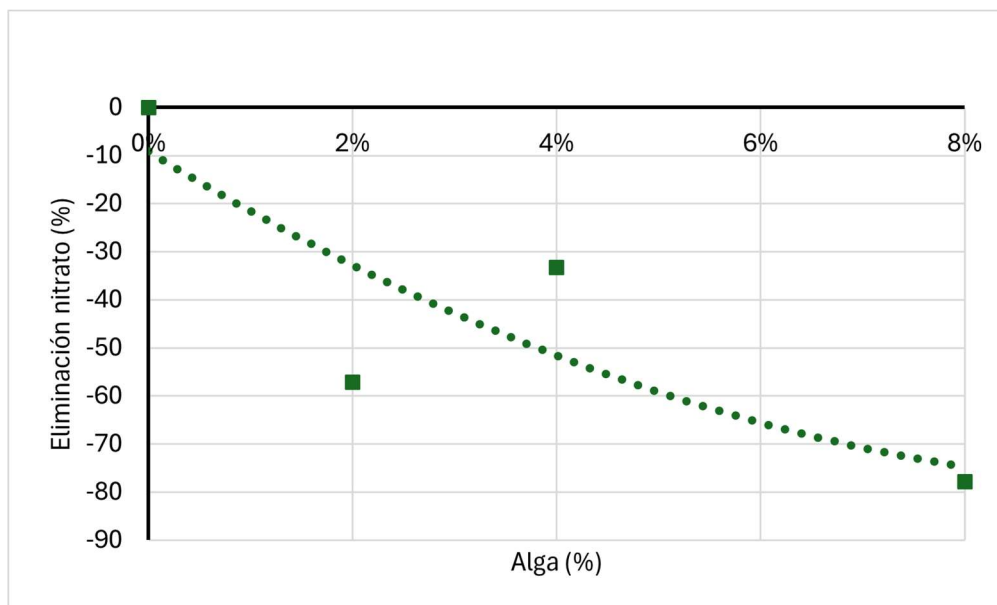


Figura 5-16 Eliminación de $NO_3 - N$ en función del porcentaje de alga cultivada en la pieza

En cuanto al nitrato, se aprecia un comportamiento irregular, con valores negativos de eliminación en todo el rango analizado y una tendencia general a empeorar con el incremento del contenido de biomasa.

- **Adsorción del aluminio:**

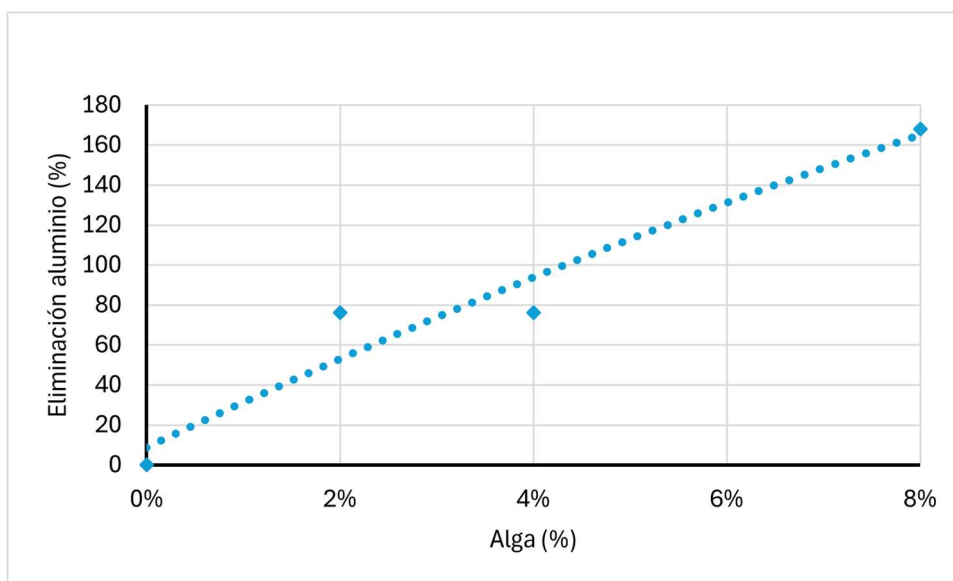


Figura 5-17 Eliminación de Al^{3+} en función del porcentaje de alga cultivada en la pieza

Por último, el aluminio muestra una mejora significativa de la capacidad de adsorción con el aumento del porcentaje de microalga, alcanzando los valores más elevados para las mayores concentraciones.

5.3.5 Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de contaminantes de las estructuras fabricadas

En este apartado se realiza un análisis conjunto de los resultados obtenidos en los ensayos de adsorción, con el objetivo de identificar tendencias generales y comparar el comportamiento del material en función de las distintas variables estudiadas. Pero antes, es necesario hacer un apunte acerca de un contaminante en concreto.

- **Limitaciones en la determinación de fosfato:**

Los resultados obtenidos para el fosfato presentan valores de concentración residual superiores a la concentración inicial en las distintas configuraciones del material, lo que impide interpretar estos datos en términos de capacidad adsorbente. Este comportamiento anómalo sugiere que la medida podría no representar adecuadamente el proceso de adsorción y, por tanto, los resultados asociados a este contaminante se consideran no concluyentes en el contexto del presente estudio.

Como posible explicación, se plantea la liberación de compuestos fosforados desde el propio material, especialmente asociados a la biomasa microalgal, lo que podría incrementar la concentración de fosfato en disolución. De igual forma, no se descarta la influencia de interferencias en la medición, ya que la coloración adquirida por la disolución tras el contacto con el material presenta similitudes con la reacción colorimétrica empleada en la determinación del fosfato mediante el fotómetro, lo que podría afectar a la lectura del equipo.



Figura 5-18 Aspecto de las disoluciones de fosfato tras 30 minutos de contacto con filtros de distinto contenido de biomasa microalgal.

- **Influencia del contenido de microalga comercial en la adsorción:**

La Figura 5-19 muestra la evolución del porcentaje de eliminación de los distintos contaminantes en función del contenido de biomasa de alga en el material adsorbente.

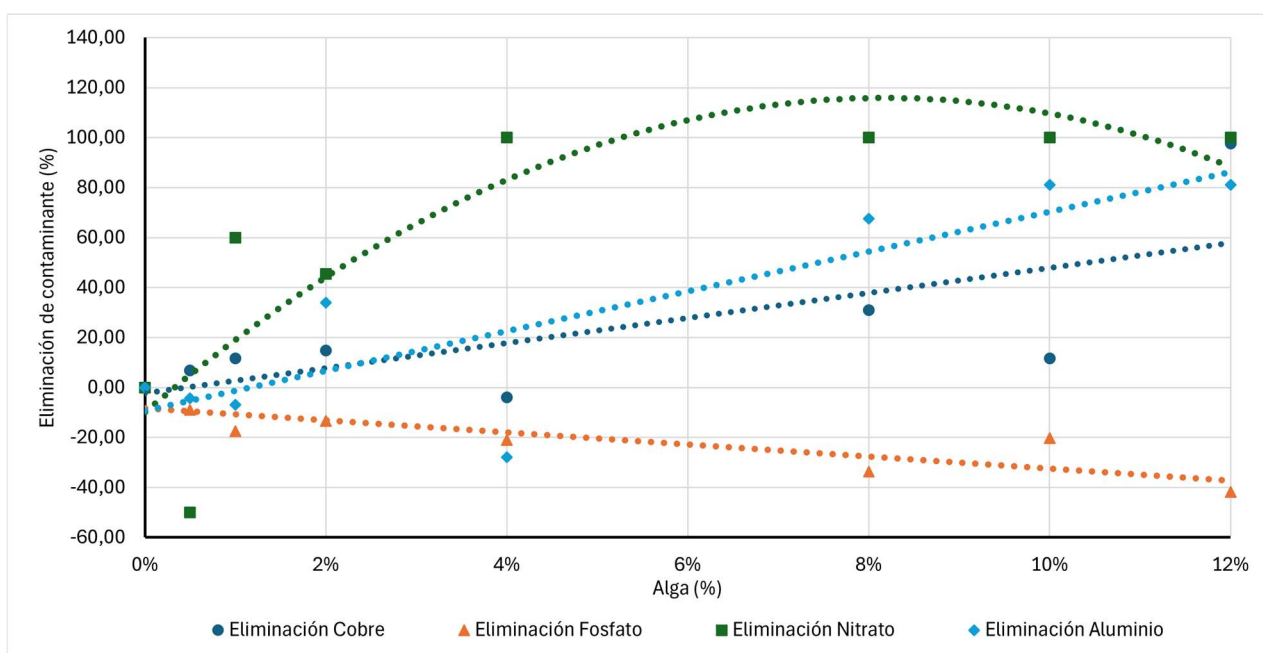


Figura 5-19 Eliminación de contaminantes en función del porcentaje de alga comercial en la pieza.

Atendiendo a los datos expuestos en la Figura 5-19, se observa un aumento progresivo de la capacidad de eliminación en el caso de los metales pesados (cobre y aluminio) a medida que aumenta el porcentaje de espirulina incorporado en la pieza. En el caso de los nutrientes, el nitrato también presenta una tendencia general de eliminación, especialmente a partir de porcentajes moderados de biomasa.

Sin embargo, para el fosfato se observa un comportamiento opuesto, ya que la concentración en disolución aumenta conforme se incrementa el contenido de alga, lo que implica una menor capacidad de eliminación. Este fenómeno podría estar asociado a la liberación de compuestos fosforados por parte de la biomasa microalgal presente en el material.

De forma resumida, los resultados indican que la incorporación de biomasa microalgal mejora la capacidad de eliminación de metales y, en menor medida, de nitratos, mientras que puede dar lugar a efectos adversos en el caso del fosfato.

- **Influencia del tiempo de inmersión en la adsorción:**

La Figura 5-20 muestra la evolución del porcentaje de eliminación de los distintos contaminantes en función del tiempo que estuvo en inmersión de la pieza en el cultivo de algas.

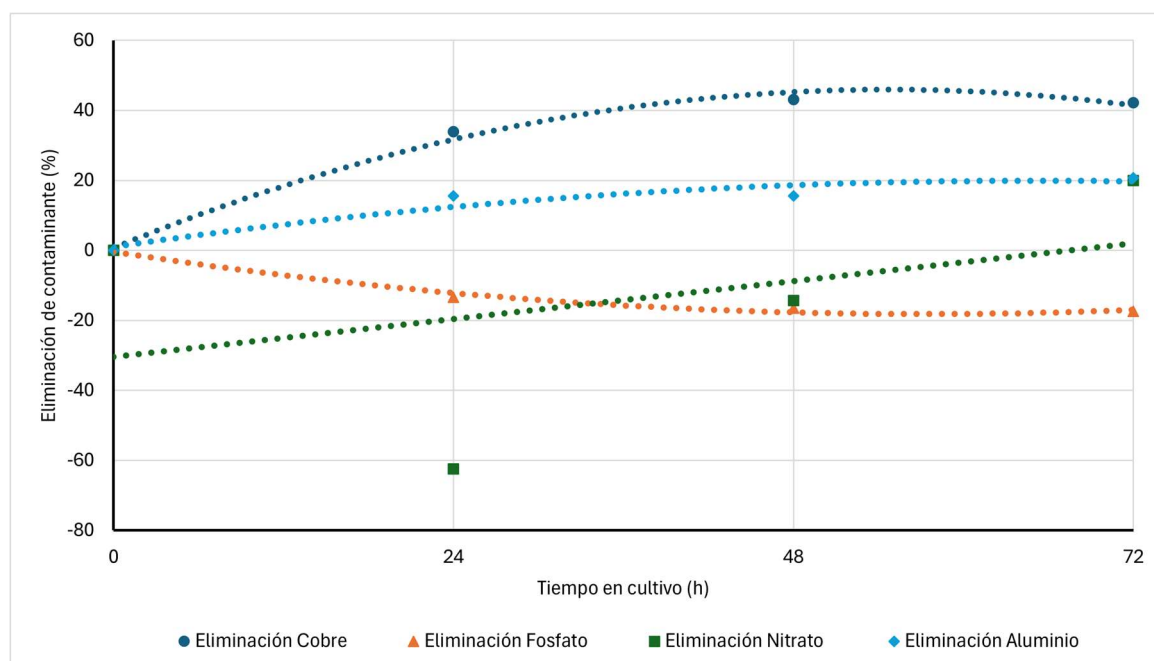


Figura 5-20 Eliminación de contaminantes en función del tiempo de la pieza en el cultivo

Observando la Figura 5-20, se aprecia que el aumento del tiempo de inmersión de las piezas en el cultivo favorece la adhesión y la capacidad de adsorción en el caso del cobre y del aluminio, mientras que para el fosfato se mantiene una tendencia negativa —como ya se ha analizado— y el nitrato presenta un comportamiento variable, con una disminución significativa de la eliminación a las 24 horas, ya sea por un posible error de lectura del fotómetro o por la liberación de compuestos nitrogenados por parte de la biomasa microalgal. Por tanto, la influencia del tiempo de inmersión sobre el comportamiento adsorbente del material depende del tipo de contaminante considerado.

De forma general, se puede concluir que las piezas sometidas a un tratamiento de adhesión resultan más eficaces en la eliminación de metales pesados, mientras que las piezas sin tratamiento de adhesión presentan mayor eficacia en la eliminación de nutrientes en el agua.

- **Influencia de la adhesión en las piezas impresas:**

Atendiendo a los resultados de la Tabla 5-5, se observa que la pieza con 12 % de alga comercial sometida a un tratamiento de adhesión durante 7 días presenta, en términos generales, un deterioro de su capacidad adsorbente respecto a la pieza equivalente sin tratamiento.

- **Influencia del porcentaje de microalga cultivada en la adsorción:**

En la Figura 5-21 se comparan las tendencias observadas de la capacidad de eliminación de las piezas fabricadas con una mezcla de resina y alga cultivada para los distintos contaminantes.

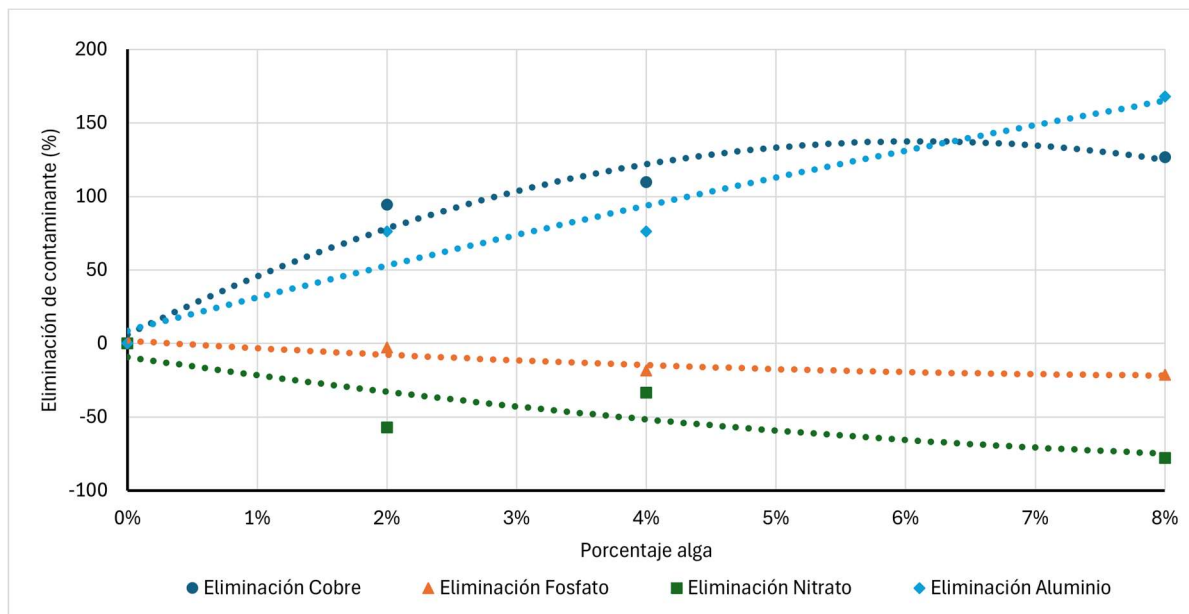


Figura 5-21 Eliminación de contaminantes en función del porcentaje de alga cultivada en la pieza.

La comparación con los resultados obtenidos para la microalga comercial evidencia una mejora global de la capacidad adsorbente del material al emplear biomasa cultivada, particularmente en el caso del cobre y del aluminio, donde se alcanzan valores de eliminación significativamente superiores, lo que sugiere una mayor interacción entre el material y estos contaminantes.

En conjunto, los resultados evidencian que la incorporación de biomasa microalgal en materiales impresos mediante fabricación aditiva permite mejorar la capacidad de adsorción frente a determinados contaminantes, especialmente metales pesados. Sin embargo, la respuesta no es homogénea para todos los compuestos y se ve condicionada tanto por el tipo de contaminante como por factores asociados al propio sistema experimental, lo que pone en relieve la necesidad de profundizar en el estudio y optimización del material.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

Las principales conclusiones que se derivan de la realización del presente Trabajo de Fin de Grado son las listadas a continuación:

- I. Se ha demostrado la viabilidad de la incorporación de biomasa microalgal en matrices de resina fotopolimerizable para la obtención de materiales compuestos mediante fabricación aditiva, manteniendo una adecuada integridad estructural dentro de determinados rangos de composición.
- II. Se ha identificado un límite práctico en el contenido de biomasa incorporable en la resina, situándose en torno al 12 % en peso para microalga comercial y al 8 % para microalga cultivada, a partir del cual se produce una degradación significativa de las propiedades mecánicas y de la calidad de impresión.
- III. La incorporación de biomasa microalgal mejora de forma general la capacidad adsorbente del material frente a contaminantes de naturaleza metálica, observándose un incremento progresivo de la eliminación de cobre y aluminio con el aumento del contenido de alga en la matriz.
- IV. El comportamiento frente a contaminantes de tipo aniónico no presenta una tendencia clara de mejora. En particular, los resultados obtenidos para el nitrato muestran una respuesta irregular, dependiente de las condiciones del ensayo y del tipo de biomasa empleada.
- V. Los resultados correspondientes al fosfato se consideran no concluyentes, al haberse obtenido concentraciones residuales superiores a las iniciales, lo que impide evaluar la capacidad adsorbente del material frente a este contaminante.
- VI. La biomasa microalgal procedente de cultivo presenta, en términos generales, una mayor capacidad adsorbente que la biomasa comercial, especialmente en la eliminación de metales, lo que sugiere una influencia significativa del origen y estado de la biomasa en el comportamiento del material.
- VII. El tratamiento de adhesión mediante inmersión en cultivo modifica el comportamiento adsorbente del material. Se observa una mejora en la eliminación de metales para tiempos

- intermedios de exposición, mientras que exposiciones prolongadas no garantizan una mejora global e incluso pueden deteriorar la capacidad adsorbente.
- VIII. En términos generales, el aumento del contenido de biomasa y, en determinados casos, del tiempo de exposición al cultivo, favorece la adsorción de metales, aunque este efecto no es extrapolable a todos los contaminantes estudiados.
- IX. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el comportamiento adsorbente del material depende de múltiples variables —tipo de biomasa, proporción en la matriz y tratamiento previo—, lo que evidencia la complejidad del sistema y la necesidad de un control experimental más preciso.
- X. De forma global, el trabajo confirma el potencial de los materiales compuestos resina–microalga como sistemas adsorbentes para la eliminación de contaminantes metálicos en disolución, constituyendo una base experimental válida para el desarrollo de materiales biofuncionalizados en aplicaciones de tratamiento de aguas.

6.2 Líneas futuras

A partir de los resultados obtenidos, se identifican diversas líneas de trabajo que permitirían profundizar en el estudio y mejorar las prestaciones del material desarrollado.

En primer lugar, resulta de interés ampliar el estudio a otros contaminantes de relevancia en el tratamiento de aguas, con el fin de evaluar el comportamiento del material frente a una mayor variedad de especies químicas y determinar su aplicabilidad en distintos escenarios reales.

Conviene señalar además que sería conveniente optimizar la formulación del material mediante un análisis sistemático de las variables implicadas, incluyendo el porcentaje de biomasa, las propiedades de la resina y las condiciones de procesado. En este sentido, la realización de un estudio matricial permitiría identificar combinaciones óptimas que maximicen la capacidad adsorbente sin comprometer la integridad estructural del material.

Otra línea de desarrollo relevante consiste en la modificación de la geometría de las piezas impresas, con el objetivo de diseñar estructuras específicas que favorezcan el contacto entre el fluido y el material adsorbente. La optimización geométrica permitiría adaptar el material a aplicaciones concretas, como filtros de flujo continuo o sistemas de tratamiento en columna.

Adicionalmente, sería de interés profundizar en el estudio de los mecanismos de adsorción implicados, así como en la interacción entre la biomasa y la matriz polimérica, con el fin de comprender mejor los fenómenos observados y mejorar la reproducibilidad de los resultados.

Finalmente, es importante evaluar la viabilidad del material en condiciones reales de operación, incluyendo ensayos a mayor escala, estudios de regeneración del material y análisis de su estabilidad a largo plazo. Este enfoque permitiría valorar su potencial como solución en sistemas de tratamiento de aguas, integrando el desarrollo experimental realizado en el presente trabajo en un contexto práctico.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] World Health Organization, «Guidelines for Drinking-Water Quality,» Ginebra, 2022.
- [2] E. Ander-Egg, «WHO report,» Iris, Ginebra, 1977.
- [3] «World Health Organization,» [En línea]. Available: <https://www.who.int/es>. [Último acceso: 02 de febrero de 2026].
- [4] B. Jit Singh, A. Chakraborty y R. Sehgal, «A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers,» *Journal of Environmental Mangement* 348, 2023.
- [5] B. Petrie, R. Barden y . B. Kasprzyk-Hordern, «A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring,» Bath, 2015.
- [6] «American Association for the Advancement of Science,» [En línea]. Available: <https://www.aaas.org/>. [Último acceso: 05 de marzo de 2026].
- [7] M. Ahmed, «Excessive use of nitrogenous fertilizers: an unawareness causing,» Springer, Germany, 2017.
- [8] M. Cole, P. Lindeque, . C. Halsband y G. Tamara S., «Microplastics as contaminants in the marine environment: A review,» *Marine Pollution Bulletin* 62, 2011.
- [9] BF Aqua, «Contaminantes del agua y sus peligrosos efectos para tu salud,» 16 de julio de 2023. [En línea]. Available: <https://www.bfaqua.com/>. [Último acceso: 25 de marzo de 2026].
- [10] J. Briffa, E. Sinagra y R. Blundell, «Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on human,» Heliyon, Malta, 2020.
- [11] N. D. Quang Duy, D. S. Francis, I. Pirozzi y P. C. Southgate, «Use of micro-algae concentrates for hatchery culture of sandfish, *Holothuria Scabra*,» Elsevier, Queensland Australia, 2016.
- [12] Carbotecnia, «Filtros industriales de agua: Tipos y aplicaciones.,» 31 de mayo de 2024. [En línea]. Available: <https://www.carbotecnia.info/>. [Último acceso: 25 de marzo de 2026].

- [13] Flowen, «Eliminación de metales pesados en efluentes mineros,» 31 de julio de 2025. [En línea]. Available: <https://flowen.com.pe/eliminacion-de-metales-pesados-efluentes-minero/>. [Último acceso: 25 de marzo de 2026].
- [14] G. Crini y E. Lichtfouse, «Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment,» Springer, Besançon, France, 2018.
- [15] Bluegold, «El papel de las bacterias dentro del tratamiento biológico de aguas residuales,» 25 de septiembre de 2020. [En línea]. Available: <https://www.bluegold.es/>. [Último acceso: 25 de marzo de 2026].
- [16] M. . I. Khan, J. H. Shin y J. D. Kim, «The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products,» BioMed Central, Yeosu, South Korea, 2018.
- [17] Bioestimulantes agrícolas, «La Arthrospira platensis en agricultura,» 2026. [En línea]. Available: <https://www.bioestimulantesagricolas.net>. [Último acceso: 25 de marzo de 2026].
- [18] M. Su, . G. D'Imporzano, D. Veronesi, . S. Afric y F. Adani, «N, Phaeodactylum tricornutum cultivation under mixotrophic conditions with glycerol supplied with ultrafiltered digestate: A simple biorefinery approach recovering C and,» *Journal of Biotechnology*, n° 323, 2020.
- [19] T. Simioni, M. B. Quadri y R. B. Derner, «Drying of Scenedesmus obliquus: Experimental and modeling study,» *Algal Research*, n° 39, 2019.
- [20] A. H. Buschmann, C. Camus, J. Infante, A. Neori, Á. Israel, M. C. Hernández-González, S. V. Pereda, J. L. Gomez-Pinchetti, A. Golberg, N. Tadmor-Shalev y A. T. Critchley, «Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity,» *European Journal of Phycology*, vol. 52, n° 4, pp. 391-406, 2017.
- [21] R. Chaudhary, P. Fabbri, . E. Leoni, F. Mazzanti, R. Akbari y C. Antonini, «Additive manufacturing by digital light processing: a review,» *Springer*, 2023.
- [22] S. Rouf, A. Malik, N. Singh, A. Raina, N. Naveed, M. I. Haque Siddiqui y M. I. Ul Haq, «Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications,» *Sustainable Operations and Computers*, 2022.
- [23] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman y M. Dolen, «The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0,» de *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017*, , Ankara, Turkey, 2017.
- [24] S. Clark Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr y R. Mülhaupt, «Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing,» *Chemical Reviews*, 2017.
- [25] El Parlamento europeo y el Consejo de la Unión Europea, *DIRECTIVA 2000/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO*, La Haya, Países Bajos, 23 de octubre de 2000.
- [26] Ministerio de Mediambiente, y Medio Rural y Marino, *Real Decreto 60/2011*, Madrid, España, 21 de enero de 2011.
- [27] Anycubic, «Anycubic,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.anycubic.es/>. [Último acceso: 02 de marzo de 2026].

- [28] G. Gutiérrez-Salmeán, L. Fabila-Castillo y G. Chamorro-Cevallos, «Nutritional and toxicological aspects of Spirulina (Arthrospira),» *Nutrición Hospitalaria*, México D.F. México, 2015.
- [29] S. Kouser Ali y A. M. Saleh, «SPIRULINA - AN OVERVIEW,» *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 28 de febrero de 2012.
- [30] Elegoo, «Elegoo,» 2015. [En línea]. Available: <https://eu.elegoo.com/>. [Último acceso: 02 de marzo de 2026].
- [31] ASTM International, *ASTM D2240 – Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*, 2021.
- [32] Hanna Instruments Inc., *Manual de Instrucciones HI 83300*, Woonsocket, EEUU.
- [33] «Web de La Moncloa,» [En línea]. Available: <http://www.lamoncloa.gob.es>. [Último acceso: 13 enero 2015].
- [37] The United States of America, «Environmental Protection Agency,» 8 de enero de 2026. [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/>. [Último acceso: 12 de marzo de 2026].

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

A lo largo del presente trabajo se han considerado, de forma implícita y explícita, diversos aspectos sociales, ambientales y económicos asociados al desarrollo de filtros biofuncionalizados para el tratamiento de aguas.

Desde el punto de vista ambiental, estos aspectos se recogen principalmente en el capítulo 3 (Estado del arte), donde se aborda la problemática de la contaminación del agua y la necesidad de desarrollar nuevos materiales adsorbentes más sostenibles [1]. Asimismo, en el capítulo 4 (Materiales y métodos) se plantea el uso de biomasa microalgal como componente funcional, lo que supone una alternativa a materiales tradicionales, reduciendo el impacto ambiental y favoreciendo el uso de recursos renovables.

En relación con los aspectos sociales, en la introducción del trabajo se pone de manifiesto la importancia del acceso a agua de calidad como elemento clave para el desarrollo y bienestar de la sociedad. La tecnología propuesta, basada en filtros impresos mediante fabricación aditiva, presenta potencial para su aplicación en sistemas de tratamiento descentralizados, lo que podría facilitar su implementación en entornos con limitaciones de infraestructura.

Desde la perspectiva económica, en el desarrollo experimental se ha tenido en cuenta la optimización del consumo de material y del tiempo de fabricación, aspectos directamente relacionados con la viabilidad del proceso. La utilización de técnicas de fabricación aditiva permite reducir costes asociados a procesos tradicionales, así como adaptar el diseño a necesidades específicas, lo que puede suponer una ventaja competitiva en futuros desarrollos industriales.

En caso de considerar estos aspectos de forma conjunta, el trabajo refleja una aproximación orientada al desarrollo de soluciones sostenibles en el campo del tratamiento de aguas, integrando criterios ambientales, sociales y económicos en el diseño y fabricación de los filtros.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo del presente trabajo implica una serie de consideraciones éticas y sociales vinculadas tanto al objeto de estudio como al proceso experimental llevado a cabo.

En primer lugar, el tratamiento de aguas constituye un ámbito de especial relevancia ética, dado que el acceso a agua limpia y segura es un recurso esencial para la vida. En este sentido, la investigación desarrollada se orienta hacia la mejora de tecnologías que puedan contribuir a la reducción de contaminantes, lo que supone una aportación en línea con principios de sostenibilidad y responsabilidad social.

De cara al proceso experimental, se han tenido en cuenta aspectos relacionados con la seguridad en el laboratorio, especialmente en la manipulación de resinas fotopolimerizables y biomasa microalgal. El uso de equipos de protección individual y el seguimiento de procedimientos adecuados han sido fundamentales para garantizar la seguridad durante el desarrollo del trabajo.

Del mismo modo, el uso de biomasa como material funcional plantea una reflexión sobre la utilización de recursos naturales. En este trabajo, se ha optado por el empleo de microalgas debido a su carácter renovable y su potencial en procesos de biorremediación, lo que refuerza el enfoque sostenible de la investigación.

Por último, se ha procurado mantener en todo momento la integridad científica en la obtención y análisis de resultados, evitando la sobreinterpretación de los mismos y reconociendo las limitaciones del estudio. Este aspecto resulta esencial para garantizar la validez del trabajo y su posible aplicación futura.

Habida cuenta de las reflexiones expuestas, el trabajo no solo aborda un problema técnico, sino que también incorpora una reflexión sobre el papel del ingeniero en el desarrollo de soluciones responsables, seguras y sostenibles.

ANEXO III: USO DE HERRAMIENTAS DE APOYO EN LA REDACCIÓN

En la elaboración del presente trabajo se ha hecho uso puntual de herramientas de inteligencia artificial generativa, en particular ChatGPT, como apoyo para la corrección ortográfica y de estilo, así como para la mejora de la redacción de algunos fragmentos.

En ningún caso estas herramientas han sido empleadas para la generación íntegra de contenidos, análisis de resultados o desarrollo de las conclusiones, siendo el autor el único responsable de la totalidad del trabajo presentado.