



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Fabricación de andamiajes para la proliferación de microalgas y
su uso en el tratamiento de las aguas*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Santiago Yrayzoz Goenechea

DIRECTORES: Jesús del Val García

Rosa Devesa Rey

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Fabricación de andamiajes para la proliferación de microalgas y
su uso en el tratamiento de las aguas*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este trabajo considera el creciente interés por el impacto ambiental de los fosfatos en los ecosistemas acuáticos, centrándose en la necesidad de desarrollar técnicas eficientes para su eliminación y recuperación. Algunos de los métodos para su eliminación incluyen la filtración, adsorción y el uso de biorreactores, con potencial para la fabricación aditiva o impresión 3D de estructuras para asistir en la eliminación efectiva de fosfatos.

Este estudio sugiere el uso de la impresión 3D en la fabricación de andamiajes que sirvan como soporte para el crecimiento de microalgas en aguas ricas en fosfatos, explorando condiciones experimentales que permitan optimizar el proceso de biorremediación. El trabajo se centra en la influencia de diferentes geometrías y materiales, en la eficiencia de la eliminación de fosfatos, dando énfasis a la importancia de la personalización y la complejidad de las estructuras creadas por medio de esta tecnología. Esta tecnología representa una nueva posibilidad para la innovación y sostenibilidad ante el problema ambiental de la eutrofización. Tal enfoque puede realizar no solo una mejor calidad del agua y la salvaguarda de los ecosistemas acuáticos, sino también una oportunidad para la recuperación del fósforo, un recurso limitado, para su reutilización.

PALABRAS CLAVE

Microalgas, Fabricación aditiva, Fosfatos, Eutrofización, Fósforo

AGRADECIMIENTOS

A mi tío, Pablo Grosso, por enseñarme que todo lo que se quiere se tiene que trabajar.

A mi padre, por ser el referente de mi vida.

A mi madre, por ser mi eterna consejera.

Al Col. D. Alberto Cique, por su incansable y continuada lucha por hacer las cosas perfectas.

A mis tutores, el Dr. Jesús Del Val y la Dra. Rosa Devesa, sin ellos nada de esto sería posible.

Al CUD, que me ha enseñado a luchar lo imposible.

A Pedro y Juanjo, que en la sombra y con constancia consiguen que gente como yo cumpla su sueño.

A Marta, por enseñarme la virtud de la paciencia.

A mi loro Bartolo y a mi cultivo Petunia, que me han enseñado a ser padre antes de tiempo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción	6
1.2 Hipótesis y Objetivos	7
1.2.1 Hipótesis	7
1.2.2 Objetivos.....	7
2 Estado del arte	9
2.1 Contaminación y tratamiento de aguas residuales	9
2.1.1 Impacto de la actividad humana en la calidad del agua.....	9
2.1.2 Tipos y clases de las aguas residuales	9
2.2 Tratamientos de aguas residuales.....	11
2.2.1 Tratamiento primario	11
2.2.2 Tratamiento secundario.....	11
2.2.3 Tratamiento terciario	11
2.2.4 Tipos de microalgas y ámbito de aplicación.....	12
2.3 Problemática del fosfato en las aguas	14
2.3.1 Tratamiento de aguas ricas en fosfatos	14
2.4 Fabricación aditiva	15
2.4.1 Historia de la fabricación aditiva	15
2.4.2 Desafíos y tendencias futuras en impresión.....	16
3 Materiales Y Métodos	18
3.1 Materiales	18
3.1.1 Resina	18
3.1.2 Impresora 3D	18
3.2 Programas utilizados	19
3.2.1 Autodesk Inventor®: pilar en el modelado CAD en 3D	19
3.2.2 CHITUBOX®.....	19
3.3 Métodos.....	19
3.3.1 Realización de piezas.....	20
3.3.2 Impresión de las piezas	21
3.3.3 Cultivo de Microalgas.....	22
3.3.4 Creación de figuras con microalgas.....	23

3.4 Proceso de análisis de datos	23
3.4.1 Estudio de niveles de fosfatos.....	23
4 Resultados	25
4.1 Diseño, fabricación e impresión de andamiajes para la proliferación de microalgas	25
4.1.1 Primer diseño:	25
4.1.2 Segundo diseño:	26
4.1.3 Tercera figura:	26
4.1.4 Cuarto diseño:	27
4.1.5 Quinto diseño:	28
4.1.6 Sexto diseño:	28
4.1.7 Séptimo diseño:	28
4.1.8 Octavo diseño:	29
4.2 Cultivo de microalgas	31
4.3 Resultados del estudio realizado en las estructuras pasadas 7 días en microalgas	32
4.4 Resultados del estudio realizado en las estructuras pasadas 28 días en microalgas	33
4.5 Resultados del estudio realizado en estructuras con un 0,5% de espirulina	34
4.6 Resultados del estudio realizado en estructuras con 1% de espirulina	36
4.7 Resultados del estudio realizado en estructuras con 2% de espirulina	38
4.8 Tabla resumen de piezas	40
4.8.1 Flor.....	40
4.8.2 Cuadrada	41
5 Conclusiones y líneas futuras	43
5.1 Líneas Futuras	43
6 Bibliografía.....	45
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	48
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 EDAR Tres Cantos (autoría propia)	10
Figura 2-2 Aguas residuales ganaderas	10
Figura 2-3 Aguas residuales industriales.....	10
Figura 2-4 Aguas residuales pluviales.....	11
Figura 2-5 Procesos de tratamiento de aguas residuales	12
Figura 2-6 Patente de “Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography”	15
Figura 2-7 Patente de “Apparatus and method for creating three-dimensional objects”	16
Figura 3-1 Prototipo de la pieza “Batea cuadrada”	20
Figura 3-2 Prototipo de la Figura “Rubik”	20
Figura 3-3 Prototipo de la figura “Batea circular”	21
Figura 3-4 Distribución de la primera impresión realizada.....	21
Figura 3-5 Captura de la aplicación <i>Chitubox</i> ® antes de imprimir.....	22
Figura 3-6 Proceso final de una impresión.....	22
Figura 3-7 Cultivo de microalgas (semana 1)	23
Figura 3-8 Figuras impresas con disolución de espirulina	23
Figura 4-1 Prototipo de la batea cuadrada en <i>Autodesk Inventor</i> ®. Autoría propia	25
Figura 4-2 Resultado final de la batea cuadrada. Autoría propia.	26
Figura 4-3 Prototipo de la batea circular en <i>Autodesk Inventor</i> ®. Autoría propia.....	26
Figura 4-4 Resultado final de la batea circular. Autoría propia.	26
Figura 4-5 Prototipo de la figura “Rubik” en <i>Autodesk Inventor</i> ®. Autoría propia.....	27
Figura 4-6 Resultado final de la figura <i>Rubik</i> . Autoría propia.	27
Figura 4-7 Resultado final de la figura Pelota. Autoría propia.	27
Figura 4-8 Resultado final de la figura Cuadrada. Autoría propia	28
Figura 4-9 Resultado final de la figura Flor. Autoría propia.....	28
Figura 4-10 Resultado final de la figura Mandala. Autoría propia	29
Figura 4-11 Resultado final de la figura Colchón. Autoría propia.....	29
Figura 4-12 Cultivo de microalgas, primer día	31
Figura 4-13 Cultivo de microalgas en la semana 5	32
Figura 4-14 promedio de % de fosfato eliminado, pasados 7 días.....	32
Figura 4-15 Después de estar 7 días en contacto con microalgas	33
Figura 4-16 Gráfica del promedio de % eliminado, pasados 28 días.	33
Figura 4-17 después de 28 días en contacto con las microalgas	34
Figura 4-18 impresas con 0,5% de espirulina y sin lavar en alcohol	34

Figura 4-19 impresas con 0,5% de espirulina y lavadas en alcohol	34
Figura 4-20 del promedio de % eliminado, con un 0,5% de espirulina y lavado.....	35
Figura 4-21 del promedio de % eliminado, con un 0,5% de espirulina y lavado.....	35
Figura 4-22 del promedio de % eliminado, con un 0,5% de espirulina y no lavado.....	36
Figura 4-23 promedio de % eliminado, con un 0,5% de espirulina y lavado	36
Figura 4-24 Flor y Cuadrada al 1% de espirulina	37
Figura 4-25 promedio de % de fosfato eliminado, con un 1% de espirulina y 1 día en fosfato.....	37
Figura 4-26 promedio de % de fosfato eliminado, con un 1% de espirulina y 3 días en fosfato	38
Figura 4-27 impresas con un 2% de espirulina	38
Figura 4-28 Pelota al 2% de espirulina que no ha resistido	39
Figura 4-29 Estructuras Cuadrada y Flor al 2%	39
Figura 4-30 promedio de % de fosfato eliminado, con un 2% de espirulina y 1 día en fosfato.....	40
Figura 4-31 promedio de % de fosfato eliminado, con un 2% de espirulina y 3 días en fosfato	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2–1 Aplicaciones potenciales de diferentes géneros y especies de microalgas.	13
Tabla 4–1 Tabla resumen de las figuras	31
Tabla 4–2 Comparación de las diferentes piezas Flor	41
Tabla 4–3 Comparación de las diferentes piezas Cuadrada	42

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La preocupación actual por el medio ambiente y los efectos perjudiciales de diversas actividades humanas sobre este, han llevado a la sociedad a poner en el punto de mira a diversos contaminantes, como pueden ser los fosfatos. La relación entre el fosfato y la calidad del agua es muy significativa y estrecha, ya que, los fosfatos son un nutriente esencial para el crecimiento de las algas, plantas y lecho marino. Una concentración adecuada de fósforo es ideal para dicho ecosistema, pero en contra, una presencia descontrolada de este contaminante fósforo en el agua puede llegar a provocar un crecimiento desmedido de algas, afectando así a la calidad del agua y, por ende, a la vida acuática, favoreciendo el inicio del proceso denominado eutrofización, un fenómeno que desequilibra los ecosistemas acuáticos. Por este motivo, el desarrollo y búsqueda de técnicas eficaces para la eliminación de fosfatos se ha convertido en algo primordial [1].

El fósforo, según *H. Lin et al.* [2] es tanto un elemento crítico para la seguridad alimentaria como un recurso no renovable, ya que está presente en forma de compuestos organofosforados y fosfatos, siendo esencial para el desarrollo de los sistemas agrícolas y ganaderos actuales [3]. De ahí la importancia de la recuperación del fósforo en aguas residuales ya que, en función de los problemas técnicos y económicos ligados a su extracción, resulta fundamental desarrollar procedimientos para su extracción, lo cual, sin duda, tendría efectos beneficiosos sobre los ecosistemas acuáticos, pero también una fuente de ingresos al ser un recurso limitado.

Entre las diversas estrategias que se están implementando para combatir el incremento de fosfato en el agua, destacan técnicas como la filtración, la adsorción y el uso de biorreactores, cuya eficacia puede llegar a ser muy elevada, aunque también dependiente de los materiales empleados. Este trabajo presenta una orientación novedosa, al integrar las técnicas de adsorción y los biorreactores dentro de las tecnologías de fabricación aditiva o impresión 3D, permitiendo diseñar procesos a medida y para el tratamiento *in situ* de los contaminantes. Dicha tecnología permite una creación de múltiples estructuras que ayudarían a la eliminación de fosfatos de una manera más sencilla, eficaz y económica [4].

Tomando como base el trabajo anteriormente citado, centrado en el uso de tecnologías de membranas mediante impresión aditiva, se propone explorar dicha tecnología para estudiar en condiciones experimentales la eficacia del proceso mediante la creación de membranas muy delgadas, con estructuras complejas y diversos materiales, mejorando así el rendimiento de filtración, a la vez que ofrece una solución más sostenible y eficiente [5].

Este proyecto de investigación se centra en la posibilidad de combinar los beneficios de la biodegradación proporcionada por los biorreactores junto con la versatilidad y eficiencia de la fabricación aditiva. Este estudio resulta de gran relevancia para darle un enfoque particular a la eliminación de fosfatos empleando este mismo método mediante la creación de estructuras personalizadas y complejas que maximizan la superficie de contacto en el agua, mejorando así la eficiencia de captura de fosfato, ya que adhieren de manera más sencilla las algas a ellas. La impresión 3D facilita la creación de sistemas de filtración complejos en una sola unidad compacta. Por ejemplo, el diseño de filtros que combinan la eliminación mecánica de partículas de adsorción química, con un tratamiento más eficaz y eficiente. Dichas estructuras son realizadas mediante un prototipado rápido, permitiendo así corregir de manera rápida los errores que se puedan cometer en anteriores modelos. Por esto y mucho más, la fabricación aditiva ofrece soluciones muy importantes e innovadora en la eliminación del fosfato en el agua, ayudando así a combatir contra los problemas medioambientales más críticos de la actualidad.

1.2 Hipótesis y Objetivos

1.2.1 Hipótesis

La fabricación de andamiajes más o menos complejos mediante impresión 3D permite servir de soporte de microalgas que al ser introducidas en aguas ricas en fosfatos permite reducir sus niveles, mejorando la adsorción de los fosfatos presentes en aguas residuales y creando un sistema de adsorción a medida, adaptable al contaminante presente en las aguas y de tratamiento *in situ*, lo que supone una ventaja en relación con otros procedimientos de biorremediación del agua.

1.2.2 Objetivos

1. Creación de andamiajes mediante impresión 3D con fabricación aditiva.

Para alcanzar este objetivo se van a utilizar andamiajes con diferentes tamaños y conformaciones espaciales con el propósito de identificar la configuración óptima, y, por ende, maximizar la eficiencia en la reducción de fosfatos en función de una mayor productividad de las microalgas. Para ello se diseñarán cuatro piezas, con el programa *Autodesk Inventor* y se completará el estudio con otras cuatro geometrías más complejas. El principal objetivo de esta etapa es evaluar en qué medida la geometría de las piezas impresas influye en los procesos de adsorción y/o desarrollo de las algas. Para ello se realizará una etapa de estudio y diseño de diferentes geometrías. El resultado obtenido se utilizará para evaluar el efecto de la geometría en la eliminación de fosfatos.

2. Cultivo de microalgas en laboratorio.

La segunda dimensión innovadora de este proyecto trata sobre el exhaustivo control del entorno de cultivo, así como también el tipo de cultivo que se quiere alimentar. Para ello, se establecerán las condiciones en las que se obtiene un adecuado cultivo de microalgas y se describirán las condiciones de su obtención y mantenimiento, de forma que sea reproducible para futuros experimentos. La fase de crecimiento algal se extendió un período de 8 semanas.

3. Estudio, control y evolución del cultivo y los andamiajes.

La tercera dimensión está orientada a la parte más práctica del trabajo, relacionada con el mantenimiento de las microalgas y su utilización como medio para inocular las estructuras 3D obtenidas. Para ello, se sumergieron parte de las piezas impresas en el cultivo, durante 3 semanas, hasta observar una adhesión considerable y, a continuación, se evaluó la capacidad de la estructura bioactiva de eliminar los fosfatos. Además, se fabricaron piezas sustituyendo parte de la resina con espirulina, variando este porcentaje entre un 0,5 y 2%, para evaluar el efecto de la descontaminación cuando el alga forma parte de la propia estructura del andamiaje. La

fabricación con el alga incorporada y la posterior evaluación de la adsorción del fosfato se realizó durante un período de 4 semanas.

Finalmente se realizará un análisis de los resultados obtenidos en la fase experimental a efectos de determinar la bondad de la hipótesis planteada, así como los objetivos establecidos en relación con la capacidad de biorremediación de aguas ricas en fosfatos en función del andamiaje analizado.

El estudio experimental que sustenta este Trabajo Fin de Grado aspira a ofrecer una solución innovadora y sostenible a la problemática de los procesos de eutrofización de aguas continentales ricas en fosfatos provenientes de aguas residuales de origen doméstica o agrícola.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Contaminación y tratamiento de aguas residuales con microalgas

2.1.1 Impacto de la actividad humana en la calidad del agua

La contaminación de agua con fosfatos provenientes de las aguas residuales de origen doméstico y agrícola genera problemas medioambientales severos en las aguas continentales, contribuyendo al desarrollo de procesos de eutrofización que tiene consecuencias en los ecosistemas acuáticos muy graves.

Las fuentes de fósforo, típicamente en forma de fosfato, en el agua incluyen la actividad agrícola, ya que en este ámbito se usan muchos agentes químicos como el uso de fertilizantes fosfatados; también se ve afectado en las aguas residuales domésticas, con el uso de detergentes, aunque se estén implementando regulaciones para reducir o eliminar el uso de fosfato debido a su gran impacto ambiental; pero también lo encontramos debido al desgaste natural de las rocas y el suelo.

La contaminación del agua también viene dada debido a la eutrofización, que es el “incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces de lagos y embalses, que provoca un exceso de fitoplancton” [6]. Con concentraciones de nitrógeno y fósforo que llegarían incluso hasta triplicar el valor normal, lo cual daría lugar a la proliferación de microalgas nocivas para el ser humano.

2.1.2 Tipos y clases de las aguas residuales

En relación con las aguas residuales, la actividad humana es inevitablemente el principal agente causante. La generación de estas aguas varía en función de diversos factores, como son, la influencia en los diferentes sectores industriales, comerciales, o la densidad de la población. A raíz de esto, se diferencian los siguientes grupos de aguas sucias:

- Domésticas/urbanas: proceden de las viviendas, o instituciones y suelen estar transportadas por el sistema de alcantarillado y contienen altas concentraciones de contaminantes orgánicos y sólidos sedimentables (Figura 2-1).



Figura 2-1 EDAR Tres Cantos (autoría propia)

- Agrícolas y ganaderas: son las aguas procedentes de la actividad agrícola y ganadera, tienen gran impacto en el medio por los productos químicos que se utilizan (fertilizantes) para el riego y, por los residuos orgánicos generados en la actividad ganadera [7]. Se trata de las dos actividades primarias más contaminantes del agua. Su importancia radica, además, en que las descargas de estas aguas suelen producirse en fuentes difusas y no controladas, con lo que entran a los cursos de agua sin haber recibido tratamiento (Figura 2-2).



Figura 2-2 Aguas residuales ganaderas

- Industriales: son las aguas originadas por la actividad industrial. Las usan productos químicos como el mercurio, níquel o plomo, entre otros. Dichos productos contaminan en grandes proporciones las aguas (véase en la Figura 2-3). Son aguas de naturaleza muy contaminante, aunque suelen encontrarse en fuentes puntuales, localizadas, lo que facilita su tratamiento.



Figura 2-3 Aguas residuales industriales [8].

- Pluviales: provenientes de las lluvias tanto normal como ácida. Este grupo se considera como residual ya que arrastra la gran cantidad de residuos del medio hasta su llegada a la depuradora

como se observa en la Figura 2-4. Además, en épocas torrenciales, arrastran también los suelos agrícolas adyacentes a los cursos de los ríos, causando de nuevo contaminación a causa de actividades agrícolas y ganaderas.



Figura 2-4 Aguas residuales pluviales [9]

2.2 Tratamientos de aguas residuales

A efectos de reducir el impacto de las aguas residuales en el medioambiente y en los ecosistemas acuáticos se han desarrollado diferentes técnicas y tratamiento para mejorar la calidad del agua (Figura 2-5).

2.2.1 Tratamiento primario

Primer nivel de tratamiento de aguas residuales, diseñado para quitar los sólidos en suspensión y materia orgánica. Se utilizan procesos físicos más que químicos o biológicos. Se incluyen diversos métodos:

- Sedimentación: donde el agua residual se almacena en grandes tanques para retirar los sólidos suspendidos por diferencia de densidad y peso, ya que los sólidos son más pesados que el agua. La sedimentación primaria aplica flocculantes [10].
- Tamizado: se emplea para retirar objetos de grandes proporciones que se encuentran en el agua, como palos o piedras.
- Desarenado: remueve las grasas, aceites y arenas. Dichos elementos tendrían un impacto altamente negativo en los siguientes procesos.

2.2.2 Tratamiento secundario

Diseñado para quitar la carga orgánica que está disuelta o en suspensión y que no ha sido previamente retirada en el tratamiento primario. Para esta parte del proceso de descontaminación se emplean procesos biológicos, debido al rol principal que obtienen los microorganismos. Se observan los siguientes métodos:

- Lodos activos: en este método se usan cultivos de microorganismos en suspensión mezclándolos con el agua residual descomponiendo así la materia orgánica.
- Filtros biológicos: consisten en unas columnas llenas de material de soporte en donde crecen los microorganismos que tratan las aguas.

Se trata de un tratamiento de vital importancia ya que todavía se registran muchas depuradoras que no cuentan con tratamiento terciario y que, por lo tanto, requieren de un tratamiento secundario verdaderamente eficiente.

2.2.3 Tratamiento terciario

Los tratamientos terciarios de aguas residuales son procesos adicionales para eliminar contaminantes remanentes, en estado coloidal o suspendido. Se llevan a cabo normalmente en las EDAR. El tratamiento terciario permite reducir la carga contaminante de aguas residuales

permitiendo, no solo su vertido a cauces naturales, sino la reutilización como recurso hídrico alternativo. Es el último de los procesos, en el que se consigue la calidad del agua más alta (sobre todo si se quiere reutilizar). Este tratamiento es el que consigue eliminar las últimas sustancias que los tratamientos anteriores no han conseguido, como son los nutrientes, fósforos, virus y bacterias. Los procesos terciarios generalmente forman diferentes combinaciones entre distintas tecnologías. La elección de los procesos dependerá de los tratamientos primarios y secundarios implementados, y de la calidad de las aguas para su uso posterior que depende de la legislación vigente. Las diferentes tecnologías para los procesos de tratamiento terciario se describen a continuación:

- Tratamientos fisicoquímicos: operación para eliminar la materia en suspensión utilizando operaciones mecánicas y aditivos químicos, como la coagulación, floculación y decantación (sedimentación).
- Filtración: operación en la que el agua pasa a través de un medio poroso, reteniendo la mayor cantidad posible de materia en suspensión. Puede ser filtración profunda o superficial.
- Flotación con aire disuelto: operación que consiste en generar burbujas de gas, donde el aire de la burbuja contiene las partículas presentes del agua tratada que se elevan hasta la superficie y salen del procesado.
- Oxidaciones avanzadas: operación para degradar compuestos orgánicos en medio acuoso.
- Membranas de filtración: operación que se basa en impedir por exclusión el paso a través de la membrana de contaminantes de mayor tamaño que el diámetro de poro de la membrana. Por un lado, se distinguen la fuerza impulsora generada por el diferencial de presión transmembrana en microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa y, por otro lado, la electrodiálisis, cuya fuerza impulsora es el diferencial de potencial eléctrico transmembrana.
- Desinfección: operación que consiste destruir o inactivar los microorganismos que puedan causar enfermedades. Se puede distinguir el uso de la radiación ultravioleta, la cloración y la ozonización [11].

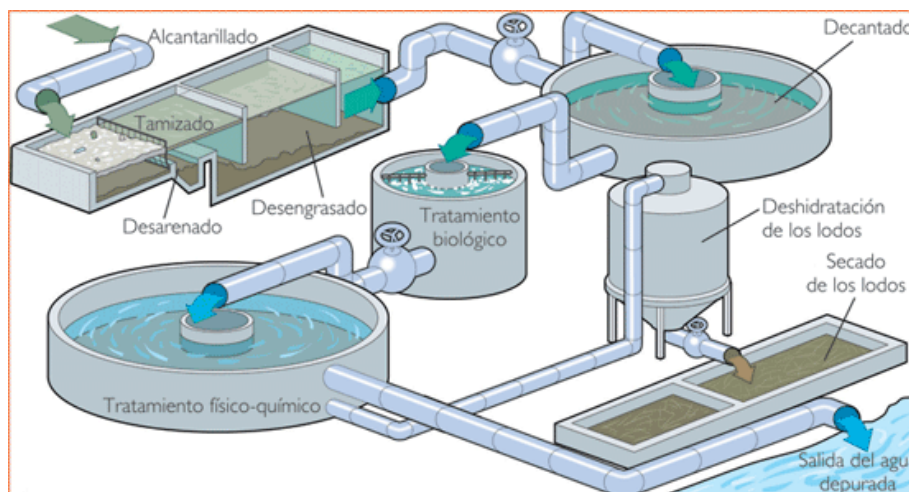


Figura 2-5 Procesos de tratamiento de aguas residuales

2.2.4 Tipos de microalgas y ámbito de aplicación

Se pueden diferenciar distintas poblaciones de fitoplancton que suelen aparecer en combinación con bacterias, formando biofilms de elevada actividad biológica. Estos cultivos están considerados de gran complejidad, ya que se trata de organismos vivos, y su supervivencia y funcionamiento depende de multitud de variables. En el artículo de *Kapoor, et al.* [12] se describe la importancia de controlar y predecir las interacciones entre células para avanzar en la biología sintética, también se discuten diversas

técnicas de co-cultivo, como usar líquidos comunes y sistemas de microfluidos, imitando ambientes naturales y aprovechando así los recursos aún no explotados. También se subraya el desafío de maximizar la información obtenida y validando los resultados de especies co-cultivadas con diferentes métodos.

Los cultivos de microalgas pueden clasificarse en dos grandes grupos, según su entorno de crecimiento, por lo que existen los cultivos: abiertos y cerrados. En este trabajo se ha realizado el estudio sobre cultivos cerrados, utilizando un vaso de precipitado de laboratorio y agua dulce, cultivando dos tipos de fitoplancton y observando su comportamiento durante el crecimiento. Algunos géneros como *Chlorella*, *Ankistrodesmus*, *Scenedesmus*, *Euglena*, *Chlamydomonas*, *Oscillatoria*, *Micractinium*, *Golenkinia*, *Phormidium*, *Botryococcus*, *Spirulina*, *Nitzschia*, *Navicula* y *Stigeoclonium*, han sido registradas en aguas residuales, también podemos encontrar en dichas aguas bacterias, virus y protozoos. Su presencia es indicadora de que las aguas están en contaminación fecal.

Un medio favorable para las microalgas es desfavorable para los microorganismos patógenos, ya que los fitopláctones una de sus características principales es la desinfección de aguas fecales. Este hecho puede deberse a cambios en el valor de pH es la principal causa, descontaminando hasta un 99,9% la salmonella y coliformes fecales [13]. Como se puede observar en la Tabla 2–1, dependiendo de la microalga que se tenga, se puede obtener una aplicación u otra en sectores tan diversos como la producción de energía, la alimentación o productos para la salud.

Microalga	Posible aplicación
<i>Chlorella spp</i>	Salud
	Aditivo alimentario
	Nutrición animal
	Cosméticos
	Biocombustible
<i>Dunaliella salina</i>	Betacarotenos
	Suplementos alimentarios
	Productos cosméticos
<i>Botryococcus braunii</i>	Biodiésel
<i>Spirulina platensis</i>	Productos farmacéuticos
	Nutrición humana
<i>Haemotococcus pluvialis</i>	Astaxantina
	Aditivo alimentario
	Productos farmacéuticos
<i>Arthrospira spp</i>	Carotenos
	Cosméticos
<i>Nannocloropsis spp</i>	Ácido ecosapentanoico
	Biodiésel

Tabla 2–1 Aplicaciones potenciales de diferentes géneros y especies de microalgas [14].

2.3 Problemática del fosfato en las aguas

Cuando nos referimos al fosfato en el agua, se está hablando de la presencia de sales y ácido fosfórico disueltos en ella. Son una parte muy importante del ciclo natural del fósforo y tienen un papel crítico en el ecosistema acuático, ya que el fósforo es un nutriente básico en la proliferación y desarrollo de las algas. Por otro lado, si dicho agua tiene una alta concentración de fosfato, es un indicador peligroso ya que se estaría tratando de eutrofización, esto es un proceso de un excesivo crecimiento de algas y plantas marinas, haciendo que la concentración de oxígeno disminuya considerablemente y a su vez disminuyendo la calidad del agua. El proceso de descomposición de algas y plantas muertas consume oxígeno disuelto en el agua, lo que provoca condiciones hipóxicas o anóxicas reduciendo las posibilidades de que otros organismos vivos puedan proliferar en dichas aguas. Una de las grandes consecuencias, es la reducción de la claridad en el agua, inhibiendo la fotosíntesis de plantas acuáticas [15].

La proliferación de algas, también conocidas por su término inglés *blooms*, representan un fenómeno natural, que, bajo ciertas condiciones, puede convertirse en un serio problema tanto para los ecosistemas acuáticos como para los humanos ya que algunas son tóxicas para el hombre (mareas rojas). Debido a que las algas se multiplican de manera muy rápida en la superficie del agua, identificable por manchas de colores intensos como verde, rojo o marrón, puede tener consecuencias muy perjudiciales debido a varios factores. La toxicidad, es uno de los impactos más alarmantes ya que algunas de las especies son altamente capaces de generar toxinas dañinas, llegando a poder ser mortales para mamíferos y organismos acuáticos. Otro de los impactos más preocupantes de las floraciones de aguas es el bloqueo de la luz ya que su capa densa de la superficie impide que la luz solar llegue al fondo impidiendo que alcance el zooplankton situado en los niveles más profundos. Estas plantas son esenciales para el mantenimiento del ecosistema acuático saludable, ya que son la base de la cadena alimenticia y contribuyen a la producción de oxígeno a través de la fotosíntesis. Es precisamente su capacidad de captación de las fuentes de fosfato lo que las hace idóneas para su tratamiento, en ambientes controlados, de forma que lo retiran de la disolución y lo incorporan a su propia estructura. Por estos motivos la gestión y tratamiento de aguas ricas en fosfatos es esencial para proteger los ecosistemas acuáticos y mantener la calidad del agua para su uso humano ambiental.

2.3.1 Tratamiento de aguas ricas en fosfatos

Hay diversas técnicas para una exitosa remoción del fosfato en el agua como, por ejemplo, el uso de biochar. Su uso como adsorbente para la remoción de fosfato de aguas residuales ha ganado popularidad debido a su alta eficiencia, su gran relación calidad-coste y su sostenibilidad. Otro método para la remoción son las tecnologías de membranas. La ósmosis inversa y la nanofiltración son cada vez más utilizados en plantas de tratamiento de aguas residuales, tratando el agua antes de su descarga, logrando así reducir considerablemente la concentración de fosfato. Se trata de un método muy eficaz y que, además, promueve el reúso del agua.

Para la medición de concentraciones de fosfatos hay diversos métodos. Entre los más habituales en los laboratorios, están los medidores portátiles de fosfato en muestras de agua. Estos dispositivos son altamente utilizados en el monitoreo ambiental, acuicultura y en el tratamiento de aguas residuales. Dentro de los equipos se pueden diferenciar medidores en función del rango de medida, ya sean de alto o bajo espectro.

Otro método utilizado para medir la concentración de fosfato en muestras de agua es a través de un espectrómetro UV/VIS en medidas realizadas en laboratorios. Son dispositivos analíticos avanzados usados para medir la absorbancia de la luz ultravioleta y visible de las muestras y así determinar la concentración de varios compuestos, entre ellos, el fosfato. Sus ámbitos de aplicación son laboratorios, controles de calidad y análisis ambientales gracias a su alta precisión, sensibilidad y versatilidad.

Los espectrómetros UV/VIS permiten realizar análisis cuantitativos mediante técnicas espectrofotométricas. En particular, la medición del fosfato consiste en la reacción del fósforo con una

disolución ácida que contiene molibdato de amonio, ácido ascórbico y una pequeña concentración de antimonio. Este reactivo reacciona rápidamente con el ion ortofosfato, obteniéndose como producto de reacción un compuesto de color azul que contiene fósforo y antimonio en una relación 1:1. El complejo formado es muy estable y se rige por la Ley de Lambert-Beer hasta una concentración de fosfato de, al menos, $2 \mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$. En las muestras, la concentración de fosfato se puede correlacionar con la intensidad en la coloración (medida por absorbancia a una longitud de onda específica).

La creciente concienciación ambiental en la sociedad en relación con el medioambiente y los perjuicios generados por la actividad agroganadera exigen de un esfuerzo investigador en nuevas tecnologías que reduzcan los riesgos asociados a dicha actividad. De ahí que disponer de herramientas que permitan, por un lado, reducir el contenido de fosfatos solubles en aguas residuales será clave para mejorar el medioambiente, evitando las consecuencias indeseables que produce en las aguas continentales.

2.4 Fabricación aditiva

2.4.1 Historia de la fabricación aditiva

La tecnología de impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, ha experimentado un notable crecimiento desde sus inicios en la década de los años 70, con la máquina de inyección con tinta. Uno de sus puntos de inflexión más notables en su creación fue cuando Chuck Hull creó la estereolitografía en 1986, fundando una de las empresas pioneras en este mundo, 3D Systems. En dicho año, se le concedió la patente 4.575.3030 titulada “*Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*” (Figura 2-6) [16], donde la idea principal siempre ha sido, primero, diseñar la pieza y, más adelante producir un prototipo de manera minuciosa.

United States Patent [19]		[11] Patent Number:	4,575,330
Hull		[45] Date of Patent:	Mar. 11, 1986
[54] APPARATUS FOR PRODUCTION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS BY STEREO LITHOGRAPHY	4,252,514 2/1981 Gates 425/162 4,288,861 9/1981 Swainson et al. 365/127 4,292,015 9/1981 Hritz 425/162 X 4,329,135 5/1982 Beck 425/174 4,333,165 6/1982 Swainson et al. 365/127 X 4,374,077 2/1983 Kerfeld 264/22 4,466,080 8/1984 Swainson et al. 365/127 X 4,471,470 9/1984 Swainson et al. 365/127		
[75] Inventor:	Charles W. Hull, Arcadia, Calif.		
[73] Assignee:	UVP, Inc., San Gabriel, Calif.		
[21] Appl. No.:	638,905		
[22] Filed:	Aug. 8, 1984		
[51] Int. Cl.⁴	B29D 11/00; G03C 00/00		
[52] U.S. Cl.	425/174.4; 425/174; 425/162; 264/22; 430/269; 156/58; 365/119; 365/120		
[58] Field of Search	425/162, 174, 174.4, 425/425; 264/22, 183, 40.1; 430/269; 156/38, 58, 275.5; 365/107, 119, 127		
		Primary Examiner—J. Howard Flint, Jr.	
		Attorney, Agent, or Firm—Fulwider, Patton, Rieber, Lee & Utecht	
		[57] ABSTRACT	
		A system for generating three-dimensional objects by creating a cross-sectional pattern of the object to be formed at a selected surface of a fluid medium capable	

Figura 2-6 Patente de “Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography”

Aunque Hull fue el pionero, y quien se llevó el reconocimiento de la creación, muy cerca de estas fechas, se inventó el Modelado por deposición fundida (FDM) de la mano de Scott Crump, patentando en el año 1989 “Stratasys Inc” [17]. Donde se creaba la figura pasando capa a capa y seleccionando qué material se necesitaba para dicha capa (Figura 2-7).

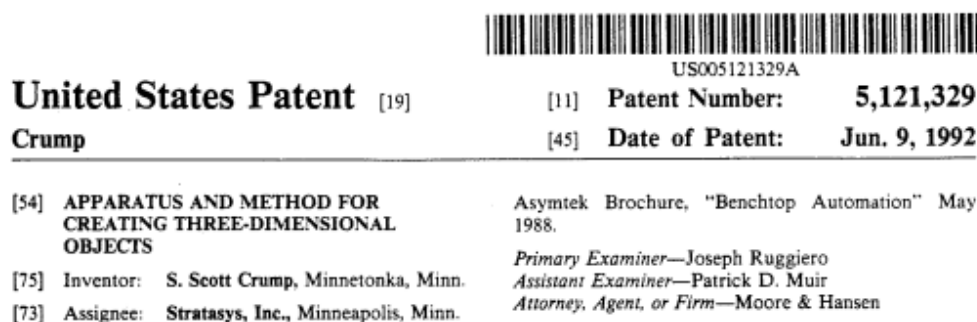


Figura 2-7 Patente de “Apparatus and method for creating three-dimensional objects” [17]

El continuo desarrollo en el mundo de la impresión 3D, ha hecho que actualmente dichas máquinas fabriquen piezas minuciosas y complejas con una fiabilidad inimaginable, tanto es así que, actualmente se utiliza para la creación de piezas fundamentales en ámbitos aeroespaciales, médicos o de construcción, entre otros.

2.4.2 Desafíos y tendencias futuras en impresión

Como dice el artículo *Henry A. Colorado et al.* [18] donde destaca que la fabricación aditiva, se ha convertido en una tecnología popular con una amplia gama de aplicaciones, particularmente en la producción de nanocompuestos con propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas controladas. Esta técnica utiliza una luz ultravioleta para curar capa a capa la resina líquida, permitiendo así la creación de objetos con geometría compleja y a su vez con gran detalle y excelente acabado. Dicho artículo abarca la fotopolimerización en cuba como la estereolitografía (SLA), discutiendo los recientes avances en los nuevos materiales utilizados, destacando la importancia de los nanorelentos. Destaca también que dicha técnica es muy útil para la impresión de figuras pequeñas y complejas, con necesidad de un acabado perfecto y un altísimo nivel de detalle, como son en industrias aeroespaciales, de defensa, automotriz o médica.

Esta tecnología ha sido impulsada en los últimos años gracias a la optimización del hardware, software y los materiales utilizados. Ahora son capaces de producir objetos complejos y funcionales a precios más reducidos y asequibles para el uso en pequeñas empresas, o particulares produciendo a pequeña escala.

En el ámbito académico, se están estudiando hoy en día nuevas técnicas de impresión 3D. Actualmente se distinguen los siguientes grandes grupos de impresión: *SLA* (estereolitografía), *SLS* (Fusión por láser selectivo), *SLM* (Fusión selectiva por láser de metal), muy parecido al *SLS*, diferenciándose de este en que utiliza polvos de metal en vez de polvos de polímeros; *FDM* (deposición de material fundido), *DMLS* (sinterizado directo de metal por láser y, *LCD* (impresión 3D a base de resina) [19].

Este tipo de impresoras tiene un alto rango de aplicaciones, en diferentes industrias. Algunas de estas aplicaciones son el prototipado rápido, en industrias como la automotriz o aeroespacial, ya que permite realizar pruebas de diseño antes de su producción en masa. En la industria médica, se utiliza dicha impresión para modelos de planificación quirúrgica o incluso para la creación de prótesis personalizadas. Se puede encontrar en diversos ámbitos como la educación o arquitectura con la creación de maquetas y prototipos de modelos con detalles muy precisos como se requieren en este tipo de sector [20].

Pero dicho modo de impresión también tiene desafíos y aspectos a mejorar debido a sus limitaciones, como su precio de impresión, ya que los fotopolímeros son bastante más caros que muchos otros tipos de filamentos utilizados en la industria de la impresión en tres dimensiones. Un aspecto que limita en cierta manera a dicho método de impresión es el tamaño de impresión, que es bastante limitado ya que su base de creación de modelos es de 30 cm y no se pueden hacer de mayor tamaño. La sensibilidad a la luz ultravioleta limita el uso de dicho método en lugares donde incida directamente la luz solar. Por

último, sus propiedades mecánicas, son excelentes, aunque no son tan resistentes o duraderos como en otras impresoras 3D.

Nos encontramos en un entorno cambiante, volátil, complejo e incierto. Pero lo que se sabe, es que la tecnología de la impresión 3D está en auge y mejorando exponencial y constantemente. En cuanto, a las tendencias futuras de este método, se puede destacar en la mejoría de la velocidad de impresión, mejorando así, su eficiencia. Así como optimizar su tamaño de construcción y mejora de resolución. Por otro lado, se espera que se desarrollen sistemas de impresión SLA más automatizado, con capacidad de monitorizar a remoto [21].

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

Se indican a continuación los materiales usados en el proyecto.

3.1.1 Resina

La resina utilizada para la investigación es “*Plant-Based Resin*”, una resina UV a base de plantas de la marca “*Anycubic*®” [22]. Esta marca destaca por su gran compromiso con la sostenibilidad, siendo una interesante alternativa ecológica (ya que no solo es segura y amigable con el medio ambiente, sino que también ofrece una impresionante calidad de impresión) a las resinas tradicionales fotopolímeras.

- Características Principales [23]:
 - Composición: está fabricada principalmente con aceite de soja, es biodegradable y baja emisión de olores en la impresión.
 - Propiedades: muestra una resistencia a la flexión de entre 59 y 70 MPa; y de extensión de 36 a 52 MPa, mientras que su elongación de ruptura es de entre 11 al 20%.
 - Compatibilidad y uso: es ideal para impresoras 3D que utilizan la luz UV (entre 355-410 nm). Es utilizada principalmente para modelos detallados y en miniatura.
- Ventajas [24]:
 - Ecológica: derivada de vegetales, reduce significativamente el impacto ambiental.
 - Menos olorosa: baja emisión de olores mejora la experiencia de impresión, siendo menos dañina y más agradable trabajar con ella.
 - Detalles precisos: capaz de capturar hasta el mayor de los detalles.
 - Seguridad: cumple con la norma EN71-3:2013 de la EU.
- Desventajas:
 - Durabilidad de color: la resina transparente es más frágil que la de las resinas tradicionales, volviéndose de un tono más amarillo con el tiempo.
 - Limpieza post-impresión: el proceso inicial requiere un baño químico.

3.1.2 Impresora 3D

En dicho apartado se ha utilizado una impresora de la gama “*Elegoo Mars*®”, más concretamente la impresora “*Elegoo Mars 3 Pro 4K*®”. La marca original marcó un hito importante al ofrecer una impresora 3D de resina que combinaba un precio asequible con una excelente calidad y rendimiento. El modelo 3 pro 4K, mejora bastante a su anterior modelo con su pantalla LCD 4K monocromática de 6,6 pulgadas, lo que le permite cumplir con los requisitos de la calidad y resolución con una XY de 0,035mm. Su volumen de construcción es de 143 x 89,6 x 175 mm, proporcionando así un espacio más que

suficiente para elaborar las tareas para las que se ha creado esta impresora. Su velocidad de impresión oscila entre 30-50 mm/h, con un bajo consumo de energía, lo que produce una mayor vida útil. También destaca el uso de película de liberación PFA, que está diseñada para reducir la adhesión entre la pieza impresa y la película durante la impresión, contribuye a que sea más silenciosa, destacar su purificador de aire integrado, la mejora de su interfaz de usuario y el software demuestran que Elegoo es uno de los mejores recursos [25].

3.2 Programas utilizados

3.2.1 Autodesk Inventor®: pilar en el modelado CAD en 3D

El software de diseño *Autodesk Inventor*® [26] para modelado de estructuras CAD en 3D, se ha posicionado como referente en su ámbito de aplicación. Ampliamente utilizado en ingenierías y diseños de productos, con gran eficiencia y precisión. Un pilar fundamental de la fabricación aditiva y su valor radica en la capacidad de transformar diseños digitales con fidelidad los modelos propuestos. Entre sus atributos más notables destacar su gran interfaz intuitiva, su amplio rango personalizado [27].

Autodesk Inventor fue lanzado por primera vez el 20 de septiembre de 1999. Este ha sido el mayor paso en la evolución del software del diseño de modelado 3D. Anteriormente se llamaba *Designer*®, ofreciendo en la actualidad una mayor visión general de la visualización y simulación de los productos. Gracias a esto se permite poder llegar a unos niveles de detalles, exactitud y mejoría jamás pensado. El aprendizaje de dibujo técnico es una característica muy importante que nombrar, ya que como *Samsudi et al.* [28] investigaron la influencia que tenía dicho software en el aprendizaje del dibujo técnico más tradicional. No solo se ha demostrado una mayor eficiencia y precisión, sino que también enriquece la experiencia de aprendizaje de los estudiantes a través del uso de dichos programas CAD.

Este software tiene gran interoperabilidad, facilitando de esta manera la importación y exportación de archivos desde y hacia otros softwares de manera muy simple y ayudando así al flujo de trabajo. Este programa ofrece una herramienta avanzada para la simulación de esfuerzos y deformaciones, permitiendo así optimizar el diseño de pequeñas piezas previo a su fabricación. Gracias a *iLogic*, este software tiene la posibilidad de personalizar y automatizar tareas de repetición en el diseño de piezas.

3.2.2 CHITUBOX®

Chitubox® [29] es un software en 2024 altamente reconocido en el mundo de la impresión 3D gracias a sus grandes prestaciones para la impresión de la tecnología de estereolitografía (SLA) en la fabricación aditiva. Su principal función es convertir los modelos en instrucciones para la impresora y que esta pueda ejecutarla e imprimirla. Como características se pueden destacar, su interfaz intuitiva, fácil tanto para usuarios principiantes como avanzados; otra ventaja a destacar es su gran variedad de ajustes personalizables, ya que permite ajustar parámetros muy específicos, como la altura de la capa, tiempo de curado o incluso su exposición. Un gran punto a favor es su compatibilidad y versatilidad, ya que se puede usar con una gran variedad de modelos de impresoras 3D. Por último, se puede visualizar las capas de los modelos previamente a la impresión, así pudiendo corregir posibles errores antes de realizarlos, ahorrando así tiempo, material y dinero.

3.3 Métodos

En la presente investigación, el enfoque se inicia con el diseño de modelos tridimensionales que luego se materializan mediante procesos de fabricación aditiva. Posteriormente, se prepara un cultivo de microalgas bajo condiciones controladas en el laboratorio. Una vez establecido, las estructuras impresas en 3D se introducen en el medio acuático con las microalgas para evaluar la capacidad de estas últimas para adherirse a las superficies creadas. La última etapa de la investigación introduce una novedad completa: el uso de impresión directa para aplicar una solución compuesta por resina y una dosis específica de espirulina. Las dos fases de la evaluación crítica tratarán, en primer lugar, si es probable que la estructura pueda fabricarse bajo las condiciones únicas especificadas; en segundo lugar,

considerará si, dentro de la mezcla de resina, las microalgas que contiene permanecen viables y efectivas en sus capacidades de limpieza. Se trata, por lo tanto, de un enfoque interdisciplinar que no solo desafía los límites tradicionales de la ingeniería con la biotecnología, sino que también abre nuevas vías para la aplicación de soluciones sostenibles en el tratamiento y mejora de la calidad del agua.

3.3.1 Realización de piezas

En primer lugar, se han realizado unas figuras con el software *Autodesk Inventor*® (Figura 3-1), para seguidamente exportarlo a formato CAD, concretamente a .stl, que es el formato compatible con el programa de impresión *Chitubox*®. Con el objetivo de obtener piezas de diferentes geometrías, pero manteniendo el tamaño en todas las figuras. Se han creado un total de tres figuras incluyendo el diseño y la especificación de parámetros de impresión. Además, para completar el estudio, se han tomado de repositorios abiertos otras cuatro piezas de diferente geometría, con el objetivo de aumentar el banco de estudios y la extracción de conclusiones.

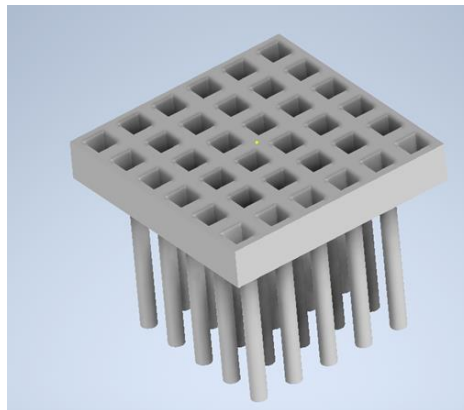


Figura 3-1 Prototipo de la pieza “Batea cuadrada”

En la Figura 3-1 se ha querido recrear a pequeña escala, la forma y objetivo de las famosas bateas gallegas para, de forma similar, favorecer el crecimiento de las microalgas. Se trata de una estructura simple y con espacios para que los propios fitoplánctones puedan adherirse en las partes menos accesibles de la estructura y no solo en su exterior. Se trata de una figura que, si su eliminación de fosfatos fuese positiva, podría dedicarse al tratamiento de aguas superficiales.

La Figura 3-2 recrea una estructura donde las microalgas se puedan posar en las diversas baldas horizontales de los diferentes niveles intentando así facilitar que las microalgas puedan proliferar de manera rápida y más fácil. El objetivo es dotar a la pieza de mayor superficie para incrementar la cantidad de biomasa.

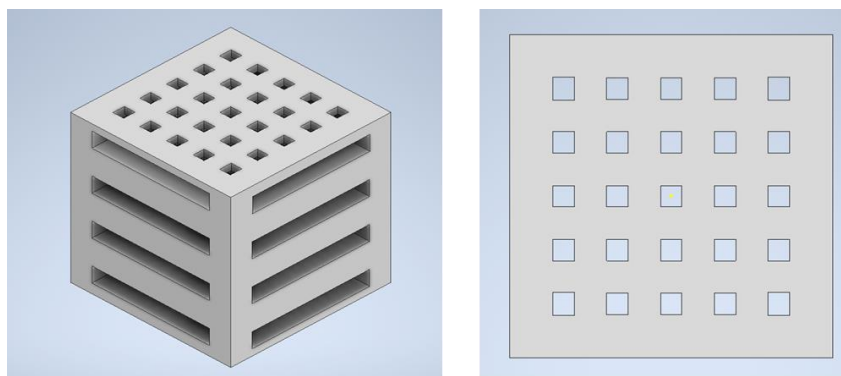


Figura 3-2 Prototipo de la Figura “Rubik”

La Figura 3-3 mostrada, se ha querido recrear una variante de la Figura 3-1, dejando más superficie de contacto en su parte superior facilitando así que se adhirieran los fitoplánctones. Como se quiere

demostrar más adelante de que la geometría es un parámetro influyente, se quiere comprobar con las diversas geometrías ensayadas qué forma es la más idónea para la proliferación de microalgas.

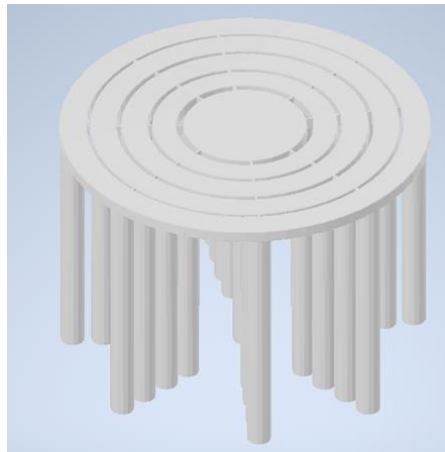


Figura 3-3 Prototipo de la figura “Batea circular”

Para continuar el proyecto, es necesario exportar los documentos a formato CAD, concretamente a .stl para así poder abrirlo en el slicer *Chitubox®* y poder imprimirlo posteriormente.

3.3.2 Impresión de las piezas

Chitubox® es un software de utilización intuitiva y sencilla, ya que recrea la base de la impresora y se puede organizar la impresión de manera fácil. Para la impresión se ha realizado una distribución de seis figuras repartidas a lo largo del soporte de manera simétrica. Con las herramientas de la parte izquierda se puede mover y girar la figura para obtener la configuración deseada como la Figura 3-4.

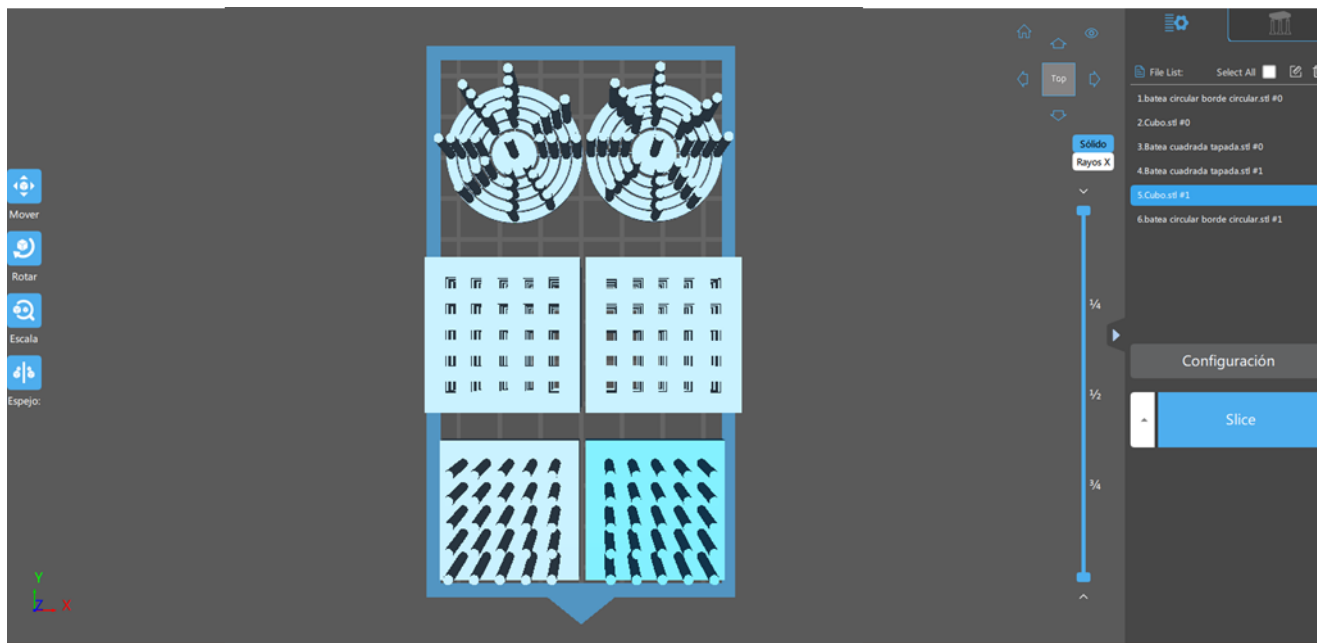


Figura 3-4 Distribución de la primera impresión realizada

Para optimizar el proceso se aprovecha el máximo espacio posible realizando el mayor número de piezas impresas en cada sesión. Una vez se tiene la distribución óptima se comienza el proceso del modelo 3D en una serie de capas mediante el comando *Slice*. Se configura para la impresora en la que se desea imprimir y el tipo de resina utilizado. Automáticamente el software da una estimación de tiempo de impresión y el peso de la pieza final (Figura 3-5).

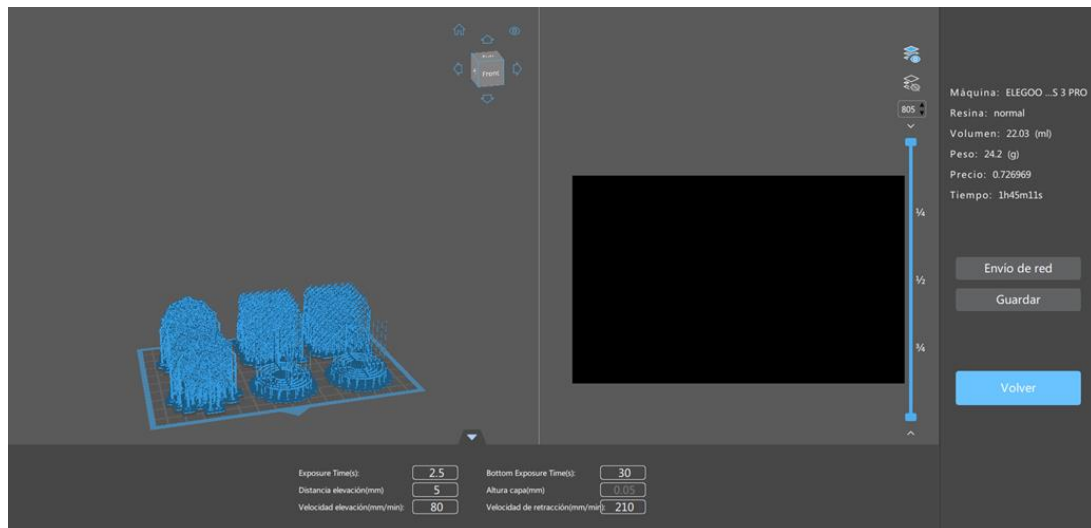


Figura 3-5 Captura de la aplicación Chitubox® antes de imprimir

Una vez se termine el proceso de impresión (Figura 3-6), se retiran las piezas de la base de la impresora junto con los soportes de la propia pieza, se limpian en alcohol 99° para eliminar los restos que pudieran interferir en los ensayos que pudiera realizar y se dejan curar.



Figura 3-6 Proceso final de una impresión

3.3.3 Cultivo de Microalgas

A la vez que se ha realizado el proceso de impresión de las figuras, se realiza por otro lado, un cultivo de microalgas. En la Figura 3-7 se puede observar una foto del primer día del cultivo, en la que se aprecia el recipiente que se utiliza durante toda la investigación; así como, la luz led y la aireación empleada en el trabajo. Dicha aireación se mantuvo 24 horas al día, mientras que con las luces iluminación se programó un fotoperíodo 8:16 (8 horas apagadas y 16 horas encendidas) durante todo el proyecto. A su vez se alimentaban con una pequeña dosis de suplemento semanal de macro y micronutrientes.

Durante aproximadamente dos meses, se lleva a cabo el mismo procedimiento todos los días hasta que finalmente se tiene una abundante cantidad de microalgas para realizar el estudio que se desea. Cuando ya se tiene un cultivo considerable de fitoplancton, se procede a introducir las piezas fabricadas en el interior del depósito y se dejan durante dos semanas para que las microalgas puedan adherirse a ellas y así, proliferar de manera correcta y eficaz. Cabe destacar la complicación del mantenimiento de un cultivo de microalgas, muy sensible a los parámetros ambientales que puedan afectar a su crecimiento.

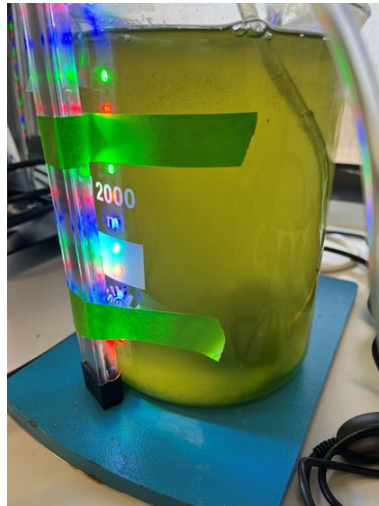


Figura 3-7 Cultivo de microalgas (semana 1)

3.3.4 Creación de figuras con microalgas

La última parte de este proyecto consiste en fabricar las estructuras directamente con microalgas secas diluidas en la resina. Para asegurar la homogeneidad de las piezas y no introducir variables no controladas en el proceso (tales como composición o tamaño de partícula) se empleó un alga comercial, que asegura la reproducibilidad del proceso. El porcentaje inicial de alga ensayado fue de un 0,5% y se fue aumentando progresivamente, siempre que la impresión anterior fuese exitosa. Así, el porcentaje máximo ensayado alcanzó el 2% de alga, no ensayando concentraciones superiores al obtenerse resultados satisfactorios respecto al fosfato. En los primeros ensayos la cantidad total de resina para la impresión es de 60 g, por lo que la mezcla que se le introduce de espirulina es de 0,3g. Posteriormente se disuelve con ayuda de un agitador magnético y se deja en agitación durante 20 minutos, manteniéndolo cubierto para que no sufra alteraciones en contacto con la luz solar. Cuando se tiene la disolución, se realiza la impresión 3D de las figuras descritas anteriormente. Se imprimen dos estructuras diferentes, cada estructura se imprime dos veces por diferente concentración (Figura 3-8).

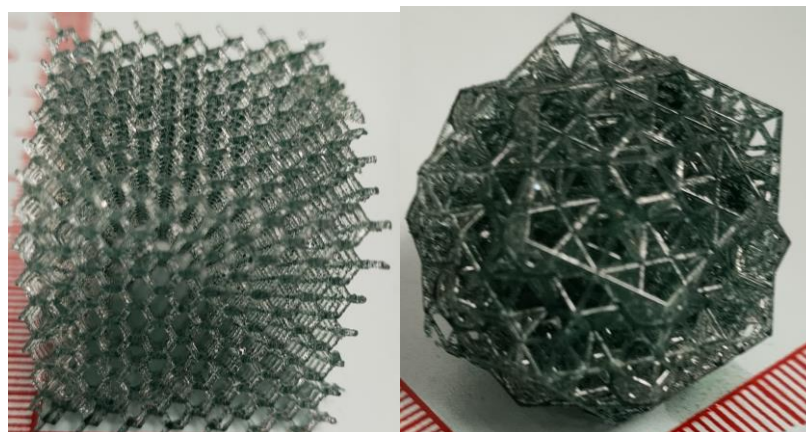


Figura 3-8 impresas con disolución de espirulina

3.4 Proceso de análisis de datos

3.4.1 Estudio de niveles de fosfatos

Para el estudio de los resultados se pusieron en contacto las piezas impresas, por duplicado, con una disolución de 10 mg/L de fosfato, en un agitador orbital, durante tiempos variables, que varían entre 1 y

3 días. Para la determinación de fosfatos se utiliza la reacción del ion fosfato con el molibdato amónico, produciéndose ácido fosfomolibdico. Posteriormente, éste por la acción del cloruro de estaño (II) se reduce a azul de molibdeno (Mo^{+3}) que, como su nombre indica, posee una coloración azul intensa que es directamente proporcional a la concentración de ion fosfato presente en el agua. La luz absorbida por la disolución se mide en un espectrofotómetro a 690 nm con referencia a un blanco de agua destilada.

Para el estudio de resultados, a cada tubo de ensayo con las muestras se le añade 1 mL de reactivo A y se agita y luego se le añaden 6 gotas de reactivo B y se vuelve a agitar. Luego se llena una cubeta del espectrofotómetro, se introduce en el aparato y se realizan los ajustes correspondientes [30].

4 RESULTADOS

4.1 Diseño, fabricación e impresión de andamiajes para la proliferación de microalgas

En este trabajo se han realizado diversas impresiones, de diferentes formas y estructuras para poder deducir la configuración óptima. A las impresiones se les ha puesto un nombre de referencia que a continuación se podrán ver junto a su diseño. Las dimensiones de las figuras son de un máximo de 3 cm de alto y 3 cm de ancho.

4.1.1 Primer diseño:

Se ha nombrado como “Batea Cuadrada”. Su forma se ha cogido para hacer una recreación de las bateas marinas a pequeña escala (Figura 4-1). Dejando tanto superficie de contacto para que puedan crecer las microalgas, como espacios para que pueda correr la corriente. Las primeras tres imágenes que se observan son del software *Autodesk Inventor*®, las siguientes tres son el resultado de la impresión 3D (Figura 4-2). Se puede observar que el acabado es parecido al prototipo y cumple las prestaciones que se buscan.

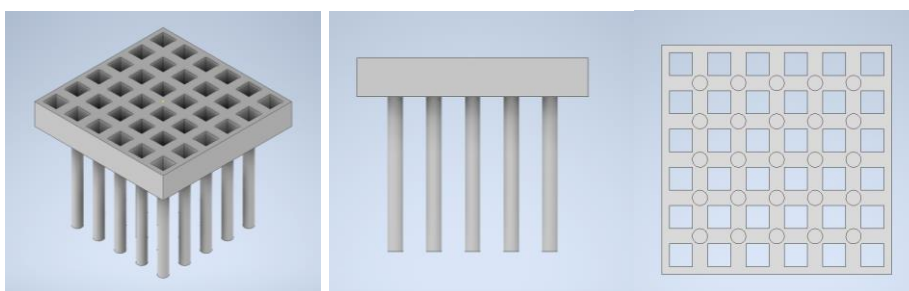


Figura 4-1 Prototipo de la batea cuadrada en *Autodesk Inventor*®. Autoría propia

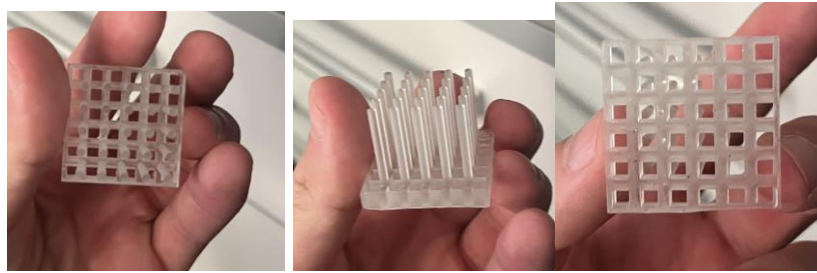


Figura 4-2 Resultado final de la batea cuadrada. Autoría propia.

4.1.2 Segundo diseño:

Se ha nombrado como “Batea Circular” (Figura 4-3). Al igual que el diseño anterior, se ha mantenido la esencia de la tradicional batea, con sus patas y sus espacios entre filas, pero esta vez la estructura se ha realizado de manera circular.

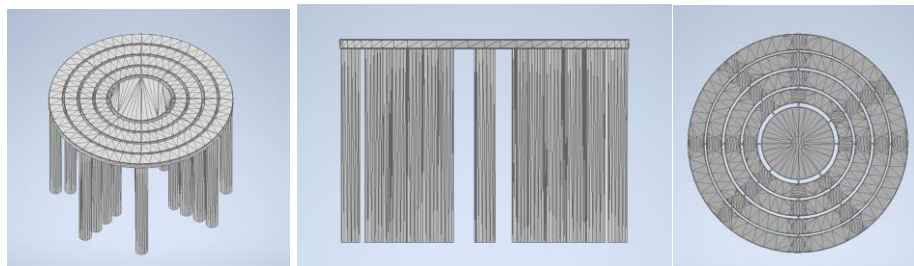


Figura 4-3 Prototipo de la batea circular en Autodesk Inventor®. Autoría propia

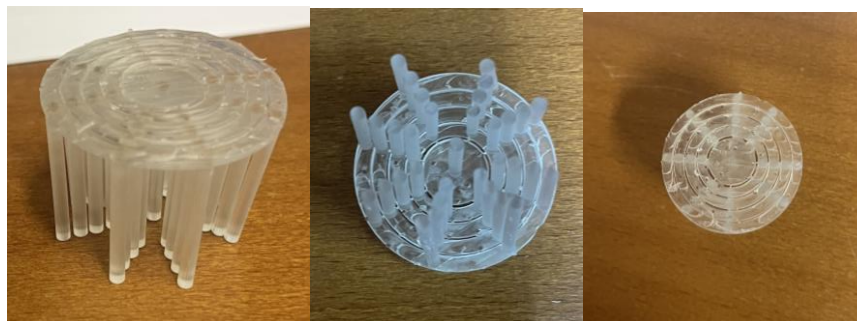


Figura 4-4 Resultado final de la batea circular. Autoría propia.

Como se puede comprobar, las figuras se han impreso sin ningún problema, con un gran acabado y con grandes prestaciones (Figura 4-4).

4.1.3 Tercera figura:

Se ha nombrado como “Rubik”. Esta figura también está basada en la estructura principal de una batea, pero en este caso se le ha querido poner más superficie de contacto por lo que se le han puesto cinco pisos simétricos siendo de menor grosor los pisos superior e inferior.

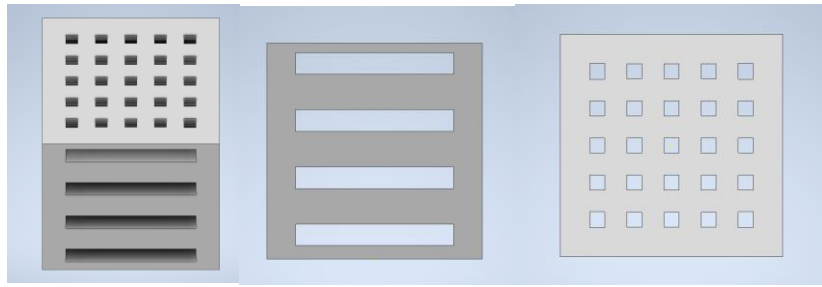


Figura 4-5 Prototipo de la figura “Rubik” en Autodesk Inventor®. Autoría propia

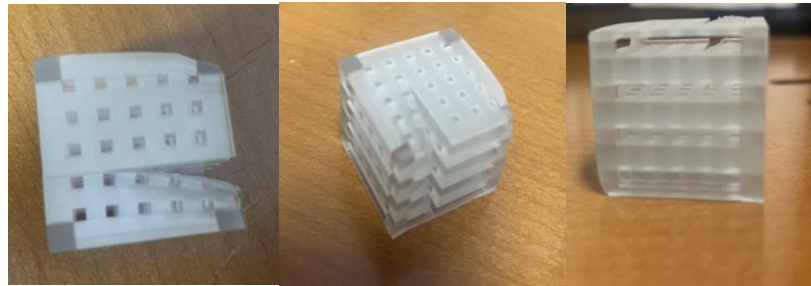


Figura 4-6 Resultado final de la figura Rubik. Autoría propia.

Esta figura como se puede observar, en su diseño inicial, una figura compacta y con mucha superficie para que las microalgas puedan proliferar en ella, pero a la hora de la impresión es una figura que ha generado ciertos inconvenientes. Se ha impreso con una resina flexible y con soportes internos que han dificultado su extracción (dada su geometría), motivo por el cual esta es una de las geometrías que ha generado mayor porcentaje de errores de impresión.

4.1.4 Cuarto diseño:

Se le ha puesto el nombre de “Pelota”, se trata de un diseño tomado de bases de datos de código abierto (Figura 4-7). Es una figura esférica con forma esférica. Es una fina capa que forma óvalos irregulares por toda su superficie. Es una figura frágil y ha resultado difícil de producir debido a que, a la hora de quitar sus soportes, alguna de las figuras se ha acabado rompiendo.

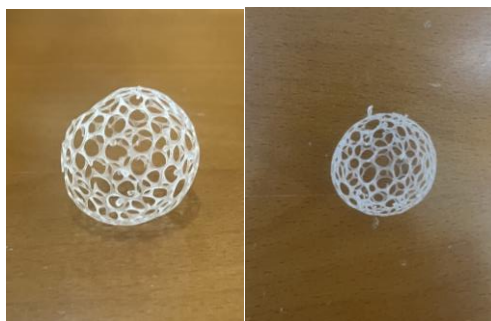


Figura 4-7 Resultado final de la figura Pelota. Autoría propia.

Al tratarse de una figura tan frágil y al tener muchos soportes para asegurar la correcta impresión, el acabado de esta pieza aparece con irregularidades, pero, teniendo en cuenta la finalidad en la que se empleará, las imperfecciones en el acabado no se consideran como un inconveniente.

4.1.5 Quinto diseño:

A esta pieza se la ha llamado “Cuadrada” (Figura 4-8). Se trata de un cubo complejo y simétrico lleno de finas raíces, dejando un espacio limitado en su interior para el crecimiento interno de las microalgas, pero a su vez dejando una gran superficie exterior para facilitar su asentamiento.

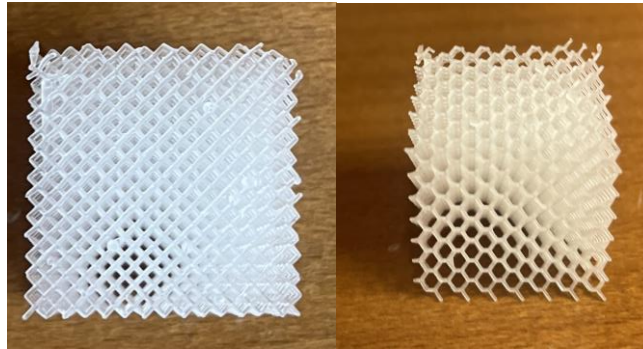


Figura 4-8 Resultado final de la figura Cuadrada. Autoría propia

El resultado final de impresión es óptimo, siendo además fácil de quitar los soportes sin dañar la pieza.

4.1.6 Sexto diseño:

Esta pieza (Figura 4-9) se ha llamado “Flor”. Esto es debido a su llamativo cuerpo geométrico, regular y complejo. Está repleta de filamentos de resina en su interior, pero dejando espacio para que se pueda introducir en ella el agua y, por ende, las microalgas. Tiene mucha superficie de contacto para que puedan proliferar en ella los fitopláctones.

El resultado es una pieza muy compacta, bien definida y con gran detalle en su finalización.

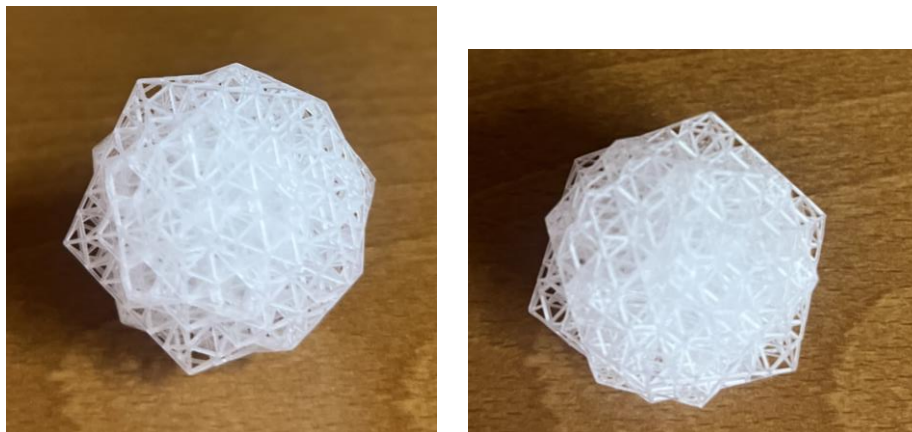


Figura 4-9 Resultado final de la figura Flor. Autoría propia

4.1.7 Séptimo diseño:

Se le ha concedido el nombre de “Mandala” (Figura 4-10). Es una figura circular y vacía por dentro. Se le ha puesto este nombre debido a la forma que tiene en su parte superior e inferior. Aunque es una figura hueca, es muy compacta y resistente con gran nivel de detalles.

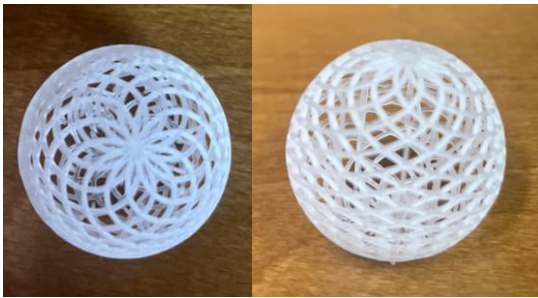


Figura 4-10 Resultado final de la figura Mandala. Autoría propia

Como se puede ver en la figura con acabado excelente, pero con poca superficie de contacto para la proliferación de microalgas.

4.1.8 Octavo diseño:

Con el nombre de “Colchón” se trata de la figura más minimalista (Figura 4-11), más baja de todas y consiste en diversas esferas con boquetes en su interior, teniendo así superficie para el paso del agua y superficie de contacto para el desarrollo de las microalgas.

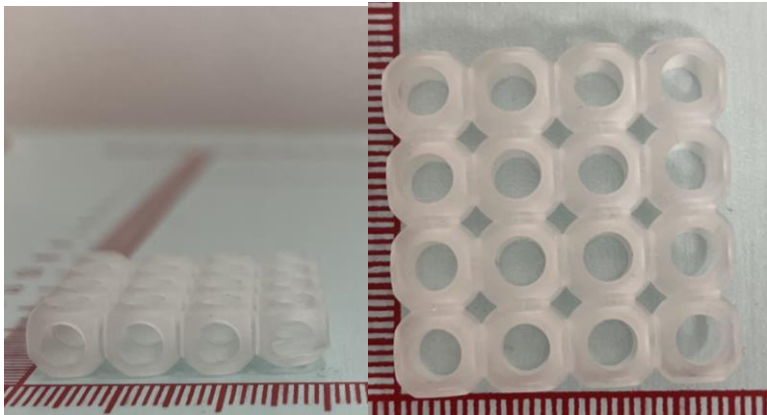


Figura 4-11 Resultado final de la figura Colchón. Autoría propia

La siguiente tabla presenta un resumen de los diseños realizados (Tabla 4–1):

Figura	Imagen	Nº Réplicas
Batea cuadrada		5

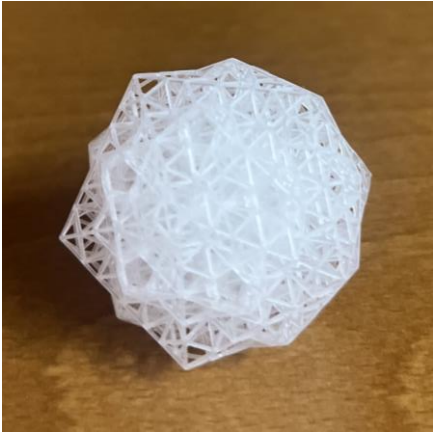
Figura	Imagen	Nº Réplicas
Batea circular		5
Rubik		5
Pelota		5
Cuadrada		5
Flor		3

Figura	Imagen	Nº Réplicas
Mandala		3
Colchón		3

Tabla 4-1 Tabla resumen de las figuras

4.2 Cultivo de microalgas

Otro objetivo era lograr un cultivo de microalgas en el laboratorio. Con un control exhausto, en donde se le alimentaba dos veces por semana, se le encendía la luz durante 16 horas y se apaga durante 8 horas, se le cambiaba cierta parte del agua y además tenía un sistema de aireación (Figura 4-12).

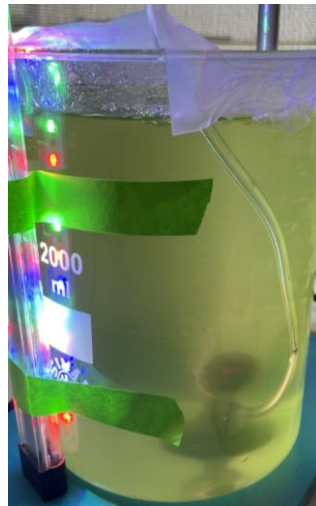


Figura 4-12 Cultivo de microalgas, primer día

Después de un mes de continuo crecimiento el cultivo de microalgas proliferó adecuadamente, tomando un color menos intenso, como se puede observar en la Figura 4-13.

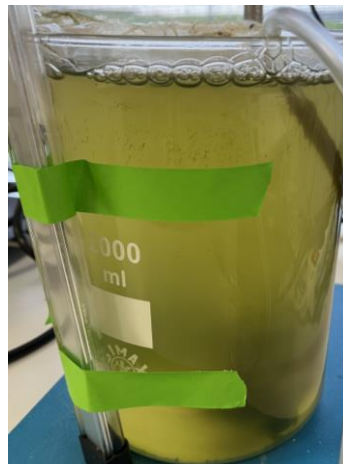


Figura 4-13 Cultivo de microalgas en la semana 5

Una vez se tiene una cantidad suficiente de fitoplancton en el recipiente, se ponen las estructuras en contacto con las microalgas, esto sucede en la semana 5. Durante la semana seis se retiran las primeras 8 estructuras que se estudiaron, y se dejaron los 4 restantes para sacarlas a los 28 días, a final de la semana 9.

4.3 Resultados del estudio realizado en las estructuras pasadas 7 días en microalgas

Una vez se tienen identificadas e impresas las piezas se comienzan a hacer los experimentos con fosfato. En primer lugar, cabe remarcar, que estas ocho figuras se han fabricado con un 100% de resina. Se introdujeron en el agua con microalgas y se dejaron en ella durante un total de 7 días. Una vez se finalizó el período, se sacaron y se agitaron con una disolución de fosfato durante 24 horas. Al día siguiente con espectrofotómetro UV-VIS se obtuvieron los siguientes resultados.

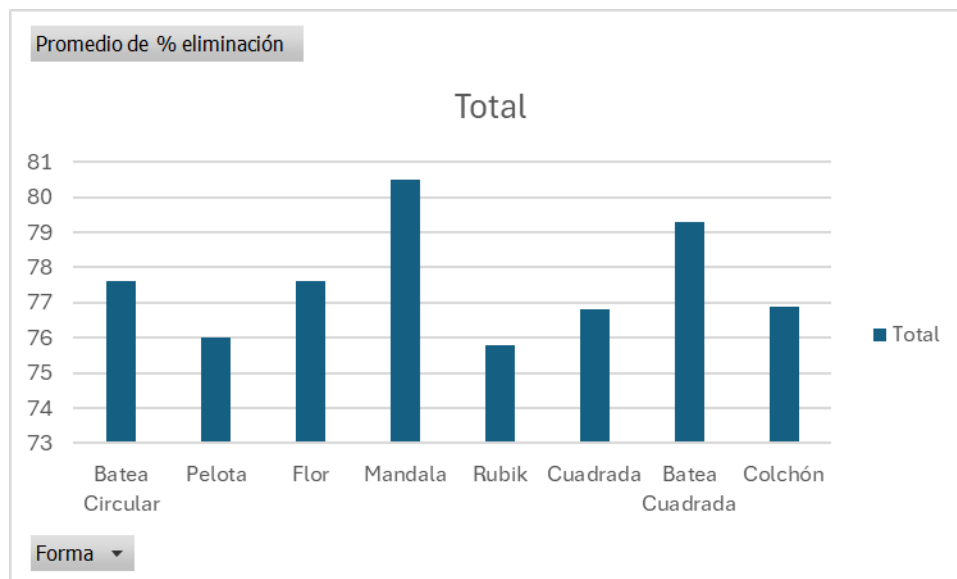


Figura 4-14 promedio de % de fosfato eliminado, pasados 7 días.

Se ha realizado una tabla dinámica en *Excel* con todos los resultados de eliminación obtenidos en el laboratorio. Dando los resultados de la Figura 4-14. Con estas variables: 7 días en contacto con microalgas, 1 día en contacto con fosfato y lavadas en alcohol, se ha obtenido que, en pocos días en contacto con las algas, ha conseguido un mejor resultado ha sido la Figura “Mandala” (Figura 4-10) con un 80,5% de eliminación, lo que supone un 2,94% más que el promedio total y un 4,7% más que el

eliminado por la figura “Rubik” (Figura 4-6) mientras que el resto de las figuras se mantienen en promedios muy similares.

En la Figura 4-15 se puede observar como las figuras empiezan a tener cierto color debido al contacto con los fitopláctones.

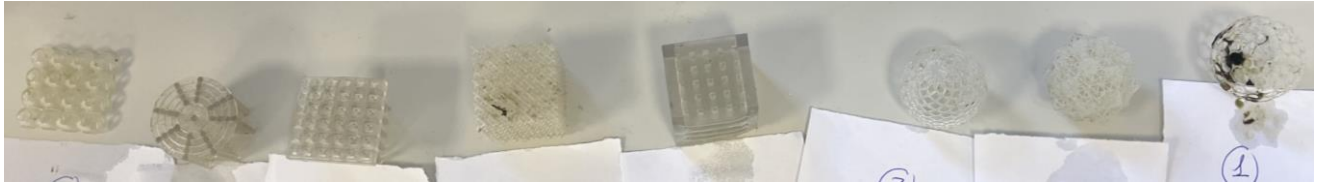


Figura 4-15 Después de estar 7 días en contacto con microalgas

4.4 Resultados del estudio realizado en las estructuras pasadas 28 días en microalgas

El siguiente experimento consistió en meter 4 figuras en el mismo recipiente con las mismas microalgas, pero esta vez se dejarán 28 días, para así poder ver si los fitopláctones se introducen en el interior, y si tienen un mayor impacto en el % de eliminación. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 4-16.

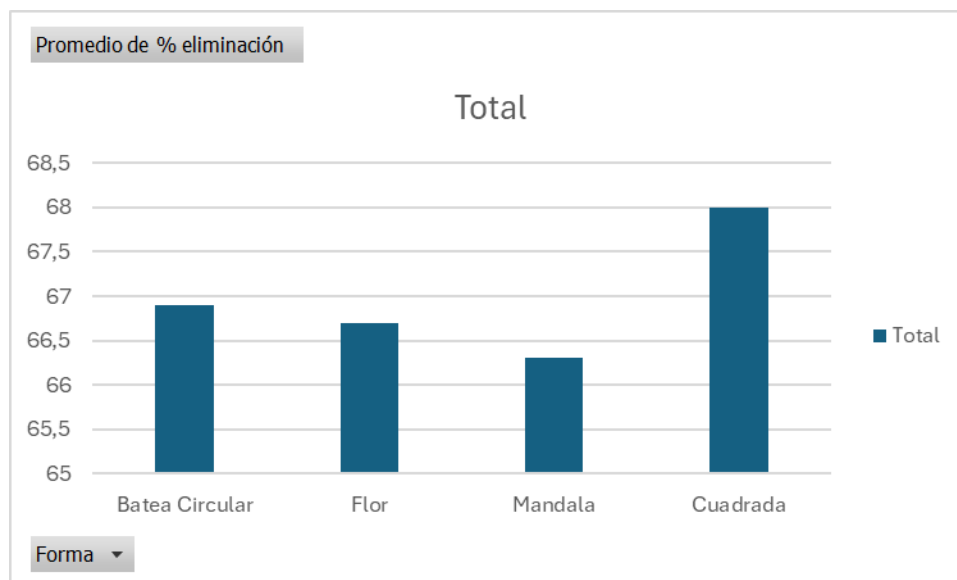


Figura 4-16 Gráfica del promedio de % eliminado, pasados 28 días.

Para este experimento, el dato más relevante y diferente al apartado anterior es el número de días que ha estado en contacto con las microalgas. Una vez pasado el tiempo de contacto con las microalgas, procedemos a realizar el mismo procedimiento que en el anterior caso. En este caso la mejor figura es la Cuadrada (Figura 4-8). La figura Cuadrada tiene un 68% de eliminación, siendo un 1,3% más que la que menos eficacia tiene. Aunque cabe destacar que la diferencia entre todas es mínima ya que el promedio de eliminación es de 66,9%.



Figura 4-17 después de 28 días en contacto con las microalgas

Como se puede observar en la Figura 4-17, se puede comprobar visualmente como la resina es apta para que los fitoplánctones puedan proliferar en ella, ya que están repletas de microalgas.

4.5 Resultados del estudio realizado en estructuras con un 0,5% de espirulina

Una vez se ha realizado el estudio principal, el siguiente estudio será comprobar si imprimiendo directamente una mezcla de resina con espirulina seca, esta es capaz de sobrevivir a las adversas condiciones de impresión. Para este estudio se han cogido dos estructuras que son la Flor (Figura 4-9) y la Cuadrada (Figura 4-8) debido a que son las que mejor resultado han tenido en la impresión anterior. Para ello se van a exponer el resultado de las figuras impresas con microalgas secas:

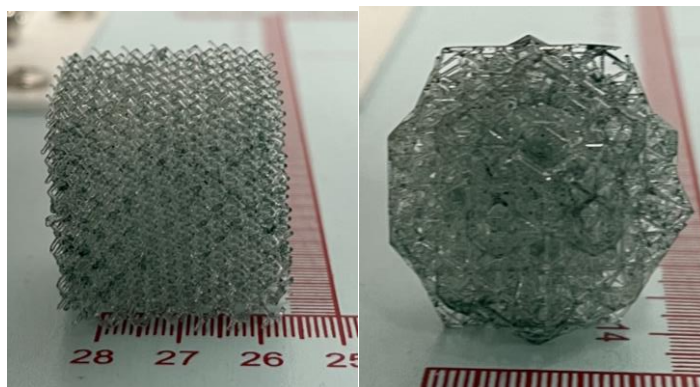


Figura 4-18 impresas con 0,5% de espirulina y sin lavar en alcohol

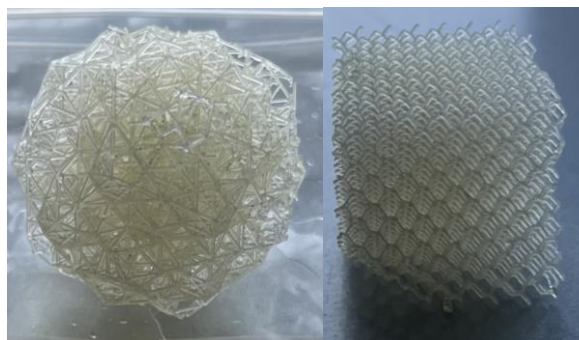


Figura 4-19 impresas con 0,5% de espirulina y lavadas en alcohol

La Figura 4-18 y Figura 4-19 a simple vista se pueden comparar y se nota el hecho de limpiarlos o no en alcohol, cambia el color de las figuras, teniendo un color más intenso las figuras sin limpiar. También antes de empezar con el análisis de resultados, comentar el gran acabado que tienen las figuras implementando en la resina al 0,5% de microalgas.

– Experimento 1:

Para continuar el experimento, los parámetros que van a variar son si están lavados en alcohol o no y los días en contacto con fosfato. Los resultados del primer estudio, que es lavado y un día en contacto con fosfato se pueden ver en la Figura 4-20.

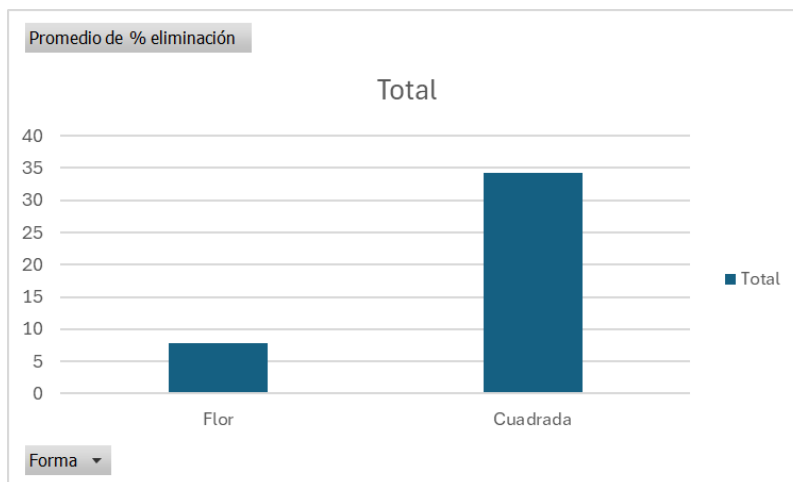


Figura 4-20 del promedio de % eliminado, con un 0,5% de espirulina y lavado

La gráfica da como resultado que la figura Cuadrada tiene un 34,3% de eliminación frente al 7,8% que tiene la figura Flor. Es decir que la figura Cuadrada tiene un 26,5% más de poder de eliminación que la Flor.

– Experimento 2:

A continuación, se realizó el mismo procedimiento, pero esta vez para las figuras sin lavar en alcohol, y un día en contacto con el fosfato. Se obtiene esta vez que la figura Flor (Figura 4-21) elimina un 87,3% mientras que la figura Cuadrada elimina únicamente un 33,5%. En resumen, la estructura de la Flor elimina un 53,8% más que la Figura Cuadrada.

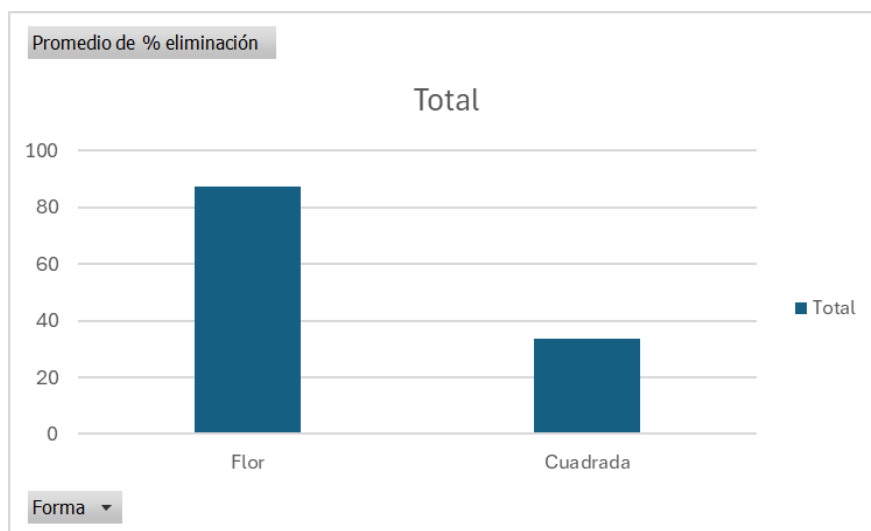


Figura 4-21 del promedio de % eliminado, con un 0,5% de espirulina y lavado.

– Experimento 3:

Para comprobar que el fosfato también influye en dicho experimento, se hizo lo mismo visto anteriormente, pero dejando las figuras 3 días metidas en fosfato. Primero hablaremos de las figuras con un 0,5% de espirulina, no lavadas y dejadas tres días en fosfato. Se obtienen los siguientes resultados reflejados en la Figura 4-22, siendo la Flor la figura que más fosfato elimina con un 86,9% de eliminación, frente al 85,6% de eliminación de la figura Cuadrada.

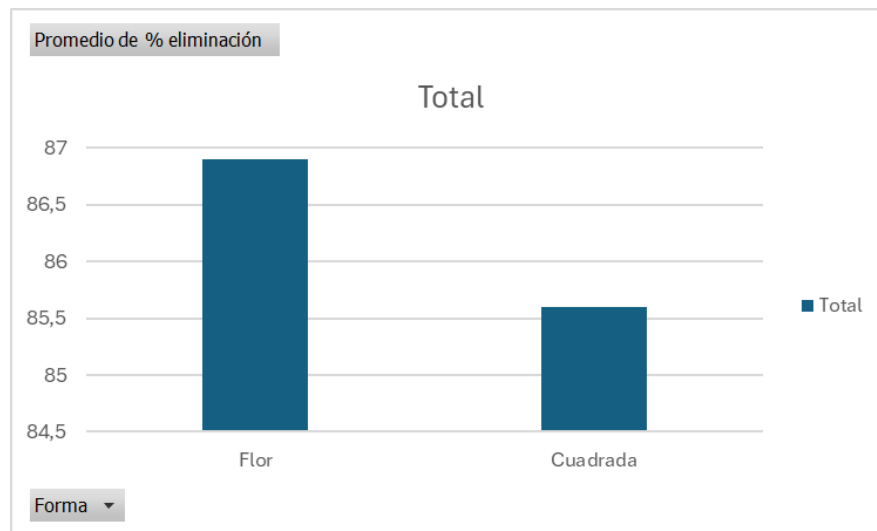


Figura 4-22 del promedio de % eliminado, con un 0,5% de espirulina y no lavado

– Experimento 4:

Para este último experimento con un 0,5% de espirulina, se han seguido los siguientes parámetros: 99,5% de resina, lavadas en alcohol y 3 días en fosfato. Dando los resultados vistos en la gráfica de la Figura 4-23. Se puede observar que la más eficaz la figura Flor con un 63,5% frente al 51,2% de la figura Cuadrada, que elimina un 12,3% más.

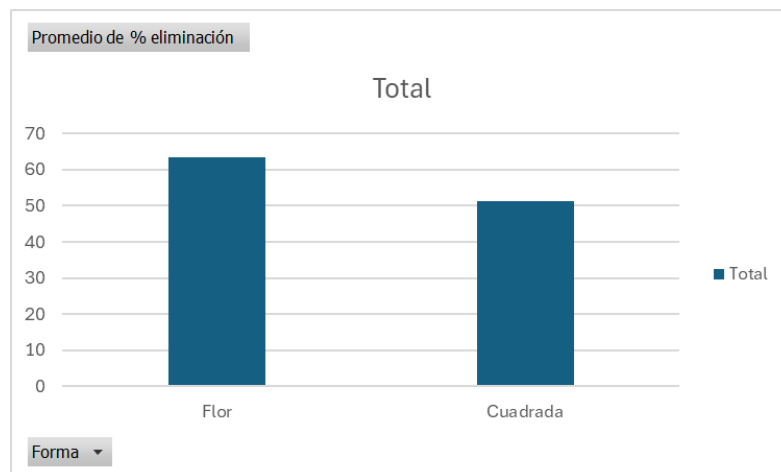


Figura 4-23 promedio de % eliminado, con un 0,5% de espirulina y lavado

4.6 Resultados del estudio realizado en estructuras con 1% de espirulina

El siguiente paso de este experimento, es ver si las estructuras se pueden conseguir aumentando el porcentaje de espirulina al 1%. Se van a hacer las mismas figuras, pero la diferencia de este estudio respecto al anterior es que no se va a lavar en alcohol ninguna figura, pero sí se va a diferenciar entre el tiempo que esté en contacto con el fosfato. El resultado de la impresión de las figuras al 1% es bastante

evidente, como se puede observar en la Figura 4-24. En los extremos de las figuras se puede ver como la figura empieza a fallar y presenta una coloración verdosa más intensa.

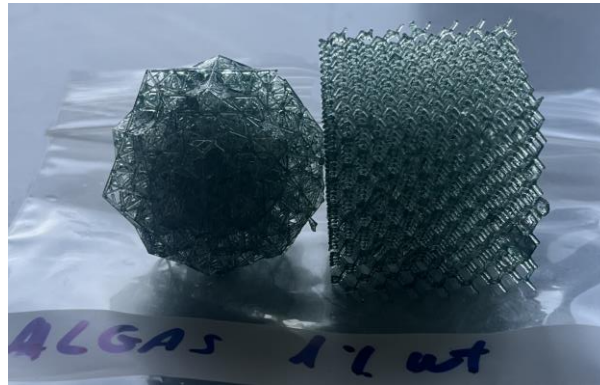


Figura 4-24 Flor y Cuadrada al 1% de espirulina

– Experimento 1:

Para el primer experimento con espirulina al 1% se hará con los parámetros siguientes, que son sin lavar con alcohol y 1 día en contacto con el fosfato y viendo los resultados en la Figura 4-25 se puede observar que la Flor elimina un 92% mientras que la cuadrada eliminaría un 66,9%.

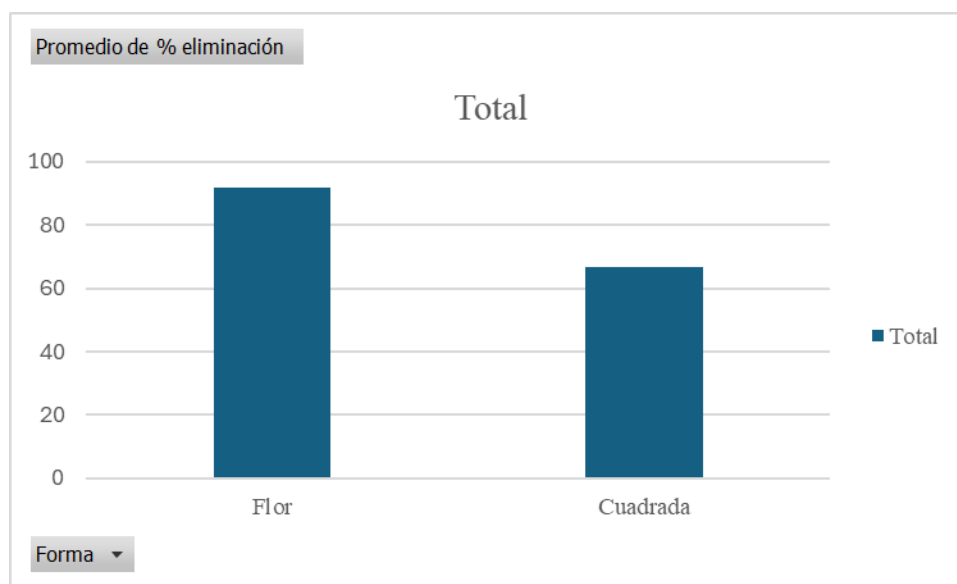


Figura 4-25 promedio de % de fosfato eliminado, con un 1% de espirulina y 1 día en fosfato

– Experimento 2:

Para continuar, ahora se estudiará el porcentaje de fosfato eliminado, donde se han tenido en cuenta los siguientes parámetros, donde se tiene un 99% de resina, no se ha lavado y pasan 3 días introducidos en el agua. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4-26. Este resultado muestra que la Flor elimina un 53,9% frente al 52,5% que elimina la Cuadrada, es decir un 1,4% más.

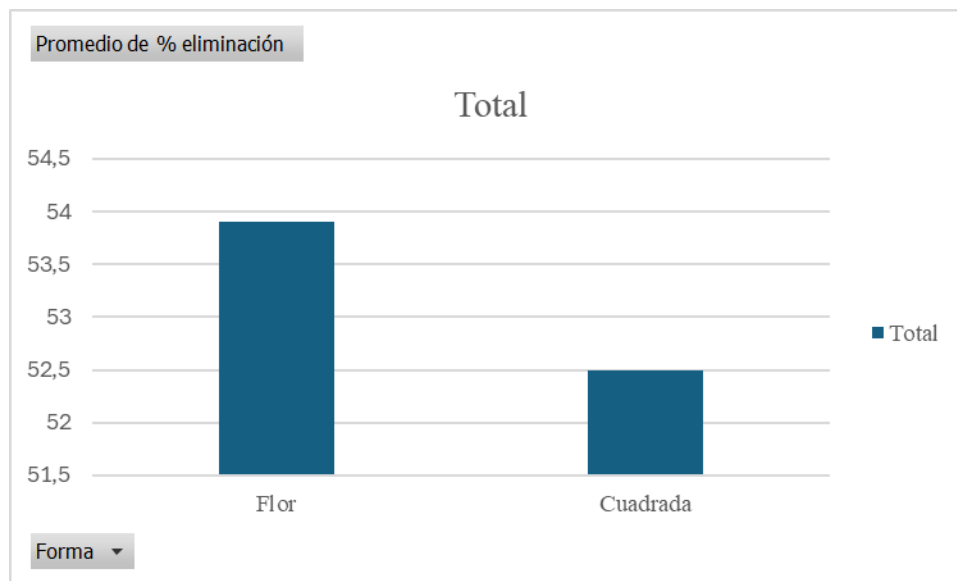


Figura 4-26 promedio de % de fosfato eliminado, con un 1% de espirulina y 3 días en fosfato

4.7 Resultados del estudio realizado en estructuras con 2% de espirulina

Una vez finalizadas las pruebas de las estructuras al 0,5 y 1% se comenzó con la última etapa, que consistió en evaluar la adición de un 2% de espirulina a su resina (Figura 4-27).



Figura 4-27 impresas con un 2% de espirulina

Se puede ver que también se imprimieron muestras de la estructura Pelota, estas se hicieron para ver si estructuras más débiles y menos compactas eran capaces de soportar ese porcentaje de contaminación de resina. En algunos casos (Figura 4-28) las estructuras mostraron fallos de impresión lo que evidencia que el porcentaje de aditivo podría estar cerca de su límite superior.



Figura 4-28 Pelota al 2% de espirulina que no ha resistido

Por otro lado, las estructuras Cuadrada y Flor que se ven en la Figura 4-29, al tratarse de estructuras más sólidas y compactas se han construido con relativa normalidad, sin fallos apreciables en su estructura.

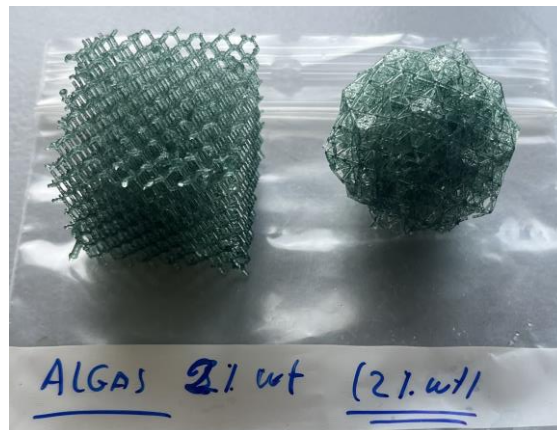


Figura 4-29 Estructuras Cuadrada y Flor al 2%

– Experimento 1:

El primer experimento que se va a realizar con las estructuras al 2% de espirulina se realizará con los siguientes parámetros, que son un 98% de resina, sin lavar y 1 día en contacto con el fosfato. En los resultados reflejados en la Figura 4-30 se observa que ambas piezas tienen un elevado porcentaje de eliminación, siendo más alto el porcentaje de la Flor con un 98,1% frente al 82,1% de la Cuadrada que supone un 16% más que esta última.

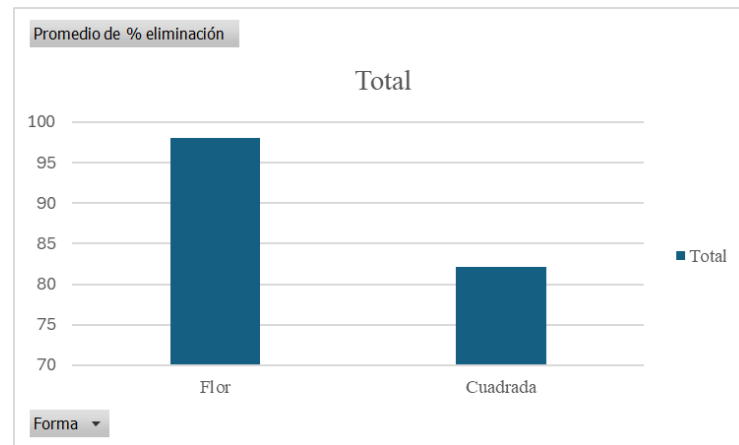


Figura 4-30 promedio de % de fosfato eliminado, con un 2% de espirulina y 1 día en fosfato

– Experimento 2:

Para este último experimento lo que varía con respecto al anterior es el tiempo que las estructuras pasan en contacto con el fosfato, que en este caso pasan 3 días. En cuanto a los resultados obtenidos se reflejan en la Figura 4-31, donde se puede ver que la Flor elimina un 72,1% frente al 51% que elimina la cuadrada, siendo un 21,1% más que esta última.

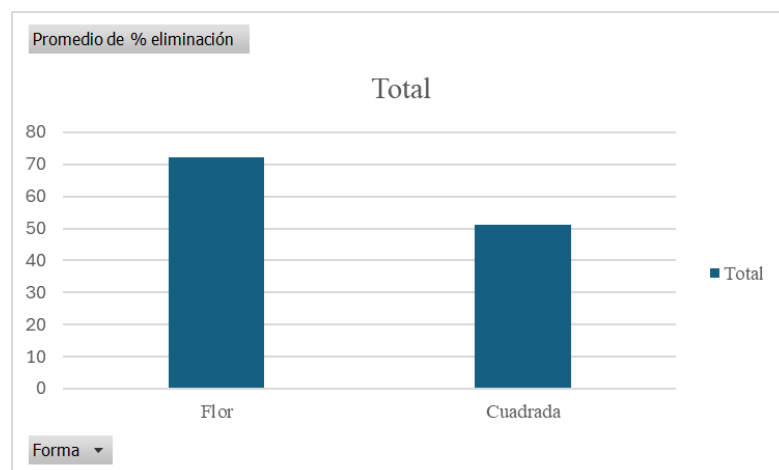


Figura 4-31 promedio de % de fosfato eliminado, con un 2% de espirulina y 3 días en fosfato

4.8 Tabla resumen de piezas

A continuación, se puede consultar una tabla resumen de las dos piezas que se han estudiado, donde se resume cómo varía significativamente el color y el acabado de las piezas, así como el número de réplicas empleadas en el estudio.

4.8.1 Flor

La primera pieza presentada es la denominada Flor (Tabla 4–2):

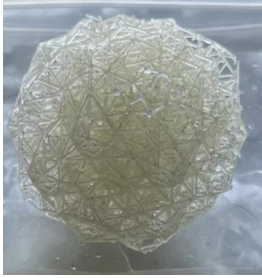
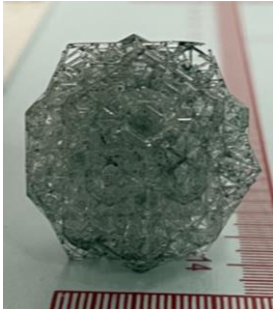
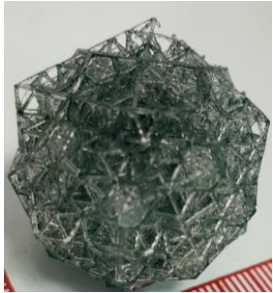
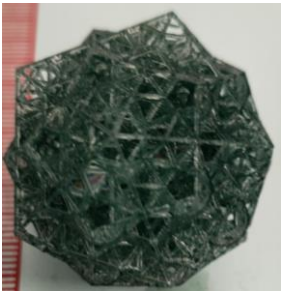
Pieza	Foto	Nº Réplicas
0,5% lavada		2
0,5% sin lavar		2
1% sin lavar		2
2% sin lavar		2

Tabla 4-2 Comparación de las diferentes piezas Flor

4.8.2 Cuadrada

La segunda pieza presentada es la denominada Cuadrada (Tabla 4-3):

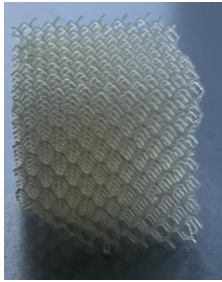
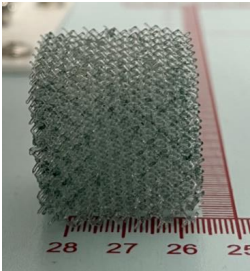
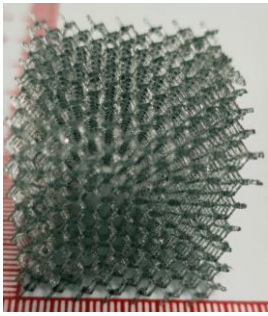
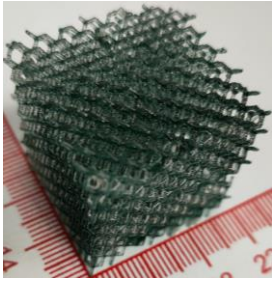
Pieza	Imagen	Nº Réplicas
0,5% lavada		2
0,5% sin lavar		2
1% sin lavar		2
2% sin lavar		2

Tabla 4-3 Comparación de las diferentes piezas Cuadrada

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

1. La impresión por fabricación aditiva, en función del nivel de acabado final, se demuestra como un medio eficaz para obtener estructuras 3D diseñadas y construidas con resina al 100%, facilitándose en caso de error repetir el proceso. A este respecto es importante resaltar que es necesario optimizar el tamaño de las tandas para evitar errores de procesamiento de estructuras durante la impresión, destacándose que el resto de las estructuras no se ven afectadas durante el proceso.
2. En relación con las estructuras compuestas con espirulina es importante destacar que, aunque la impresora 3D no está diseñada para fabricar con mezclas de resina, la impresora si admite y procesa con eficacia, estructuras con concentraciones bajas de espirulina no superiores al 2%, siendo mejor los resultados conforme más compacta es la figura diseñada a pesar de que se observan discretos defectos en los bordes de las estructuras impresas que no afectan a la funcionalidad de la misma.
3. La obtención de microalgas, en concentraciones suficientes necesarias para la realización de los diferentes experimentos, ha sido un elemento limitador del trabajo de investigación en función del tiempo necesario para su desarrollo óptimo desde la siembra, habiendo sido necesario que transcurriera más de un mes para alcanzar la concentración suficiente para poder desarrollar los experimentos.
4. El aspecto más relevante de esta investigación es que las estructuras obtenidas gracias a la impresión aditiva han resultado muy eficaces para la reducción de los niveles de fosfatos en los ensayos realizados, llegando a eliminar hasta un 80,5% del fosfato disuelto en una semana. Considerándose como un factor determinante de este incremento de eficacia de depuración la capacidad de adherencia de las microalgas a la superficie de las estructuras obtenidas.
5. En adición a lo anterior, se ha demostrado que la adherencia de las microalgas a las estructuras no es el único factor determinante para disminuir los niveles de fosfatos disueltos en el agua a un periodo dado, sino que las estructuras impresas compuestas con espirulina también son eficaces para esta función, no resultando afectadas en gran medida ni por las temperaturas necesarias para el modelado, ni por la longitud de onda utilizada durante el proceso de fabricación.

5.1 Líneas Futuras

Los resultados de los diferentes ensayos realizados abren la puerta a profundizar en este ámbito de estudio, toda vez que la mejora de los procesos de impresión gracias a la optimización de nuevos sistemas de impresión podrá permitir el aumento de la concentración de microalgas sin que se vea afectada estructura generada. A este respecto el incremento de la porosidad de la estructura, unido a la conformación espacial permitirá realizar ensayos futuros con vistas a optimizar el proceso de descontaminación y pasar de la escala de laboratorio a ensayos de campo en situaciones controladas. Por

otro lado, se plantea como una posible derivada del estudio realizado, llegar a imprimir estructuras espaciales complejas utilizando como material base las algas secadas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. L. Kareem, W. S. Jaber, L. A. Al-Maliki, R. A. Al-husseiny, S. K. Al-Mamoori, y N. Alansari, «Water quality assessment and phosphorus effect using water quality indices: Euphrates River- Iraq as a case study», *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 14, p. 100630, ago. 2021, doi: 10.1016/j.gsd.2021.100630.
- [2] E. Hofman, «La impresión 3D y su aplicación en los servicios médicos», n.º 3.
- [3] H. Lin, Y. Wang, y Y. Dong, «A review of methods, influencing factors and mechanisms for phosphorus recovery from sewage and sludge from municipal wastewater treatment plants», *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 12, n.º 1, p. 111657, feb. 2024, doi: 10.1016/j.jece.2023.111657.
- [4] O. Segura Morera, «Recuperación de fósforo de aguas residuales», sep. 2021.
- [5] S. Roy Barman, P. Gavit, S. Chowdhury, K. Chatterjee, y A. Nain, «3D-Printed Materials for Wastewater Treatment», *JACS Au*, vol. 3, n.º 11, pp. 2930-2947, nov. 2023, doi: 10.1021/jacsau.3c00409.
- [6] R.- ASALE y RAE, «eutrofización | Diccionario de la lengua española», «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/eutrofización>
- [7] «Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales en Ganadería | Skyview». Accedido: 20 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://mbrwatertreatment.com.ar/livestock-wastewater-treatment.html>
- [8] Redacción, «Aguas residuales industriales normativa», Grupo Vento BLOG. Accedido: 20 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://evaporadoresindustriales.grupovento.com/aguas-residuales-industriales-normativa/>
- [9] Inviassa, «Tipos de sistemas de alcantarillado». Accedido: 20 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://inviassa.com/noticias/tipos-sistemas-alcantarillado>
- [10] I. C. J. Collazos, «Tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales».
- [11] A. Valdivielso, «¿Qué es un tratamiento terciario de aguas residuales?», iAgua. Accedido: 2 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-tratamiento-terciario-aguas-residuales>

- [12] R. V. Kapoore, G. Padmaperuma, S. Maneein, y S. Vaidyanathan, «Co-culturing microbial consortia: approaches for applications in biomanufacturing and bioprocessing», *Crit Rev Biotechnol*, vol. 42, n.º 1, pp. 46-72, feb. 2022, doi: 10.1080/07388551.2021.1921691.
- [13] A. Hernández-Pérez y J. I. Labbé, «Microalgas, cultivo y beneficios», *Revista de biología marina y oceanografía*, vol. 49, n.º 2, pp. 157-173, ago. 2014, doi: 10.4067/S0718-19572014000200001.
- [14] A. M. Santos, «Anales ICAI». Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://revista-anales.icaei.es/web/n_24/seccion_13.html
- [15] J. M. Burkholder, D. A. Tomasko, y B. W. Touchette, «Seagrasses and eutrophication», *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 350, n.º 1, pp. 46-72, nov. 2007, doi: 10.1016/j.jembe.2007.06.024.
- [16] C. W. Hull y S. Gabriel, «(54) APPARATUS FOR PRODUCTION OF THREE-DMENSONAL OBJECTS BY STEREO THOGRAPHY».
- [17] S. S. Crump y A. E.-P. D. Muir, «CREATING THREE-DIMENSIONAL OBJECTS», 1992.
- [18] H. A. Colorado, «Exploring the advantages and applications of nanocomposites produced via vat photopolymerization in additive manufacturing: A review», abr. 2023.
- [19] P. F. Liétor, «Estudio, exploración y validación de la fabricación aditiva en catálisis heterogénea», jun. 2022.
- [20] P. Venezia, V. Ronsivalle, L. Rustico, E. Barbato, R. Leonardi, y A. Lo Giudice, «Accuracy of orthodontic models prototyped for clear aligners therapy: A 3D imaging analysis comparing different market segments 3D printing protocols», *Journal of Dentistry*, vol. 124, p. 104212, sep. 2022, doi: 10.1016/j.jdent.2022.104212.
- [21] B. Taskan, A. Junça-Silva, y A. Caetano, «Clarifying the conceptual map of VUCA: a systematic review», *International Journal of Organizational Analysis*, vol. 30, n.º 7, pp. 196-217, ene. 2022, doi: 10.1108/IJOA-02-2022-3136.
- [22] «ANYCUBIC Official Website | Innovative Desktop 3D Printer Manufacturer», ANYCUBIC-US. Accedido: 22 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://store.anycubic.com/>
- [23] R. V. Pazhamannil, H. M. Hadidi, y G. Puthumana, «Development of a low-cost volumetric additive manufacturing printer using less viscous commercial resins», *Polymer Engineering & Science*, vol. 63, n.º 1, pp. 65-77, 2023, doi: 10.1002/pen.26186.
- [24] S. L. Mak y D. Ming Ke, «A Review on European Toy Safety Directives», en *2017 IEEE International Symposium on Product Safety and Compliance Engineering - Taiwan (ISPCE-TW)*, dic. 2017, pp. 1-2. doi: 10.1109/ISPCE-TW.2017.8626852.
- [25] «Neptune 4 Plus», ELEGOO EU. Accedido: 22 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://eu.elegoo.com/products/neptune-4-plus-fdm-3d-printer>
- [26] «Software Autodesk Inventor | Obtener precios y comprar el producto oficial Inventor 2024». Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.es/products/inventor/overview>
- [27] L. S. Hansen, *Autodesk Inventor 2024: A Tutorial Introduction*. SDC Publications, 2023.
- [28] A. D. N. I. M, S. Samsudi, S. Sudiyono, y A. Septiyanto, «Influence Use of Blended Learning Against Competence Drawing 3 Dimensions with Autodesk Inventor», presentado en *5th Vocational Education International Conference (VEIC-5 2023)*, Atlantis Press, feb. 2024, pp. 1425-1429. doi: 10.2991/978-2-38476-198-2_201.
- [29] «CHITUBOX | All-in-one SLA/DLP/LCD Slicer | 3D printing preprocessing software-». Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.chitubox.com/en/index>

- [30] «guiones0304.pdf». Accedido: 2 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/curso0304/guiones0304.pdf>
- [31] J. G. Ivars, «Microcontaminantes orgánicos en aguas residuales: ¿Cómo reducir su impacto medioambiental?», AINIA. Accedido: 4 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ainia.es/ainia-news/microcontaminantes-organicos-aguas-residuales-reducir-impacto-medioambiental/>
- [32] BBVA, «Biorreactores de algas: nuevos árboles biomecánicos para las ciudades», BBVA NOTICIAS. Accedido: 4 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/biorreactores-de-algas-nuevos-arboles-biomecanicos-para-las-ciudades/>
- [33] S. S. Matus *et al.*, «Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe».
- [34] M. J. Gamez, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible», Desarrollo Sostenible. Accedido: 4 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

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

El artículo de AINIA describe el problema medioambiental y social que provocan los microorganismos y otros compuestos químicos en las aguas residuales. Dichos contaminantes resisten a los tratamientos de depuración convencionales alcanzando niveles superiores a los establecidos en los ecosistemas acuáticos, así como en las aguas de consumo humano, debido a su alta capacidad de infiltrarse en las aguas.

Es por ello que la resistencia que presentan a ser depurados haga que se planteen serios retos tanto a nivel ambiental como social. Esto requiere la necesidad urgente de desarrollar y aplicar tecnologías de tratamiento avanzadas, así como la actualización de las regulaciones existentes para mitigar su impacto.

La AINIA colabora con sectores industriales con el fin de avanzar hacia soluciones innovadoras que mejoren la eficiencia energética siempre desde un punto de vista más sostenible, con el fin de minimizar el impacto ambiental, protegiendo la salud de los ecosistemas y de la sociedad [31].

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El cultivo de algas se considera una solución innovadora para las ciudades ya que pueden actuar como árboles biomecánicos capaces de capturar carbono de forma eficaz. Los biorreactores usan las algas para realizar la fotosíntesis capturando niveles de CO₂ similares a los que capturan 400 árboles tradicionales. Igualmente, con este proceso se es capaz de utilizar la biomasa generada como biocombustible apoyando la economía circular y mejorando la contaminación ambiental.

Actualmente, y cada vez más, estos mecanismos presentan grandes implicaciones sociales y ambientales ya que, como se ha indicado anteriormente, funcionan como soluciones verdes que mitigan la contaminación y promueven la sostenibilidad. Un claro ejemplo son dos de las empresas que lideran esta iniciativa: *Hypergiant Industries* y *BiomiTech*, enfocándose principalmente en el compromiso con el desarrollo de ciudades más limpias y sostenibles [32].

El tratamiento de aguas residuales en las zonas de América Latina y el Caribe implica la introducción de los principios de economía circular prometiendo notables mejoras en la gestión de los recursos hídricos, transformando un agua residual que supone un desecho en un recurso apto para su posterior reutilización. Estos aspectos, además de generar grandes beneficios medioambientales, también se traducen en beneficios económicos, reduciendo los costes y creando nuevas oportunidades de negocio, y beneficios en la salud pública disminuyendo la exposición directa de la sociedad a contaminantes.

En resumen, la economía circular en el tratamiento de aguas residuales se alinea, entre otras muchas cosas, con los esfuerzos globales hacia un futuro más verde y sostenible, donde el cuidado del agua es fundamental para el bienestar de las sociedades y los ecosistemas [33].

Como conclusión, se puede determinar que este trabajo aborda temas relevantes para varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), incluyendo los siguientes [34]:

- ODS 6, Agua Limpia y Saneamiento: enfocado en mejorar la calidad del agua al reducir la contaminación, eliminar el vertido y minimizar la liberación de productos químicos y materiales peligrosos.
- ODS 9, Industria, Innovación e Infraestructura: mediante la promoción de tecnologías innovadoras como la impresión 3D para soluciones de tratamiento de agua.
- ODS 11, Ciudades y Comunidades Sostenibles, al abordar la mejora de la sostenibilidad de las ciudades y comunidades a través de la gestión innovadora y sostenible del agua, contribuyendo así a crear entornos urbanos más resilientes y capaces de proveer servicios esenciales de manera sostenible.
- ODS 12, Producción y Consumo Responsables: al sugerir el uso eficiente de recursos como el fósforo y fomentar la gestión sostenible de los mismos.
- ODS 13, Acción por el Clima, al abordar la mitigación del cambio climático a través de la reducción de la contaminación por fosfatos y la promoción de prácticas sostenibles en el manejo de aguas residuales, contribuyendo así a la reducción de los efectos adversos del cambio climático en los ecosistemas acuáticos.
- ODS 14, Vida Subacuática: al buscar la conservación y uso sostenible de los océanos, mares y recursos marinos, este trabajo contribuye a la prevención y reducción significativa de la contaminación marina de todo tipo.
- ODS 15, Vida de Ecosistemas Terrestres, al promover la gestión sostenible de los ecosistemas acuáticos y terrestres, ayudando a preservar la biodiversidad y evitar la degradación de hábitats naturales.
- ODS 15, Vida de Ecosistemas Terrestres, al promover la gestión sostenible de los ecosistemas acuáticos y terrestres, ayudando a preservar la biodiversidad y evitar la degradación de hábitats naturales.