

**Método físico de filtración de microplásticos en el agua:**

**Filtro de nanocelulosa**

Natalia Brand Vásquez

Angelo Giuseppe Lozano Berruecos

Deivy Camilo Muñoz Chamorro

Centro Javeriano de Innovación y Emprendimiento

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Proyecto de grado

Director: Sebastián Cuenca Perea

03 de junio de 2024

## Índice general

### Contenido

<b>Agradecimientos</b> .....	7
<b>Angelo</b> .....	7
<b>Natalia</b> .....	8
<b>Presentación del equipo local</b> .....	11
<b>Angelo</b> .....	11
<b>Natalia</b> .....	13
<b>Deivy</b> .....	15
<b>Integrantes del equipo de trabajo</b> .....	17
<b>¿Qué es el PdP?</b> .....	18
<b>Patrocinadores</b> .....	20
<b>CleanWaters</b> .....	20
<b>Glassomer</b> .....	20
<b>ATTRACT</b> .....	21
<b>Design Factory Global Network</b> .....	22
<b>Resumen ejecutivo</b> .....	23
<b>Introducción</b> .....	24
<b>Planteamiento de problema</b> .....	26
<b>Justificación</b> .....	30
<b>Objetivos</b> .....	32
<b>General</b> .....	32
<b>Específicos</b> .....	32
<b>Metodología</b> .....	33
<b>Marco teórico</b> .....	35
<b>Desarrollo</b> .....	38
<b>Empatía</b> .....	38
<i>¿Qué son los microplásticos?</i> .....	38
<i>Fuentes de los microplásticos</i> .....	40
<i>Efectos de los microplásticos</i> .....	42

<i>Árbol de problema</i> .....	44
<i>Mapa de actores</i> .....	46
<i>Usuario objetivo</i> .....	50
<i>Debriefing</i> .....	54
<i>Entrevistas</i> .....	55
<i>Insights</i> .....	58
<b>Definición: primer acercamiento</b> .....	60
<b>Ideación</b> .....	62
<i>Priorización de las ideas</i> .....	64
<b>Definición final</b> .....	65
<b>Prototipado</b> .....	72
<i>Selección de concepto</i> .....	72
<i>Diseño de prototipos</i> .....	74
<i>Creación de película de nanocelulosa</i> .....	78
<i>Configuración de la muestra</i> .....	83
<i>Instrumento de Prueba</i> .....	86
<i>Criterios y proceso de evaluación</i> .....	93
<i>Prueba de presión del agua.</i> .....	95
<i>Resultados y Discusión General</i> .....	103
<i>Pasos siguientes y otras oportunidades para exploración</i> .....	105
<b>Conclusiones</b> .....	110
<b>Presupuesto</b> .....	111
<b>Recomendaciones</b> .....	113
<b>Investigación sobre combinaciones de materiales</b> .....	113
<b>Optimización de la estructura del filtro</b> .....	113
<b>Evaluación de la vida útil y reciclabilidad</b> .....	113
<b>Desarrollo de métodos de prueba estándar</b> .....	113
<b>Estudios de impacto ambiental y de salud</b> .....	114
<b>Futuros trabajos</b> .....	115
<b>Proceso de diseño desde cada carrera</b> .....	117
<b>Angelo</b> .....	117
<b>Deivy</b> .....	119

<b>Natalia.....</b>	<b>121</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>122</b>

**Listado de figuras**

<b>Figura 1</b> .....	39
<b>Figura 2</b> .....	45
<b>Figura 3</b> .....	49
<b>Figura 4</b> .....	51
<b>Figura 5</b> .....	52
<b>Figura 6</b> .....	53
<b>Figura 7</b> .....	63
<b>Figura 8</b> .....	63
<b>Figura 9</b> .....	66
<b>Figura 10</b> .....	67
<b>Figura 11</b> .....	68
<b>Figura 12</b> .....	68
<b>Figura 13</b> .....	69
<b>Figura 14</b> .....	70
<b>Figura 15</b> .....	74
<b>Figura 16</b> .....	75
<b>Figura 17</b> .....	75
<b>Figura 18</b> .....	76
<b>Figura 19</b> .....	79
<b>Figura 20</b> .....	80
<b>Figura 21</b> .....	82
<b>Figura 22</b> .....	83
<b>Figura 23</b> .....	84
<b>Figura 24</b> .....	85
<b>Figura 25</b> .....	86
<b>Figura 26</b> .....	87
<b>Figura 27</b> .....	88
<b>Figura 28</b> .....	89
<b>Figura 29</b> .....	89
<b>Figura 30</b> .....	90
<b>Figura 31</b> .....	91
<b>Figura 32</b> .....	92
<b>Figura 33</b> .....	98

**Listado de tablas**

<b>Tabla 1</b> .....	64
<b>Tabla 2</b> .....	95
<b>Tabla 3</b> .....	100
<b>Tabla 4</b> .....	103
<b>Tabla 5</b> .....	107
<b>Tabla 6</b> .....	111

## **Agradecimientos**

### **Angelo**

En primer lugar, quiero agradecer a la persona que siempre me ha estado apoyando y dando ánimos en todos los momentos, mi padre Juan Carlos Lozano, él ha sido un pilar fundamental en mi formación como ser humano, deportista y profesional. A mi madre Beatriz Berruecos por confiar en mí, sabíamos que no era un reto fácil, lo logramos. También, agradecerles a mis hermanos por estar y mostrarles que estamos hechos para grandes cosas. Seguido quiero agradecer a mi pareja y mejor amigo por motivarme a seguir hacia adelante en todo momento.

También, quiero agradecerle a Sara Botero, Diana Riveros y en especial a Sebastián Cuenca por darme el voto de confianza en que haría un buen trabajo, espero haber cumplido sus expectativas, es la mejor forma que encuentro para agradecerles, dar lo mejor de mí y hacer la mejor representación. También, un agradecimiento a todos los miembros del CIE y a la maestra Sandra Galarza, quienes fueron fuente de conocimiento y guías en el camino para saber cómo direccionarnos y cómo ser mejores cada día. Por otro lado, agradecer a todos mis compañeros del equipo internacional con especial mención a Sebastián Pouttu, por todo el acompañamiento y ayuda brindada.

Por último, quiero agradecer a mi director de carrera Gerardo Sarria por permitirme hacer parte de un proyecto de tal envergadura y apoyarme para materializarlo junto con mi director William Muñoz. Por último, pero no menos importante, agradecerles a todos los miembros del equipo de rugby de la Javeriana Cali: Wallens, Pacho, Andrew, entre otros. Gracias por poner su granito de arena en el ser integral que soy hoy en día.

**Natalia**

Quiero expresar mis agradecimientos en primer lugar a Dios por la oportunidad de hacer este proyecto, en segundo lugar, a mis padres John Fabio y María Fernanda y a mi hermana María Isabel, quienes fueron el motor principal de apoyo y amor para continuar durante este proceso. También quiero agradecer a mi familia y pareja quienes siempre estuvieron pendientes de mi proceso y bienestar.

Por otra parte, quiero agradecer a mi director de carrera Sebero Ugarte quien me impulsó a postularme para este proyecto creyendo en mi potencial y habilidades. Además, darle las gracias a nuestro tutor/jefe del proyecto Sebastián Cuenca, quien nos acompañó, ayudó, corrigió, escuchó y aconsejó de la mejor manera para que pudiéramos cumplir con los objetivos propuestos.

A su vez, resaltar el trabajo y agradecer a todo el equipo del Centro Javeriano de Innovación y Emprendimiento (CIE) por ayudarnos y brindarnos las herramientas necesarias durante todo el proceso. Y hacer mención especial a Esneider Melo, por abrirnos espacio en el taller de impresión 3D y tenernos tanta paciencia con lo que le pedíamos, a Víctor Rodríguez por enseñarnos la importancia de la propiedad intelectual e introducirnos en la vigilancia tecnológica, a Enrique Ramírez por retroalimentar nuestra forma de presentar y a Diana Riveros por ser la brújula de este equipo y direccionarlos a hacer cosas increíbles incluyéndonos a nosotros. También, añadir un agradecimiento a Daniela Herrera por ayudarnos antes de las presentaciones cuidando cada mínimo detalle y a Sara Botero con quien iniciamos este proceso y particularmente me brindó orientación al momento de postularme al proyecto.

Asimismo, agradecer al equipo del Design Factory de Aalto quienes nos abrieron las puertas de sus espacios y nos recibieron excelentemente. Igualmente, darles las gracias a nuestros

compañeros del equipo de Finlandia: Sebastián, Areeb, Simone, Nydia, Öykü, Manoj y JB. Quienes a pesar de la distancia pudieron incluirnos y hacernos partícipes de lo que ocurría durante el proyecto. Adicionalmente, agradecer a Deivy y a Angelo con quienes tuve la oportunidad de trabajar durante nueve meses en este proyecto y sin los cuales este no hubiera podido salir adelante.

Finalmente, agradecer a mis profesores y amigos que estuvieron presentes durante este proceso, me alentaron a seguir adelante, me sacaron una sonrisa y me ayudaron en lo que pude haber necesitado.

**Deivy**

Quisiera comenzar agradeciendo a mis padres, Cesar Gerardo Muñoz y Elizabeth Chamorro, cuyo apoyo incondicional ha sido mi base durante todo este proceso. No puedo dejar de mencionar a mi hermano Kevin Santiago, mi abuela, y mis tías Mariela y Emily, quienes han sido pilares fundamentales en mi vida. A Isabella Quintero, más que una amiga, mi compañera constante, gracias por estar siempre dispuesta a ayudarme y guiarme en los momentos de incertidumbre.

Un agradecimiento especial a mi directora de carrera, Adriana Gómez, por su orientación y sabiduría, y a todo el equipo del Centro Javeriano de Innovación y Emprendimiento (CIE), especialmente a Esneider Melo, quien fue esencial en todo el proceso de prototipado. No puedo olvidar a Sebastián Cuenca, cuya guía fue crucial para nuestro éxito en este proyecto.

También quiero agradecer a mis compañeros de trabajo, Angelo y Natalia, con quienes compartí tantas horas de dedicación y esfuerzo. Han sido más que colegas, verdaderos amigos en este viaje.

Finalmente, un agradecimiento a todos mis amigos y profesores. Aunque no puedo nombrarlos a todos individualmente, cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi formación y en mi corazón. Gracias por ser parte de esta etapa tan importante de mi vida.

## **Presentación del equipo local**

### **Angelo**

#### ***¿Quién eres?***

Soy Angelo Giuseppe Lozano Berruecos. Tengo 22 años y estudio Ingeniería de Sistemas y Administración de Empresas en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. Me gusta mucho hacer deporte, considero que es una de las mejores maneras de despejar la mente y estar en forma. Juego rugby desde los 11 años, pasando por varios procesos competitivos con la selección regional y nacional. Además, he incursionado en otras actividades como natación, running, crossfit, fútbol, entre otros. Por otro lado, en el resto del tiempo me gusta conocer nuevas cosas como personas, lugares, actividades, espacios.

#### ***¿Cómo conociste el Proyecto de Desarrollo de Producto (PdP)?***

En la carrera de Ingeniería de Sistemas tenemos una línea que es la de trabajo de grado que se compone de diferentes materias. Entre ellas seminario de trabajo de grado, en la que el objetivo principal es lograr ayudar a los estudiantes a elegir su trabajo de grado mediante presentaciones de trabajos abiertos o que ya han culminado. Una de estas presentaciones fue a cargo de Juan Pablo García, en la que hablaba del ME310 y PdP. Posteriormente, establecimos comunicación haciéndome la invitación a participar en el Proyecto 96, donde ya conocí más a fondo la metodología de Design Thinking, y al resto del equipo del CIE, culminando finalmente en mi posterior vinculación con el PdP.

### ***¿Qué te llamó la atención del PdP?***

Uno de los principales problemas para escoger mi trabajo de grado era el alcance en la problemática a resolver, la mayoría de los temas eran interesantes, pero solo se quedaba en el papel, sin utilidad práctica. Cuando conocí el PdP, era totalmente distinto, en este tipo de proyectos lo más importante es poder entregar o poner en práctica todo ese conocimiento que se ha obtenido a lo largo de la vida universitaria, eso fue lo que más me llamó la atención, que la solución le podía aportar de manera positiva a una empresa que tienen un problema real y actual. También me pareció muy importante, la oportunidad de mejorar algo que siempre ha sido una dificultad para mí que es el manejo del inglés, al ser este un proyecto en conjunto con los estudiantes de maestría de Finlandia era una constante el estar expuesto a tener que comunicarme, lo cual era algo muy retador, pero que yo entendía que me iba a va a portar mucho a mi formación integral como estudiante.

### ***¿Qué expectativas tenías del PdP?***

Personalmente, al vincularme, tenía muchas expectativas con respecto al PdP, especialmente afianzar todos mis conocimientos teóricos resolviendo un problema real de la industria. Además, conocer nuevas personas tanto a nivel nacional, como a nivel internacional mediante el viaje a Finlandia. Por otro lado, poder romper esa barrera que siempre me había acompañado al intentar comunicarme en inglés. Por último, vivir mi primera experiencia de intercambio estudiantil internacional acompañado por mi grupo de trabajo.

### ***Frase que te identifique***

“Siempre para adelante, para adelante siempre.”

**Natalia*****¿Quién eres?***

Mi nombre es Natalia Brand Vásquez, tengo 20 años y soy estudiante de séptimo semestre de Gastronomía y Artes Culinarias en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. Disfruto mucho leer, tocar guitarra, bailar y participar de actividades y/o encuentros de desarrollo personal y espiritual. Adicionalmente me gusta aprender continuamente sobre aquello que me rodea, en especial en el ámbito alimentario.

***¿Cómo conociste Proyecto de Desarrollo de Producto (PdP)?***

La primera vez que escuché sobre el PdP fue en mi clase de diseño de experiencias y servicios en la que un compañero que se encontraba participando en el proyecto, me comentó un poco sobre este y despertó en mí interés y admiración por esta opción de práctica. Posteriormente a través de mi director de carrera, Sebero Ugarte, el PdP reapareció en mi vida durante la convocatoria 2024-1 en la que pude entender más a fondo la dinámica del proyecto gracias a la guía de la profesora Sara Botero quien me animó a continuar el proceso de inscripción que me permitió vincularme al proceso luego de pasar todos los filtros de selección.

***¿Qué te llamo la atención del PdP?***

Definitivamente, desde que escuché sobre el proyecto sentí que era muy interesante trabajar con equipos transdisciplinarios y multiculturales para transformar ideas, en soluciones aplicables a empresas reales. Sumado a ello, al ser un proyecto guiado bajo la metodología “Design Thinking”, permite que cualquier persona sin importar su conocimiento o carrera pueda aportar de una u otra manera en el desarrollo del proyecto, lo que hace que potencialicemos nuestras

habilidades y aprendizajes significativos. Finalmente, la oportunidad de viajar a Finlandia me pareció increíble, pues en los viajes se da un intercambio de saberes y experiencias que contribuyen con el desarrollo personal y profesional de nosotros como estudiantes.

***¿Qué expectativas tenías del PdP?***

El PdP generó muchas expectativas en mí, respecto a las habilidades que iba a poder desarrollar durante su ejecución; como es el caso de mejorar el uso del inglés, la forma de relacionarme en grupos tan dinámicos, la búsqueda de la información, la resolución de conflictos y la toma de decisiones. Además, al entrar al proyecto, una de mis mayores expectativas era que mi trabajo, y el de mis compañeros, pudiera contribuir a solucionar un problema real que afectaba a la sociedad, por lo que era una producción que no se quedaría solo en la teoría, sino que podría aplicarse en otros contextos.

***Frase que te identifique***

“Al que le van a dar, le guardan”.

## **Deivy**

### ***¿Quién eres?***

Mi nombre es Deivy Camilo Muñoz Chamorro, tengo 21 años y estoy cursando Ingeniería Mecánica en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. Esta etapa de mi vida está marcada por el aprendizaje constante y la búsqueda de nuevos retos. Entre mis mayores pasiones se encuentran los videojuegos, que me permiten sumergirme en mundos distintos y desafiantes. Además, soy un entusiasta del voleibol, que practico tanto por diversión como para mantenerme activo. La animación japonesa es otro de mis intereses, me encanta sumergirme en sus historias únicas y llenas de creatividad. Por último, disfruto mucho de una buena película, un plan perfecto para relajarme y desconectar del mundo.

### ***¿Cómo conociste Proyecto de Desarrollo de Producto (PdP)?***

Mi acercamiento al Proyecto de Desarrollo de Producto (PdP) fue gracias a un conocido, Juan José López, y a un profesor, Juan Manuel Rodríguez, cuyas recomendaciones y experiencias previas en el proyecto despertaron mi interés. Fue así como decidí llenar el formulario para postularme, movido por la curiosidad y el deseo de expandir mis horizontes académicos y personales.

### ***¿Qué te llamó la atención del PdP?***

El PdP se presentó ante mí como una oportunidad emocionante y enriquecedora. Lo que más me atrajo fue la idea de un proyecto educativo integral que combinara el desafío técnico con el desarrollo de habilidades blandas, todo en un ambiente intercultural e interdisciplinario. La posibilidad de colaborar en un proyecto real con un impacto tangible y, al mismo tiempo, romper

barreras culturales y geográficas, especialmente entre países como Finlandia y Colombia, me pareció fascinante. Verlo como un camino hacia el crecimiento tanto personal como profesional me motivó a embarcarme en esta aventura.

***¿Qué expectativas tenías del PdP?***

Mis expectativas con el PdP eran altas. Esperaba poder aplicar mis conocimientos académicos en un contexto real y complejo, colaborando con un equipo diverso para resolver un desafío concreto. Aspiraba a mejorar mis habilidades de comunicación, a la vez que expandía mi visión del mundo y mi capacidad de trabajo en un entorno multicultural. También veía esta experiencia como una oportunidad única para mejorar mi práctica del inglés y vivir un intercambio estudiantil internacional lleno de aprendizaje y descubrimiento.

***Frase que te identifique:***

"En la tranquilidad encuentro mi fuerza y en el aprendizaje, mi camino."

## Integrantes del equipo de trabajo

**Angelo Lozano**

Ingeniería de Sistemas y  
Administración de Empresas



**Natalia Brand**

Gastronomía y Artes  
Culinarias



**Deivy Muñoz**

Ingeniería  
Mecánica



**Öykü Cise Sahintas**

Ingeniería  
Mecánica



**Simone Möhrle**

Ingeniería  
Mecánica



**Naiyue Zhu**

Gestión de Información  
y Servicios



**Sebastian Pouttu**

Ingeniería  
Mecánica



**Areeb Murad**

Ingeniería  
Energética



**Jean-Baptiste Buisson**

Ciencia de  
Materiales



**Byri Manoj**

Ingeniería  
Eléctrica



## ¿Qué es el PdP?

El Proyecto de Desarrollo de Producto (PdP) es una experiencia educativa integral, multidimensional y eminentemente práctica, asociada con un curso de maestría en la Universidad de Aalto en Finlandia, pero abierta a estudiantes internacionales, incluidos los estudiantes del Design Factory de Cali, Colombia. Con una duración de nueve meses, el PdP está centrado en desafíos reales proporcionados por empresas de diversos sectores, como el industrial, ambiental, salud, transporte y educación.

Desde un enfoque personal, el PdP se valora como una experiencia enriquecedora que ofrece crecimiento tanto personal como profesional a los estudiantes, percibido como un regalo valioso que los expone a situaciones desafiantes y novedosas. Culturalmente, este proyecto simboliza la ruptura de barreras culturales y geográficas, promoviendo un intercambio significativo entre países y culturas, fomentando un crecimiento paralelo y mutuo entre profesionales y estudiantes.

Académicamente, el PdP requiere un trabajo interdisciplinario donde los estudiantes aplican habilidades y conocimientos de sus carreras, incorporando aprendizaje basado en retos y metodologías de innovación. Las etapas del proyecto incluyen investigación, entendimiento del problema, ideación, prototipado, validación y entrega de un prototipo funcional a la empresa patrocinadora. Además de los aspectos técnicos, se enfatiza el desarrollo de habilidades blandas y competencias transversales, como trabajo en equipo, liderazgo de proyectos y toma de decisiones.

El PdP, en su esencia, combina teoría y práctica en un marco real e internacional, brindando a los estudiantes la oportunidad de crear soluciones innovadoras para problemas específicos. Este

enfoque colaborativo en equipos internacionales permite a los estudiantes navegar por la complejidad de trabajar con diversas perspectivas y enfoques, abarcando elementos de interdisciplinariedad, interculturalidad, internacionalización, práctica de idiomas y colaboración con la industria, lo que resulta en una experiencia educativa excepcionalmente enriquecedora y transformadora.

## Patrocinadores

### CleanWaters

La empresa retadora y principal patrocinador es CleanWaters, un equipo conformado por dos de los estudiantes del anterior PdP 2022-2023, quienes decidieron seguir aportando a resolver esta problemática. Pero esta vez, dieron total libertad para hacerlo desde diferentes perspectivas, no necesariamente continuar con la solución que ellos mismos desarrollaron el año pasado.

Sitio oficial: [www.clean-waters.co](http://www.clean-waters.co)

### Glassomer

Glassomer GmbH es una empresa innovadora en la fabricación de vidrio con precisión, ubicada en el corazón del Bosque Negro, cerca de Freiburg im Breisgau, Alemania. Fundada en 2018, Glassomer se destaca por su compromiso con la producción de piezas de vidrio de alta calidad con un mínimo consumo de energía. La empresa es conocida por su proceso único a nivel mundial que ha revolucionado la fabricación y el moldeo del vidrio.

El equipo de Glassomer incluye un grupo dinámico de científicos, expertos financieros y administradores de proyectos que trabajan juntos para construir la producción de vidrio del futuro. La compañía valora la innovación basada en la ciencia, la precisión y la artesanía, así como la flexibilidad en sus procesos, lo que le permite adaptarse a las necesidades cambiantes de sus clientes y mercados.

Entre sus productos y servicios, Glassomer ofrece partes de vidrio de sílice fundida de alta pureza con diseños y formas únicas, utilizando su tecnología patentada que permite moldear la

sílice fundida a temperatura ambiente utilizando tecnologías estándar como el moldeo por inyección o la impresión 3D.

Las aplicaciones de Glassomer incluyen óptica, laboratorios en un chip, tecnología solar, tecnología médica y automotriz, entre otros.

Sitio oficial: <https://www.glassomer.com/company/about-us.html>

## **ATTRACT**

El Proyecto ATTRACT es una iniciativa financiada por el Programa Horizon 2020 de la Comisión Europea que se enfoca en el desarrollo de tecnologías innovadoras en el ámbito de la detección y la imagen. El objetivo de este proyecto es convertir los avances científicos en imagen, detección y computación en productos y servicios aplicables.

ATTRACT se organiza en dos fases principales:

- **Fase 1:** Se dedicó a la identificación y el desarrollo inicial de conceptos innovadores de tecnología de detección e imagen. Esta fase incluyó un llamado abierto y la financiación inicial de 170 conceptos de tecnología revolucionarios seleccionados entre más de 1200 propuestas de alta calidad en toda Europa. Cada uno de estos proyectos recibió una financiación inicial de 100.000 euros para crear un concepto de prueba.
- **Fase 2:** Centrada en las oportunidades más prometedoras de la Fase 1, con énfasis en convertir estos conceptos de prueba en aplicaciones claras en los ámbitos de la ciencia y la industria. El objetivo es asegurar que ninguna idea innovadora seleccionada se pierda en el proceso. Esta fase también incluye un enfoque en la atracción de inversiones privadas para comercializar nuevos productos y servicios.

El proyecto ATTRACT promueve la colaboración y la co-innovación, involucrando a infraestructuras de investigación nacionales y paneuropeas, organizaciones industriales (especialmente PYMES), y especialistas en innovación y negocios como lo es el Design Factory de la Universidad de Aalto en Finlandia por medio del PdP. Se busca un enfoque en el que las comunidades científicas e industriales persigan y generen conjuntamente conceptos innovadores en una asociación cercana e igualitaria.

Sitio oficial: <https://attract-eu.com/about/attract-project/#what-is-attract>

### **Design Factory Global Network**

Design Factory Global Network (DFGN) es una red de 37 centros de innovación en 25 países con sede en universidades y organizaciones de investigación en los cinco continentes del mundo. DFGN pretende crear un cambio en el mundo del aprendizaje y la investigación mediante una cultura basada en la pasión y la resolución eficaz de problemas. El entendimiento compartido y las formas comunes de trabajo permiten a las Design Factories de la red colaborar de manera eficiente a través de culturas, zonas horarias y límites organizacionales, fomentando innovaciones radicales. En esta red están las dos universidades involucradas en este proyecto, la Universidad de Aalto en Finlandia, y la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, de la cual se hace parte.

## **Resumen ejecutivo**

El proyecto se centra en el desarrollo de un método innovador para la filtración de microplásticos en el agua utilizando nanocelulosa. A través de la metodología Design Thinking, se realizaron varias iteraciones que llevaron a avances significativos en la tecnología de filtración. Se demostró que la nanocelulosa es un material viable como capa filtrante en una variedad de filtros físicos tipo membrana, mejorando la eficiencia en la remoción de microplásticos comparado con otros materiales como la celulosa.

Las pruebas de laboratorio confirmaron que este nuevo biomaterial aumenta significativamente la cantidad de microplásticos removidos de las fuentes hídricas. El uso de nanocelulosa como medio filtrante no solo es más efectivo sino también más sostenible. Este avance proporciona una base sólida para futuros estudios sobre las características y el comportamiento de la nanocelulosa, con el objetivo de desarrollar soluciones a largo plazo para la problemática de la contaminación por microplásticos.

## **Introducción**

La contaminación por microplásticos es una preocupación ambiental de creciente importancia debido a su impacto negativo en los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Los microplásticos, fragmentos de plástico de tamaño inferior a 5 mm, provienen de diversas fuentes y se dividen en dos categorías: primarios, diseñados para ser pequeños, y secundarios, resultantes de la degradación de plásticos más grandes.

Desde la producción masiva de plásticos en la década de 1950, la presencia de microplásticos en el ambiente ha aumentado exponencialmente, afectando tanto a la fauna marina como a los seres humanos. Estos contaminantes no solo alteran los ecosistemas al ser ingeridos por organismos acuáticos, sino que también presentan riesgos potenciales para la salud humana, como inflamaciones, toxicidad y trastornos metabólicos.

En respuesta a esta problemática, el presente proyecto se enfoca en desarrollar un método eficiente y sostenible para la remoción de microplásticos del agua. Utilizando la metodología Design Thinking, se investigó y validó el uso de la nanocelulosa como material filtrante. La elección de este biomaterial se basa en sus propiedades únicas de alta eficiencia de filtración y sostenibilidad ambiental.

A lo largo de este proyecto, se realizaron pruebas de laboratorio que confirmaron la efectividad de la nanocelulosa en la remoción de microplásticos. Este documento presenta los resultados obtenidos, demostrando que la nanocelulosa no solo es una alternativa viable a los materiales filtrantes tradicionales, sino que también ofrece una solución prometedora para mitigar la contaminación por microplásticos en los cuerpos de agua.

La implementación de este avance tecnológico tiene el potencial de proporcionar herramientas valiosas para futuros estudios y aplicaciones en el campo de la filtración de agua, contribuyendo así a la protección de los ecosistemas acuáticos y la salud pública.

### **Planteamiento de problema**

Los microplásticos (MPs) son pequeños fragmentos de plástico con un tamaño entre 5 mm y 1  $\mu\text{m}$ , existen dos tipos: primarios y secundarios. Los MPs primarios son los plásticos que entran a los ecosistemas en forma de partículas pequeñas, usualmente son creados para fines industriales o comerciales. Mientras que los MPs secundarios se originan de la degradación de fragmentos de plásticos más grandes al ser expuestos al medio ambiente. (Castañeta et al., 2020).

El plástico se ha vuelto omnipresente en la vida de los seres humanos, ya que es un material duradero con un precio asequible, sin embargo, se desecha a una escala colosal. Desde 1950 hasta 2015, se produjeron 6.300 millones de toneladas (Mt) de residuos plásticos, de los cuales el 79% (4.977 Mt), terminó en vertederos y/o en el medio ambiente (Geyer et al., 2017). La entrada abrupta de plástico al medio ambiente genera complicaciones ya que no es biodegradable, es decir que no se transforma en materia orgánica, por lo que la mayoría de plástico producido sigue presente en el medio (Buteler, 2019).

Esta presencia acarrea impactos que dependen del tipo de plástico, su tamaño y el hábitat en el que se encuentra. Sin embargo, algunas de estas consecuencias se engloban en: la alteración de la estructura y composición de la macro fauna, micro fauna y los conjuntos bacterianos; la afectación de procesos claves de los ecosistemas; el transporte e introducción de especies exóticas y la actuación de los plásticos como “cocteles químicos<sup>1</sup>” (United Nations Environment Programme [UNEP], 2021).

---

<sup>1</sup> Se refiere a que los plásticos pueden actuar como plataformas para que distintos químicos residuales, aditivos y contaminantes absorbidos del entorno, sean acumulados en ellos y posteriormente liberados.

De igual manera, el manejo inadecuado de los residuos plásticos contribuye al cambio climático y al aumento del efecto invernadero, porque el 94 % de dichos residuos termina en vertederos y se somete a procesos de incineración que emiten 400 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera planetaria. (Soumya Shraddhya et al., 2023).

Por su parte, al hablar de los microplásticos, se estima que 1.53 Mt llegan a los océanos cada año, lo que corresponde a una liberación promedio de 212 gramos/año per cápita. Para ejemplificar mejor esta cuestión, las cifras nos invitan a imaginarnos un escenario en el que todas las personas que habitan en la tierra decidieran cada semana, arrojar una bolsa de plástico a su acceso marítimo más cercano (Boucher y Friot, 2017). Sin embargo, las cifras y datos sobre la cantidad de microplásticos son solo una arista del problema.

Los MPs al ingresar a ecosistemas marinos son confundidos por alimento y son ingeridos por organismos como el zooplancton, los peces, las aves, las tortugas, los crustáceos y los mamíferos. Ocasionalmente ocasionando problemas a nivel de tejidos y células, pues se bioacumulan en sus órganos desencadenando bloqueos en el tracto digestivo, interfieren con la asignación de energía, el éxito reproductivo, la supervivencia de las crías y la absorción de nutrientes (Prasath y Poon, 2018). Asimismo, en el caso de los arrecifes carbonatados y los productores primarios, la presencia de microplásticos reduce su capacidad de absorber carbono y en los hábitats sedimentarios marinos estos ocasionan alteraciones al disminuir el flujo de nutrientes inorgánicos (United Nations Environment Programme [UNEP], 2021).

Al mismo tiempo, los microplásticos, representan un problema global debido a sus efectos tóxicos en los seres humanos, que siguen siendo estudiados, pero la evidencia actual sugiere una serie de impactos negativos como neurotoxicidad, inflamación crónica, bloqueo en los tejidos,

carcinogenicidad, alteración de la función metabólica y el flujo de energía en el cuerpo humano. Esto sin contar que también podría generar problemas como estrés oxidativo, citotoxicidad, neurotoxicidad y disrupción del sistema inmunológico (Bhuyan, 2022).

También es importante destacar que la mayoría de las pérdidas de microplásticos se genera a partir de actividades terrestres (98%). Es decir, que las actividades terrestres como, por ejemplo, fabricación de productos plásticos y el transporte, son las principales maneras fuentes de microplásticos. La cantidad restante se genera por actividades que se realizan en el mar como la pesca. Además, la liberación de estos microplásticos principalmente a los ecosistemas acuáticos se da por tres vías principales que son: los sistemas de tratamiento de aguas residuales, las escorrentías de carreteras y la transferencia del viento. (Boucher y Friot, 2017).

Tal y como se mencionaba con anterioridad los macroplásticos<sup>2</sup>, los microplásticos y otros materiales poliméricos son importantes y esenciales en diversos aspectos de la industria, economía y desarrollo de la sociedad moderna. Sin embargo, cuentan con desventajas, pues representan una amenaza significativa para los seres vivos y el medio ambiente. Por un lado, los macroplásticos, debido a su mayor tamaño, pueden causar daños al generar asfixia y atrapamiento en la fauna, la liberación de químicos nocivos, el transporte de especies invasoras y la alteración de procesos ecosistémicos (Prasath y Poon, 2018). Del mismo modo, los microplásticos son problemáticos debido a que, al ser demasiado pequeños, se dificulta su identificación y remoción, no se descomponen biológicamente y se bioacumulan desarrollando enfermedades a largo plazo (Gazal y Gheewala, 2020).

---

<sup>2</sup> Se refiere a los fragmentos grandes de desechos plásticos que poseen una longitud mayor a 5mm por ejemplo los restos de bolsas, redes de pesca, botellas, vasos y tapas de botellas (Buteler, 2019).

Según Geyer et al. (2017) de seguir con la forma de producción, consumo y desecho de plástico que se posee actualmente, para el 2050 aproximadamente 12.000 Mt de residuos plásticos estarán en vertederos o en el medio ambiente, incrementando considerablemente la cantidad de microplásticos que ingresan a los ecosistemas y a su vez, afectando la salud y el bienestar de los seres vivos que habitan en ellos. Las serias consecuencias de la alta contaminación del ambiente por microplásticos hacen necesario determinar estrategias que permitan su monitoreo y/o remoción de manera sustentable y escalable para que de esta manera sea posible disminuir su impacto en la sociedad y en el medio ambiente.

## Justificación

La creciente demanda y uso de plásticos en la vida humana ha ocasionado el aumento de la producción de plástico a nivel global. Asimismo, la presencia de plásticos está ligada a la existencia de los microplásticos, los cuales se han convertido en un reto para su identificación, monitoreo, tratamiento y remoción, pues por su tamaño son capaces de estar presentes en lugares impensables como los sedimentos marinos (Piperagkas et al., 2019), la sal de mesa (Selvam et al., 2020) e incluso la placenta humana (Ragusa et al., 2020).

Ahora bien, surge la necesidad de buscar soluciones que enfrenten esta problemática pues su presencia genera consecuencias negativas para el bienestar, la salud de los ecosistemas y la biodiversidad que en ellos habita, además de aspectos problemáticos en términos de salud pública referentes al bienestar general de los individuos. Dichas consecuencias van desde el transporte de patógenos (Castañeta et al., 2020). La bioacumulación, el bloqueo del tracto digestivo, el fallo reproductivo, el desarrollo de cáncer o de enfermedades autoinmunes, (Ghosh et al., 2023). Hasta la alteración de los procesos ecosistémicos como el intercambio gaseoso, la absorción del carbono y el flujo de nutrientes (United Nations Environment Programme [UNEP], 2021).

Según los Objetivos de desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2015) existen dos que están directamente relacionados con el planteamiento de este proyecto y sustentan su razón de ser: el número 6 “Agua limpia y saneamiento” y el número 14 “Vida submarina”. Esto debido a que en dichos objetivos se plantean, entre otras cosas, mejorar la calidad del agua y reducir la contaminación de esta, para así proteger sosteniblemente los ecosistemas marinos y costeros; metas a las que este proyecto contribuye directamente con su cumplimiento.

Sumado a ello, la actual propuesta, demuestra un compromiso con la humanidad debido a que más de 3.000 millones de personas en el mundo dependen de la biodiversidad marina y costera para su sustento (PNUD, 2015). Trayendo implicaciones económicas y sociales para tener en cuenta pues se ven afectados sectores como por ejemplo el pesquero al disminuir la calidad de la mercancía y su valor en el mercado al encontrar productos que contienen microplásticos (Ghosh et al.,2023). Esto sin contar con que este tipo de proyectos multiculturales e interdisciplinarios, como lo son el PdP, mejoran la cooperación internacional permitiendo procesos de desarrollo científico, tecnológico y de innovación. Ya que, si bien existen diversas investigaciones en torno a los microplásticos y, particularmente, su presencia en el agua, se presenta un vacío de ejecución debido a la falta de unificación, implementación e involucramiento entre los países.

Por consiguiente, desarrollar una solución sustentable y escalable para remover y/o monitorear los microplásticos del agua es un reto de grandes magnitudes que requiere de esfuerzos por parte de múltiples sectores de la sociedad. Sin embargo, desarrollar este tipo de propuestas es relevante pues aportan notablemente a la disminución de los impactos negativos de la problemática, generando alternativas de solución, creando conciencia entre las personas e inspirando a que proyectos similares puedan emerger.

## Objetivos

### General

Desarrollar una solución escalable y sustentable para monitorear y/o remover los microplásticos del agua.

### Específicos

- Entender el contexto de la problemática de los microplásticos en el agua, las causas, consecuencias, las partes implicadas y sus necesidades.
- Diseñar una propuesta de solución a la problemática que sea viable y cumpla con los requerimientos y necesidades encontradas.
- Elaborar un prototipo funcional de alta resolución que represente la solución planteada.
- Validar la solución planteada asegurando que satisfaga los requerimientos encontrados.

## **Metodología**

Para el presente proyecto, se usa la metodología “Design Thinking”, la cual está inspirada en la manera de trabajar de los diseñadores y busca que personas de diferentes disciplinas puedan encontrarse en mismas condiciones para que aporten, desde sus saberes, soluciones innovadoras a problemáticas puntuales. Es un proceso no lineal e iterativo usado para entender al usuario, asumir los retos, redefinir los problemas y generar soluciones innovadoras para prototipar y testear. (Interaction Design Foundation, 2016). Para el proyecto se tienen en cuenta dos restricciones fundamentales: el presupuesto (10.000 euros disponibles) y el tiempo (9 meses) por lo cual las 5 fases de la metodología (empatía, definición, ideación, prototipado y validación) se desarrollan de la siguiente manera:

### **1. Empatía**

En esta fase se pretende entender la problemática a través de la búsqueda de información que permita conocer aquellos retos, potencialidades, dinámicas y partes interesadas. En el caso del proyecto se desarrolla un proceso de búsqueda de referencias, entrevistas a expertos y visitas a lugares de interés, que estén relacionados con los microplásticos en el agua para así identificar su ciclo de vida, afectaciones en la sociedad, partes implicadas y soluciones existentes.

### **2. Definición**

Tras entender la problemática, se debe acotar, elegir un usuario específico y una necesidad que presente, de tal forma que se decida sobre qué se va a trabajar y el enfoque. En este caso se utiliza la herramienta de diseño “How might we?” para hacer la definición del problema, en el cual se determina el usuario, el problema y el espacio de intervención de la posible solución.

### **3. Ideación**

Como su nombre indica, en esta fase se elaboran ideas de posibles soluciones del problema que se definió en la fase anterior. Para ello, se utiliza la herramienta de “Lluvia de ideas” y una “Matriz de priorización” para plasmar todas las ideas generadas y posteriormente elegir aquella con un mayor impacto y viabilidad.

#### **4. Prototipado**

A partir de la idea elegida, se da forma a esa solución con diferentes materiales y herramientas, lo importante es que el prototipo sea la representación de la solución, que se explique por sí mismo y permita dar una idea de cómo se aplicaría esa solución.

#### **5. Validación**

Finalmente se busca ratificar que el prototipo propuesto funcione y permita solucionar eficaz y eficientemente la problemática del usuario definido, a través de entrevistas a expertos, posibles usuarios y la presentación final del proyecto se valida la solución planteada reconociendo las potencialidades y factores a mejorar.

## **Marco teórico**

### **Polímero**

Un polímero es una macromolécula compuesta por la repetición de unidades básicas llamadas monómeros, que se enlazan entre sí formando largas cadenas. Estos pueden ser de origen natural, como las proteínas y el ADN, o sintéticos, como el plástico y el nylon (European Chemicals Agency, 2017).

### **Plástico**

El plástico incluye orgánicos sintéticos o semisintéticos maleables y moldeados en objetos sólidos de diversas formas. Los plásticos son, típicamente, polímeros orgánicos de alta masa molecular y, a menudo, contienen otras sustancias. Generalmente son sintéticos, derivados mayormente de petroquímicos, aunque muchos tienen un origen parcialmente natural (Srivastava, 2023).

### **Microplásticos**

Los microplásticos son pequeñas partículas de plástico de menos de 5 mm de tamaño, derivadas tanto de productos plásticos especialmente fabricados para ser pequeños (primarios), como de la descomposición de objetos plásticos más grandes (secundarios) debido a factores ambientales. Estos pueden incluir desde partículas liberadas durante la producción industrial hasta fragmentos resultantes de la degradación de productos plásticos en el medio ambiente (Laskar y Kumar, 2019).

### **Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR)**

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son instalaciones diseñadas para tratar las aguas residuales de fuentes domésticas, comerciales e industriales. Su objetivo principal es eliminar o reducir los contaminantes, incluidos los microplásticos, para proteger la salud ambiental y humana. Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son reservorios significativos de microplásticos debido a sus diversas fuentes de influencia (Environmental Services Department City of Guelph, s.f).

### **Planta de tratamiento de agua potable**

Una planta de tratamiento de agua potable está encargada de la producción de agua potable segura que cumpla las normas de calidad definidas por las directrices nacionales e internacionales para su consumo (Ross et al., 2020).

### **Celulosa**

La celulosa es un polisacárido insoluble en agua, compuesto por unidades de dextrosa deshidratada de tipo  $\beta$ -D-piranosas, formando una estructura polimérica natural. Este compuesto se distingue por su amplia aplicación en el desarrollo de materiales emergentes, debido a sus características de ser no tóxico, renovable y degradable. La celulosa, como recurso natural renovable, juega un papel crucial en la creación de nuevos materiales gracias a su capacidad para ser transformada en nanocelulosa a través de tratamientos químicos y físicos (Liu et al., 2021).

### **Nanocelulosa**

La nanocelulosa (NC) es una forma avanzada y nanométrica de celulosa, un polímero natural renovable y no tóxico, conocido por su insolubilidad en agua. Este compuesto es esencial

para el desarrollo de nuevos materiales gracias a sus propiedades degradables y renovables. La nanocelulosa se presenta en cuatro variantes principales: nanofibras de celulosa (CNF), cristales de nanocelulosa (CNC), nanocelulosa electrohilada (ECC) y nanocelulosa sintetizada por bacterias (BNC), cada una con estructuras y funciones únicas derivadas de sus respectivos métodos de preparación. Mientras que CNF, CNC y ECC provienen de fuentes vegetales y se obtienen con la separación mecánica, la oxidación química o la hidrólisis ácida, BNC se distingue por producirlo bacterias aeróbicas, lo que abre nuevas posibilidades en campos como la medicina y la farmacéutica por sus impresionantes áreas superficiales y resistencia mecánica (Liu et al., 2021).

### **Membrana**

Una membrana es una fase permeable o semipermeable, a menudo un sólido polimérico delgado, que restringe el movimiento de ciertas especies. Esta fase adicional actúa esencialmente como una barrera entre la corriente de alimentación para la separación y una de las corrientes de producto. Esta membrana o barrera controla las tasas relativas de transporte de varias especies a través de sí misma y, por lo tanto, como con todas las separaciones, produce un producto empobrecido en ciertos componentes y un segundo producto concentrado en estos componentes. En el contexto del tratamiento de aguas, estas membranas separan las impurezas y contaminantes del agua, permitiendo así obtener un producto purificado (Scott y Hughes, 1996).

### **Cuerpo de agua**

Se entiende por cuerpo de agua a cualquier cavidad en la tierra, ya sea de origen natural o creado por el hombre, que contiene agua ya sea de forma permanente o temporal. La diversidad en sus aplicaciones, su forma y los elementos que los componen están estrechamente relacionados con el desarrollo humano y su historia (Scott y Hughes, 1996).

## Desarrollo

### Empatía

#### *¿Qué son los microplásticos?*

Los microplásticos son pequeños fragmentos de plástico entre 5 milímetros y 1 nanómetro, sin embargo, existen tantas formas de microplásticos como plásticos o derivados del plástico hay en el mundo, como es el caso de las microfibras derivadas de las telas sintéticas como el poliéster. Desde que se crearon los plásticos en los años 50, los microplásticos aparecieron en el planeta tierra, pero fue hasta el año 2000 que comenzó a ser estudiado la aparición de microplásticos en el ambiente y actualmente junto con los PFAS (sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas) son unos de los temas más relevantes en la contaminación ambiental específicamente en las aguas.

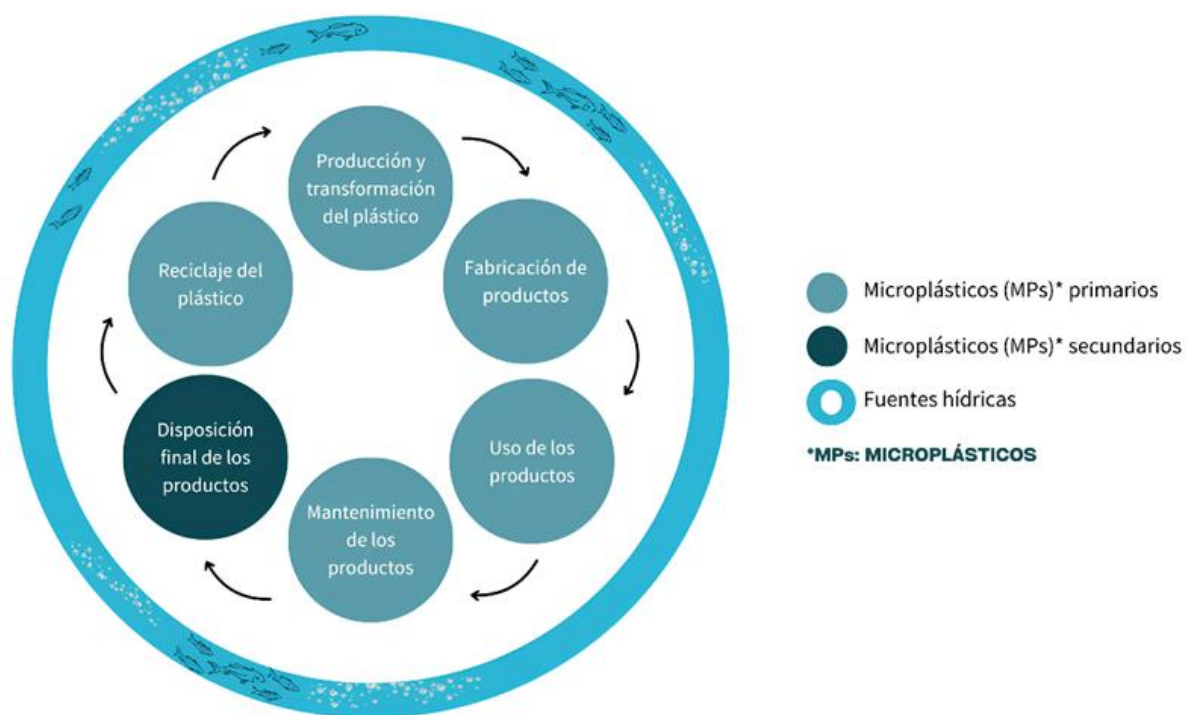
Existen 2 tipos de microplásticos según su origen, primarios y secundarios, los primarios son microplásticos que fueron creados de un tamaño pequeño para ser usados en procesos industriales y comerciales por lo cual terminan en la naturaleza en el mismo tamaño en el que fueron creados. Por ejemplo, las microesferas utilizadas para productos como las cremas dentales y los exfoliantes o los pellets usados para crear otros productos plásticos como envases o moldes. Por su parte los secundarios son microplásticos originados por la degradación de partículas de plástico más grandes (macroplásticos), debido a factores ambientales como la radiación solar y el agua.

### *Ciclo de vida de los plásticos y los microplásticos (MPs)*

Los plásticos y microplásticos tienen un ciclo de vida íntimamente relacionado. Este ciclo se puede resumir en 6 etapas y en cada una de ellas se puede llegar a liberar un tipo de microplásticos: primarios o secundarios (ver figura 1).

#### **Figura 1**

*Ciclo de vida de los plásticos y microplásticos*



**Nota:** La figura muestra las etapas en las que se producen cada uno de los tipos de microplásticos en el ciclo de vida de los plásticos.

**Fuente:** Adaptación de Boucher & Friot, (2017).

En la etapa 1 “producción y transformación del plástico” es el momento en el que se transforma el petróleo en plástico y se obtienen pellets que luego son usados en la segunda etapa para fabricar otros productos, por ejemplo, una camiseta de microfibra. A partir de esta, viene el uso y mantenimiento de los productos, como, por ejemplo, cuando se usa, lava y seca la camiseta. La etapa de disposición final de productos y reciclaje se vería representada cuando la camiseta está vieja y se tira a la basura en la que llega a los rellenos sanitarios en donde se dificulta su reciclaje y no es posible reincorporarlo en el ciclo. En el proceso de disposición final es la única etapa en la que se liberan microplásticos de tipo secundarios ya que en esta fase llegan piezas de plástico de gran tamaño que se desintegran con el paso del tiempo. Mientras que en las otras fases los microplásticos liberados son primarios ya que entran a los ecosistemas directamente como plásticos de un tamaño pequeño.

Dependiendo el tipo de producto y su proceso, este ciclo puede tener variaciones. La fase de reciclaje es la que menos se cumple en los plásticos ya que del total de residuos sólo se recicla el 6% (Soumya Shraddhya et al., 2023).

### ***Fuentes de los microplásticos***

En el contexto actual, las fuentes de microplásticos son variadas y abarcan múltiples aspectos de la vida cotidiana y la actividad industrial, contribuyendo de manera significativa a la contaminación ambiental. Este fenómeno ha surgido como una creciente preocupación debido a su persistencia y capacidad de integrarse en los ecosistemas naturales y urbanos.



Productos de cuidado personal

Primero, los productos de cuidado personal los cuales hacen parte de los microplásticos primarios, como las microesferas utilizadas en exfoliantes faciales y dentífricos, representan una fuente directa de contaminación. Estos pequeños plásticos, diseñados intencionalmente para ser minúsculos, evaden frecuentemente los filtros de las plantas de tratamiento de aguas residuales y terminan en ríos y mares, afectando a los ecosistemas acuáticos.

En segundo lugar, actividades domésticas como el lavado de la ropa constituyen una de las fuentes más significativas de contaminación por microplásticos en los océanos. Esto debido a que la ropa y otros textiles están elaborados de materiales sintéticos como poliéster, nylon y acrílico, los cuales liberan microfibras durante los ciclos de lavado. Estas microfibras son un tipo de microplásticos secundario que se desprende por la degradación física y el desgaste de los textiles.



Actividades domésticas



Uso y eliminación final de plásticos

Además, la incorrecta disposición de artículos plásticos más grandes, como botellas y bolsas de plástico hace que terminen en los ecosistemas y se fragmenten bajo la influencia de factores ambientales como la radiación ultravioleta y el desgaste mecánico. Este proceso de degradación resulta en la formación de microplásticos que contaminan suelos y cuerpos de agua, posando amenazas a los organismos que ingieren estos fragmentos.



Escorrentía del transporte

Finalmente, la producción industrial y el procesamiento de materiales plásticos pueden generar microplásticos que se dispersan en el aire o se integran en los efluentes que fluyen hacia sistemas acuáticos. Al igual que el

desgaste de neumáticos y la erosión de pinturas y recubrimientos que también contribuyen significativamente a la carga de microplásticos en el ambiente (Ghosh et al., 2023).

### *Efectos de los microplásticos*

La presencia de microplásticos en los ecosistemas ha generado efectos nocivos tanto en los organismos que los habitan como en los seres humanos. Estos pequeños fragmentos de plástico se encuentran en ambientes terrestres, de agua dulce y marinos, afectando significativamente sus propiedades. En los suelos, los microplásticos reducen la capacidad del suelo para retener agua y afectan negativamente el ciclo de nutrientes. Los microplásticos bloquean los poros del suelo, impidiendo la infiltración de agua y aumentando la evaporación, lo que puede llevar a la formación de grietas. Además, esta contaminación perjudica a las bacterias beneficiosas del suelo, como las rizobacterias, esenciales para el crecimiento de las plantas y su resistencia al estrés ambiental (Bostan et al., 2023).

De igual forma, en los ecosistemas acuáticos, los microplásticos interrumpen la cadena alimentaria y deterioran la salud de los organismos. Los animales marinos a menudo confunden estos fragmentos con alimento, lo que provoca la ingestión y acumulación de microplásticos en sus cuerpos. Esto puede causar bloqueos en el sistema digestivo y daños internos, además de malnutrición, ya que los estómagos se llenan de material sin valor nutricional. Asimismo, los microplásticos afectan los sistemas reproductivos de los animales, reduciendo sus poblaciones y alterando su comportamiento, haciéndolos más vulnerables a los depredadores (Ghosh et al., 2023).

Por otro lado, aunque el impacto de los microplásticos en los suelos y en los ecosistemas acuáticos está bien documentado, sus efectos en la calidad del aire necesitan más investigación. Se

ha sugerido que los microplásticos podrían alterar el flujo de gases como el dióxido de carbono, el dióxido de nitrógeno y el metano, con implicaciones significativas para el clima y la salud ambiental. Comprender estos efectos es crucial para desarrollar estrategias efectivas de mitigación (Ghosh, 2023; Bostan et al., 2023).

En cuanto a los efectos de los microplásticos en la salud humana dependen del tipo de polímero, el tamaño de las partículas, su forma y la presencia de aditivos plásticos. Por su parte, los microplásticos pueden ingresar al cuerpo a través de la inhalación, la ingestión y la exposición cutánea. La ingestión es una de las rutas más comunes, permitiendo que los microplásticos se acumulen en el tracto digestivo y otros órganos. Una vez dentro del sistema digestivo, estos pueden causar daños en la pared intestinal, provocando inflamación, estrés oxidativo y alteraciones en el microbiota intestinal, lo que podría desencadenar desórdenes autoinmunes, cáncer y enfermedades neurodegenerativas (Ghosh, 2023). Además, los microplásticos pueden transportar contaminantes orgánicos absorbidos por los tejidos de los animales marinos y transferirse a los humanos a través del consumo de alimentos contaminados, aumentando así los riesgos para la salud (Bostan et al., 2023).

Asimismo, la inhalación de microplásticos presenta serios riesgos para la salud. Estos fragmentos pueden causar irritación y daño respiratorio, contribuyendo al desarrollo de enfermedades como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y el asma. Por otro lado, la exposición cutánea, aunque menos estudiada, está vinculada a la irritación e inflamación de la piel, y podría causar alteraciones endocrinas y toxicidad reproductiva (Ghosh, 2023).

Adicionalmente, los impactos de los microplásticos se extienden también a la salud mental y el comportamiento social. Estudios han encontrado que pueden alterar los ritmos circadianos y la producción de melatonina, lo que provoca problemas de sueño. Además, la exposición a microplásticos se ha relacionado con trastornos metabólicos como la obesidad y la diabetes, debido a la alteración de la regulación hormonal y el metabolismo. (Ghosh, 2023).

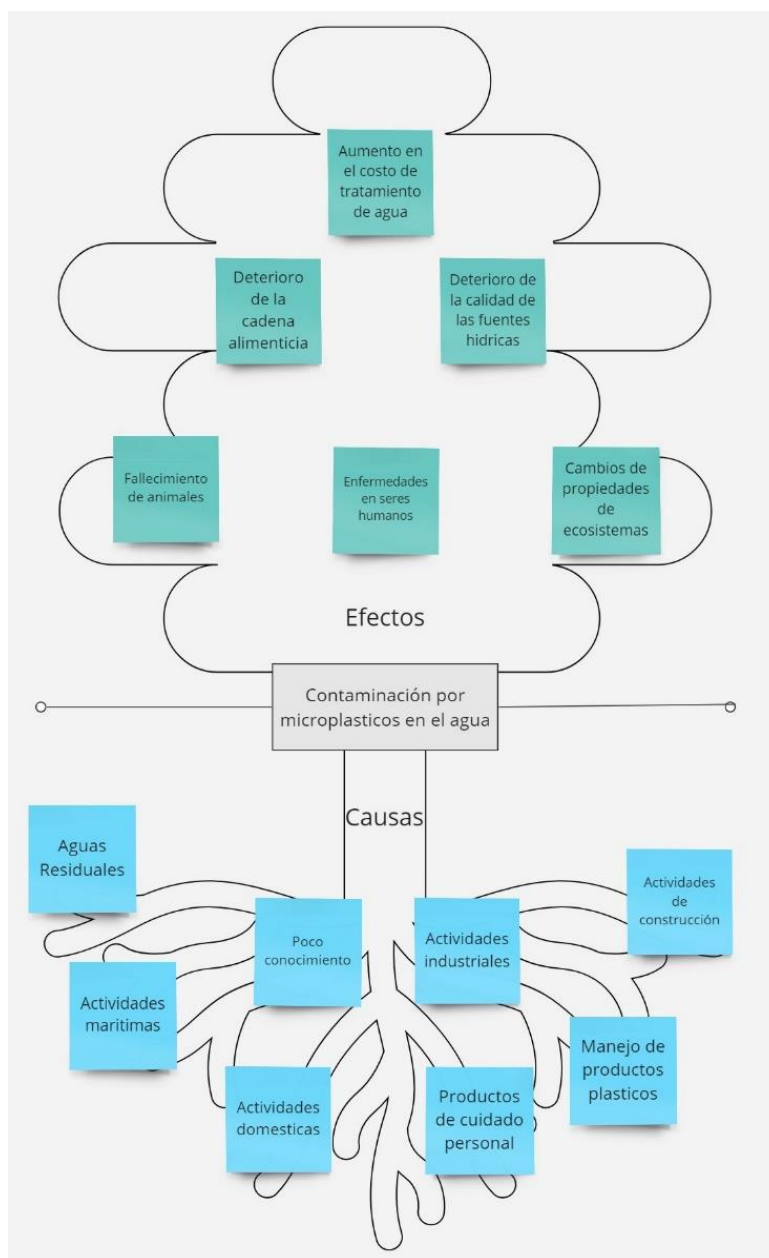
Finalmente, es evidente que los microplásticos no solo afectan el medio ambiente, sino que también representan una amenaza significativa para la salud humana. La comprensión y mitigación de estos impactos es crucial para la preservación de la biodiversidad y el bienestar humano.

### ***Árbol de problema***

La contaminación por microplásticos en el agua es un problema ambiental crítico que afecta diversas dimensiones de nuestro ecosistema y la salud humana. El árbol de problemas (ver figura 2) ilustra las causas y efectos de esta contaminación, ofreciendo una visión integral de sus implicaciones. Esta ayuda visual y conceptual puede asistir en la comprensión de la magnitud y complejidad de la contaminación por microplásticos en el agua. Abordar cada una de estas causas y mitigar sus efectos es fundamental para preservar la salud de nuestros ecosistemas, reducir las enfermedades en los seres humanos y mejorar la calidad de nuestras fuentes de agua.

**Figura 2**

*Árbol de la problemática de los microplásticos en el agua*



**Nota:** La figura muestra la problemática en el centro, sus causas y efectos.

**Fuente:** Elaboración propia

### ***Mapa de actores***

Para un mejor entendimiento del contexto y cómo se relaciona el problema con este, se hace uso de un mapa de actores (ver figura 3). Este presenta una herramienta visual diseñada para identificar y categorizar a los principales actores involucrados en el problema de la contaminación por microplásticos en el agua. El mapa organiza a estos actores en cuatro niveles jerárquicos, reflejando sus roles y grados de implicación en la generación, impacto y solución del problema.

#### **Nivel central: reto.**

- **Microplásticos en el Agua:** Este es el foco principal del mapa, representando el problema central de la contaminación por microplásticos en cuerpos de agua. Este núcleo refleja el impacto directo y tangible de los microplásticos, afectando la calidad del agua, la salud de los ecosistemas acuáticos y, en última instancia, la de los seres humanos.

#### **Nivel 1: posibles usuarios.**

Este nivel incluye a aquellos que utilizan directamente los recursos afectados por los microplásticos y dependen críticamente de la calidad del agua para sus actividades cotidianas.

- **Humanos:** Las personas afectadas por la contaminación, ya sea por el consumo directo de agua contaminada o de manera indirecta por el consumo de alimentos contaminados, tanto animales como vegetales, lo cual puede impactar la salud, la calidad del suministro de agua y la seguridad alimentaria.
- **Productores Primarios:** Agricultores, ganaderos y pescadores que dependen del agua para sus actividades. La contaminación de su fuente hídrica no solo afecta la productividad y

puede propagar enfermedades, sino que también pone en riesgo o deteriora la seguridad de los productos de consumo.

### **Nivel 2: personas afectadas.**

Este nivel incluye a entidades y organizaciones que están directamente afectadas por la contaminación y tienen un rol significativo en la gestión del problema.

- **Autoridades Gubernamentales:** Entidades responsables de crear y hacer cumplir las regulaciones ambientales y de salud pública. Su rol es crucial en la implementación de políticas efectivas para controlar la contaminación. En Colombia, el control por parte de estas entidades es deficiente, lo que agrava el problema.
- **Vida Marina:** Las especies marinas se ven afectadas no solo por el consumo directo de microplásticos, sino también por la presencia y acumulación de estos, que pueden alterar las características de su hábitat y obligarlos a migrar debido a los altos niveles de toxicidad.

### **Nivel 3: Contribuyentes.**

Este nivel incluye a los actores que, aunque indirectamente involucrados, contribuyen significativamente al problema y tienen el potencial de desarrollar soluciones.

- **Agencias Gubernamentales:** Organismos específicos que gestionan el agua, la salud y el medio ambiente. Estos están en capacidad de implementar y supervisar programas y proyectos destinados a reducir la contaminación por microplásticos. Actualmente en Colombia, sin embargo, no se cuenta con este tipo de iniciativas, al ser un problema nuevo y poco conocido.

- **Industrias:** Empresas involucradas en la producción, gestión y reciclaje de plásticos, así como aquellas que utilizan plásticos en sus productos o procesos. Tienen la responsabilidad de adoptar prácticas más sostenibles, teniendo en cuenta las grandes externalidades que están produciendo, priorizando únicamente el bienestar financiero sin considerar el gran impacto social.
- **ONGs:** Organizaciones no gubernamentales que abogan por la protección del medio ambiente y la salud pública. Juegan un papel vital en la educación y concienciación de la sociedad sobre los problemas de los microplásticos.

#### **Nivel 4: Expertos.**

Este nivel incluye a profesionales y organizaciones que proporcionan conocimiento especializado, investigación y desarrollo de tecnologías para mitigar el problema.

- **Oceanógrafos:** Científicos que estudian los océanos y pueden proporcionar datos cruciales sobre la contaminación por microplásticos. Sus investigaciones ayudan a comprender el alcance y los efectos de la contaminación.
- **Diseñadores:** Profesionales que pueden influir en el desarrollo de productos sostenibles y libres de microplásticos. Su rol es crucial en la creación de alternativas a los plásticos convencionales.
- **Biólogos:** Investigadores que examinan los efectos de los microplásticos en la fauna y flora. Su trabajo es esencial para entender cómo los microplásticos afectan la biodiversidad.
- **Ingenieros:** Expertos que desarrollan tecnologías para la mitigación y el tratamiento de la contaminación. Pueden diseñar sistemas de filtración y tratamiento de agua más eficaces.

- **Abogados:** Profesionales del derecho que trabajan en la creación y defensa de leyes ambientales. Su papel es importante para asegurar que existan marcos legales efectivos para combatir la contaminación.
- **Administradores:** Gestores de políticas y proyectos relacionados con la protección ambiental y la gestión del agua. Aseguran la implementación eficiente de estrategias y políticas.

Esta herramienta gráfica permite comprender mejor en qué punto se sitúa el problema, las posibles interacciones, usuarios y puntos que se deben considerar para realizar una mitigación eficaz de la contaminación por microplásticos. La colaboración efectiva entre todos estos actores es esencial para abordar de manera integral y sostenible este desafío ambiental.

### Figura 3

*Mapa de actores de la problemática de los microplásticos en el agua*



**Nota:** La figura muestra el mapa de actores involucrados en la problemática de los microplásticos en el agua, empezando en el centro con el reto/problema y terminando con los expertos del problema.

**Fuente:** Elaboración propia

### *Usuario objetivo*

#### **Primera iteración de la definición del usuario.**

Después de conocer cuáles son los principales actores, se inició con la definición de un posible usuario o cliente. Durante la primera interacción con un mejor conocimiento del ciclo de agua, los hábitos de consumo de los humanos y animales, se llegó al consenso que partiendo de la base que en las actividades industriales y domésticas son las que mayor cantidad de microplásticos aportan al ecosistema, se decide poner el punto focal en el momento que todos estos desechos convergen, las plantas de tratamiento de agua residual y potable, siendo en la primera el punto de salida del agua hacia la fuente. La segunda es el momento en que toma el agua de la fuente y se procesa para usarla en las actividades cotidianas de los seres humanos.

Partiendo de este supuesto se realizaron múltiples entrevistas e investigación acerca del tema, también se hizo uso de diversas herramientas propuestas por nuestra metodología “Design Thinking” para la definición de este usuario como lo son el perfil del usuario (figura 4), el mapa de empatía (figura 5) y un storytelling (figura 6). De estos podemos definir a nuestro usuario como:

“Carlos, un dedicado operador de tratamiento de aguas de 38 años, está comprometido con garantizar la pureza y seguridad del agua mediante el uso de tecnologías avanzadas y metodologías innovadoras. Motivado por su preocupación por la salud pública y el medio ambiente, Carlos se

enfrenta a desafíos como las limitaciones tecnológicas y la falta de financiación. Sin embargo, su deseo de aprender y colaborar con expertos en diversos campos lo impulsa a buscar soluciones efectivas para combatir la contaminación por microplásticos. A través de su trabajo y la constante adaptación a nuevos retos, Carlos se esfuerza por mejorar continuamente sus competencias y contribuir significativamente a la sostenibilidad ambiental. “.

## Figura 4

### Perfil del usuario

**CARLOS**

**¿QUIÉN ES?**  
Me llamo Carlos, tengo 38 años, soy un dedicado y cualificado Operador de Tratamiento de Aguas. Mi trabajo consiste en garantizar que el agua sea segura y limpia mediante su tratamiento, análisis y procesamiento en una instalación de tratamiento.

**NECESITA**  
Necesito el apoyo de mi organización para probar y desarrollar nuevas metodologías. También necesito una red de colaboración con expertos en materiales plásticos, toxicología y ecología para ampliar mis conocimientos y mi eficacia en este campo.

**BIOGRAFÍA**  
Con una técnica en tratamiento de aguas y varios años de experiencia en este campo, soy conocedora de diversos métodos y tecnologías de tratamiento de aguas. Estoy certificada en normas de calidad y seguridad del agua y tengo un firme compromiso con la sostenibilidad medioambiental.

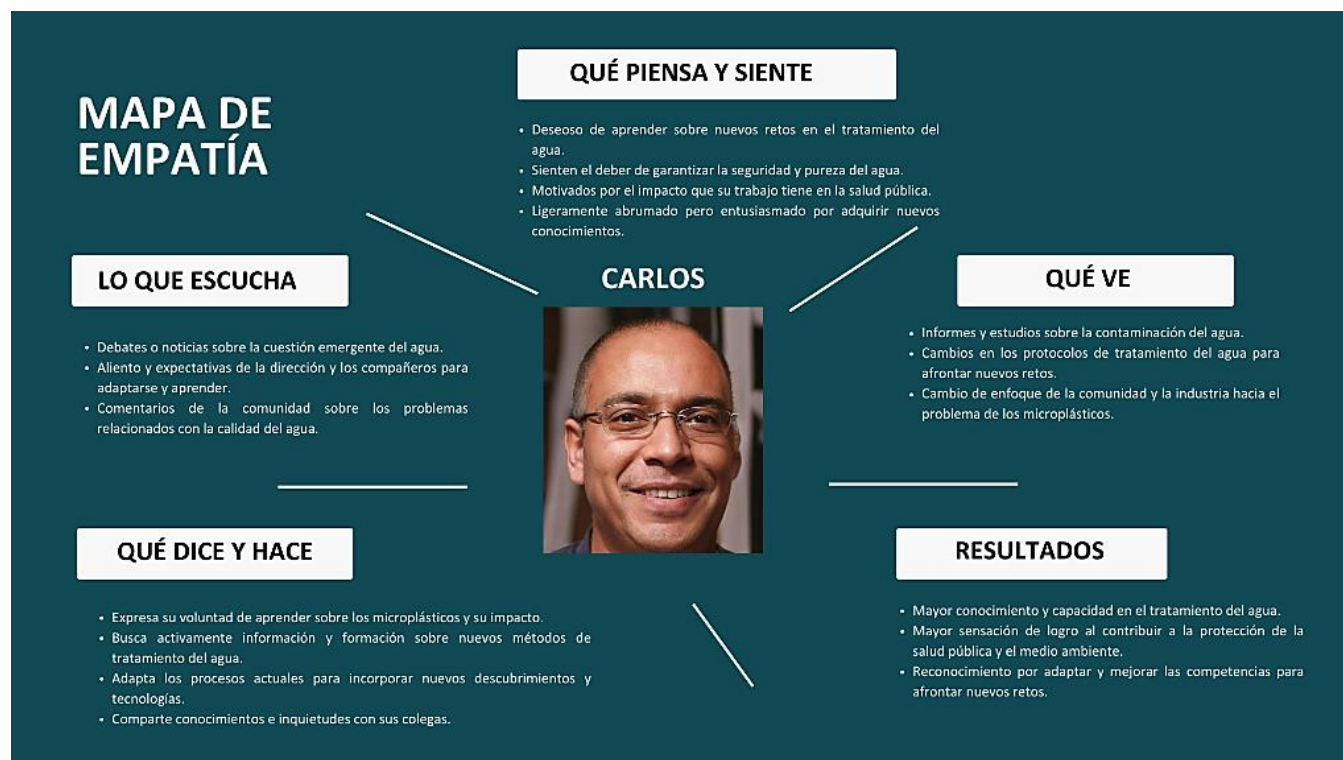
**¿QUÉ LO MOTIVA?**  
Me motiva mucho la oportunidad de hacer una contribución significativa al medio ambiente y la salud pública reduciendo los contaminantes en el agua. La posibilidad de ser pionera en nuevas técnicas y soluciones para este reto medioambiental mundial me impulsa a mejorar continuamente en mi campo.

**METAS PERSONALES**  
Mi principal objetivo es garantizar que el agua que trato esté lo más limpia posible y también quiero colaborar en investigaciones para comprender mejor los nuevos métodos de tratamiento del agua.

**¿QUÉ LE DESAGRADA?**  
Enfrentarse a limitaciones tecnológicas y a la falta de financiación para nuevos métodos de tratamiento del agua. Además, la falta general de concienciación o interés por el problema del agua y su impacto medioambiental puede resultar frustrante y obstaculizar los avances en este ámbito crítico.

**Nota:** En la figura se detallan los rasgos representativos del usuario objetivo, abarcando quién es, su biografía, metas personales, necesidades, motivaciones y desagrados.

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5***Mapa de empatía del usuario objetivo*

**Nota:** En la figura se detallan aspectos importantes del usuario objetivo buscando entender su posición y cotidianidad.

**Fuente:** Elaboración propia

## Figura 6

### Storytelling del usuario objetivo

# STORYTELLING

## CARLOS



‘El viaje de Julio de la incertidumbre a la defensa del medio ambiente’

Carlos, operario de una planta de tratamiento de aguas, siempre se ha enorgullecido de garantizar la seguridad y pureza del agua que procesa. Sin embargo, un día, durante una reunión de personal, oyó hablar por primera vez de los microplásticos. Desconocía el concepto, pero su preocupación por la salud pública le llevó a profundizar en él. Pasó las tardes aprendiendo sobre microplásticos, descubriendo cómo estos diminutos contaminantes afectaban a los ecosistemas acuáticos y a la salud humana. El creciente malestar de Julio le llevó a darse cuenta de que estos contaminantes podrían haberse estado colando por su sistema de tratamiento sin que se diera cuenta. Decidido a cambiar las cosas, Julio planteó a sus superiores la posibilidad de adaptar la planta para hacer frente a este nuevo reto.



**Nota:** En la figura se muestra una pequeña narración sobre una situación que se le presentó al usuario objetivo, dando contexto para conocerlo más a fondo.

**Fuente:** Elaboración propia

\*La segunda iteración de la definición del usuario se explica en el apartado “Definición final”.

## *Debriefing*

El reto propuesto consistía en "Desarrollar un sistema escalable y sostenible que ayude en la monitorización y/o eliminación de microplásticos en las aguas de la Tierra". Este enunciado se desglosa en varios componentes clave cuyo entendimiento profundo es crucial para orientar adecuadamente el proyecto.

Primero, el término "**desarrollar**" implica la creación de algo nuevo o la mejora significativa de una tecnología existente. Esto sugiere un proceso de innovación y experimentación continua, donde el objetivo es concebir un sistema que no solo sea efectivo, sino también que pueda ser implementado en el contexto actual de gestión ambiental.

La palabra "**escalable**" refiere a la capacidad del sistema para adaptarse a diferentes tamaños o magnitudes de operación. Entender esta característica fue fundamental para asegurar que el proyecto no se limitase a pequeñas pruebas piloto, sino que pudiese expandirse y adaptarse a diversas condiciones geográficas y volúmenes de agua.

"**Sostenible**" indica que el sistema debe operar de manera que no agote los recursos naturales ni cause daño ambiental a largo plazo. Esto llevó a considerar fuentes de energía renovables, materiales biodegradables o reciclables y tecnologías que minimicen la emisión de contaminantes. La sostenibilidad también abarca la viabilidad económica, asegurando que el sistema pueda mantenerse operativo sin requerir inyecciones constantes de financiación.

La "**monitorización**" en este contexto se refiere a la capacidad de detectar y cuantificar la presencia de microplásticos en el agua. Comprender este término orientó el proyecto hacia el desarrollo de tecnologías que pudieran proporcionar datos precisos y en tiempo real sobre la

contaminación por microplásticos, lo cual es esencial para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos y la eficacia de las medidas adoptadas.

Finalmente, "**eliminación**" destaca la necesidad de no solo identificar los microplásticos, sino también de retirarlos de manera efectiva del ambiente acuático. Este aspecto del reto sugiere una acción activa para reducir la carga de microplásticos, orientando el proyecto hacia soluciones que intervengan físicamente en los cuerpos de agua para extraer o descomponer estos contaminantes.

El entendimiento detallado de cada una de estas palabras clave permitió que el proyecto se orientase de manera que abordase tanto los aspectos técnicos como ambientales y económicos del problema de los microplásticos, con el objetivo final de desarrollar un sistema integral que pudiese ser adoptado a gran escala y contribuir significativamente a la preservación de los recursos hídricos del planeta.

### *Entrevistas*

Un componente muy importante en la etapa de empatía para tener un mejor entendimiento del problema son las entrevistas con expertos. Dado que el tema central del problema a resolver es tan específico y está fuera de los conocimientos generales y enfocados de las diferentes carreras que conformaron el equipo, fue necesario realizar una primera ronda de entrevistas con profesionales y maestros para aumentar la apropiación de conocimiento básico acerca de esta problemática. Por tanto, se entrevistó a los siguientes profesionales y docentes:

- César Cañón (Ingeniero civil especializado en acueductos): En esta primera entrevista, se mencionó por primera vez la planta de tratamiento de agua residual como opción para posicionar la solución. Además, en esta reunión, se proporcionó una breve clase magistral

sobre el funcionamiento general de este tipo de instalaciones en Colombia. La información más importante suministrada fue: “Consideren muy bien todos los aspectos de su posible solución, los insumos, el proceso de producción, uso y fin de vida del producto. Asegúrense de no contaminar más de lo que descontaminan las fuentes hídricas.”

- Sandra Galarza (Ingeniera civil con un máster en sistemas de agua y tratamiento de aguas pluviales): La maestra Sandra Galarza fue sin lugar a dudas una de las personas más importantes en el desarrollo del proyecto, brindando conocimiento en diversos temas como el ciclo del agua y el funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua residual en la ciudad de Cali y en Colombia. Es una de las personas con mayor conocimiento acerca de los contaminantes emergentes, incluidos los microplásticos. Además, suministró documentación abundante y oportuna relacionada con la problemática y brindó acompañamiento en la validación de conceptos e hipótesis para la concepción de la solución.
- Lina Granobles (directora del Laboratorio de Investigación Medioambiental): Con esta entrevista, se logró profundizar sobre las técnicas de separación de sólidos suspendidos y las regulaciones sanitarias que debe cumplir toda empresa o persona que haga uso industrial del agua como suministro.

Posterior a esto, con una mayor comprensión de los conceptos básicos y la decisión de situar la solución dentro de una planta de tratamiento de agua, se realizó una segunda ronda de validación de conceptos y búsqueda de conocimiento del estado del arte de métodos de filtración de microplásticos en Colombia y en el mundo, entrevistando a profesionales en el campo de tratamiento de aguas. Estos fueron:

- Isabel Cipriani (Profesora Investigadora de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador PUCE): La máxima de esta entrevista fue la validación de diferentes hipótesis sobre la problemática. También, suministró al equipo una clase magistral basada en los diferentes métodos de filtración de sólidos en suspensión.
- Davis Birne Gómez (Ingeniero sanitario y posgrado en Gestión Medioambiental): Durante el desarrollo de esta entrevista con un experto en el campo de la gestión medioambiental, con un amplio conocimiento en el tratamiento del agua, fue posible realizar la actualización del estado del arte a nivel internacional, mostrando de forma práctica y clara los esfuerzos que están haciendo otros países para resolver este tipo de problemática, por ejemplo, Estados Unidos.
- Julio César Galeano (Técnico de planta de tratamiento de aguas de la Universidad Pontificia Javeriana de Cali): Siendo esta la primera visita a una planta de tratamiento de agua, permitió plasmar todos los conceptos teóricos en un espacio físico y conocer su funcionamiento práctico. Se tuvo el acercamiento a un posible usuario.
- Mario Andrés Perea (Químico y Analista Medioambiental MBA en Colgate Palmolive): Esta entrevista permitió profundizar en los procesos de filtración de agua, también, que todo sistema de tratamiento de agua puede aprovechar de las características del agua que le ingresa para un pre tratamiento.
- Carlos Arenas (Operador de la planta de tratamiento de aguas de Colgate Palmolive): Esta entrevista permitió la expansión del conocimiento de funcionamiento de una planta de tratamiento de agua residual, explicando el funcionamiento detallado del sistema de

tratamiento de agua de la empresa Colgate-Palmolive en la ciudad de Cali, siendo esta una de las mejores de la industria eliminando más del 90% de contaminantes.

- Juan Carlos Bastidas (jefe de Investigación de Smurfit Kappa Cartón de Colombia): En esta visita se logró conocer y entender un tipo específico de tratamiento secundario, los biodigestores, lo cual abrió la posibilidad de extrapolar este tipo de filtración para su problemática.

Durante la fase de empatía no se realizaron entrevistas a expertos específicamente sobre la problemática de los microplásticos ya que luego de una búsqueda se encontró que al ser un tema tan reciente hay pocas personas especializadas en el tema. Las entrevistas que se hicieron estuvieron enfocadas en entender el ciclo del agua, el funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua, el contexto actual de la contaminación del agua en Colombia y partes del mundo.

### ***Insights***

Uno de los puntos más importantes de la etapa de empatía es el descubrimiento o construcción de los insights que servirán como guía en todo momento para evaluar o identificar si el proyecto está siendo llevado por el camino correcto; se podría decir que son la brújula del proyecto. Para este proyecto se obtuvieron los siguientes insights clave relacionados con la contaminación por microplásticos en el agua:

- La salud de las personas está directamente relacionada con el agua que beben.
- El proceso de depuración del agua sería más económico si la devolviéramos lo más parecida posible a como se tomó, o incluso mejor.

- Cada planta de tratamiento de aguas residuales tiene sus particularidades, y es importante conocerlas para implementar una solución adecuada.
- Es crucial tener en cuenta los avances tecnológicos en la materia y tratar de utilizarlos para crear una solución innovadora.
- En América Latina y en Colombia, el tema de los microplásticos es muy nuevo.
- Nuestra solución no debe generar más contaminación de la que elimina.
- Colombia tiene grandes fallos en la forma de tratar las aguas residuales

**Definición: primer acercamiento**

Tras realizar un proceso de empatía en el que se conoció el problema, las personas involucradas y las implicaciones, es posible comenzar la definición en la que a partir de la información recolectada se puede trazar un panorama más claro de la problemática y enfocar desde qué perspectiva se quiere abordar. En este caso se hizo un primer acercamiento a la definición del problema teniendo en cuenta el reto que había sido propuesto, dando como resultado la siguiente:

***“Desarrollar un sistema escalable y sostenible que ayude a remover de microplásticos en cuerpos de agua dulce”***

***¿Por qué remover?***

La selección del proceso de remoción de microplásticos se fundamenta en la disponibilidad de tecnologías avanzadas y en la abundancia de información técnica que facilita su implementación. Durante la etapa de empatía del proyecto, se identificó la creciente preocupación por la contaminación por microplásticos en cuerpos de agua y su impacto ambiental.

Además, la afinidad del equipo por abordar la remoción de microplásticos se justifica por la relevancia y urgencia del problema. Esta combinación de motivación, disponibilidad tecnológica y respaldo científico fortalece la capacidad del equipo para desarrollar soluciones innovadoras y escalables para la contaminación por microplásticos.

***¿Por qué cuerpos de agua dulce?***

El ciclo del agua describe cómo el agua se mueve y dónde se almacena en la Tierra, existiendo en forma líquida, sólida o gaseosa. En la superficie terrestre, el agua se almacena en ríos, lagos, embalses, y humedales, siendo estos últimos reservorios clave de agua dulce. Aunque

los ríos representan menos de la cantidad total de agua, son cruciales en el transporte de agua desde el interior de los continentes hacia los océanos. Los ríos recogen agua de precipitaciones, deshielo y escorrentías, y la conducen hacia cuerpos de agua más grandes.

Durante su trayecto, los ríos interactúan con el suelo y el subsuelo, facilitando la infiltración y recarga de acuíferos. A medida que el agua se desplaza, puede cambiar de estado entre líquido, sólido y gas. La evaporación y la evapotranspiración llevan el agua desde la superficie terrestre y los océanos a la atmósfera. Luego, esta agua retorna a la superficie en forma de precipitación. En tierra, el agua se filtra a través del suelo o fluye en forma de escorrentía hacia los ríos, que finalmente desembocan en los océanos, cerrando así el ciclo.

Los océanos almacenan aproximadamente el 96% de toda el agua en la Tierra, mientras que los ríos contienen una fracción mucho menor. La función de los ríos es vital, ya que son las vías por las que se transporta el agua dulce, proporcionando nutrientes y sostenimiento a diversos ecosistemas antes de llegar a los océanos. Este movimiento continuo del agua, impulsado por la energía solar y la gravedad, asegura la distribución global del recurso hídrico, a pesar de las diferencias en proporción y tamaño entre los ríos y los océanos.

Por lo cual, se escogieron los cuerpos de agua dulce teniendo en cuenta que en comparación a los océanos son de menor tamaño, no representan el final del recorrido del ciclo del agua y permiten que al eliminarse los microplásticos que en ellos se encuentran, estos dejen de llegar a los océanos o cuerpos de agua más grandes; esto sin contar con que son los cuerpos de agua dulce las principales fuentes de las cuales los seres humanos toman agua para potabilizarla. (Water Science School, 2019)

## Ideación

A partir del primer acercamiento de definición se hizo un proceso de ideación para decidir:

1. El tipo de método de eliminación (remover) que se iba a utilizar
2. Las maneras en las que se podría aplicar ese método de eliminación.

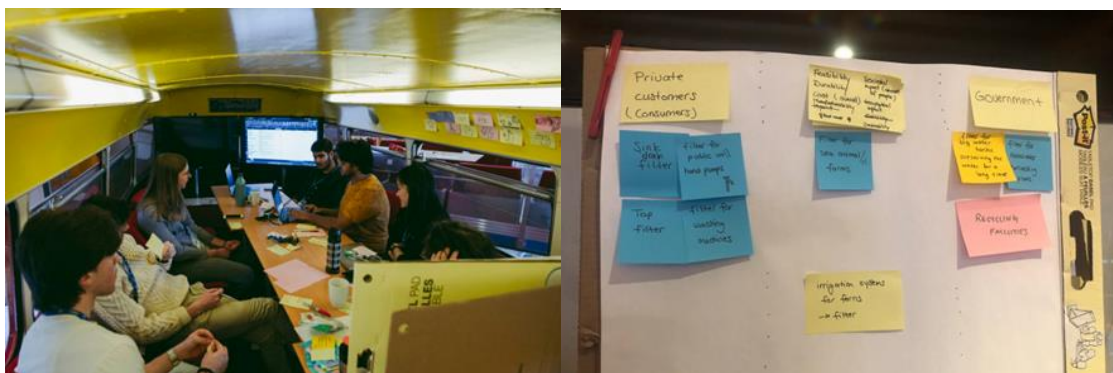
Se prefirió la elección de los métodos de filtración y ultrafiltración para remover microplásticos del agua dulce debido a su alta eficiencia en la eliminación de partículas de diversos tamaños. Se ha demostrado que los dispositivos de tratamiento de agua que incorporan microfiltración pueden eliminar entre el 78% y el 100% de fragmentos de microplásticos, dependiendo del tamaño de los poros de la membrana. Este método es particularmente efectivo para partículas pequeñas, lo que lo hace ideal para la eliminación de microplásticos (Cherian et al., 2023).

Además, la capacidad de estos métodos para manejar grandes volúmenes de agua es crucial para su aplicación a escala industrial y municipal. La ultrafiltración no solo elimina microplásticos de manera efectiva, sino también otros contaminantes como compuestos orgánicos y microorganismos patógenos, mejorando así la calidad general del agua tratada. Esta combinación de alta eficiencia y versatilidad hace que la filtración y ultrafiltración sean métodos superiores para la purificación del agua dulce frente a la creciente preocupación por la contaminación por microplásticos.

Al haber escogido el método de ultrafiltración y filtración, se hizo una lluvia de ideas para determinar formas en las que podríamos aplicarlo. Obteniendo los siguientes resultados:

## Figura 7

*Sesión grupal de lluvia de ideas*



**Nota:** la ilustración muestra al equipo internacional en una sesión de lluvia de ideas en su viaje a Ginebra.

## Figura 8

*Ideas propuestas por el equipo*



**Nota:** En la figura se encuentran esquematizadas las ideas que formuló el equipo.

**Fuente:** Elaboración propia

### *Priorización de las ideas*

**Tabla 1**

*Matriz de priorización de ideas*

Variables	Definición	Peso	Filtro para desagüe del fregadero	Filtro de grifo	Filtro para lavadoras	Filtro para instalaciones de reciclaje	Filtro para PTAR
<b>Viabilidad</b>	Capacidad para tener un producto acabado en mayo	<b>2.4</b>	<b>7.5</b>	<b>8.3</b>	<b>7.65</b>	<b>6.085</b>	<b>5.2</b>
<b>Durabilidad</b>	Frecuencia de cambio del filtro	<b>4</b>	<b>7.05</b>	<b>8.1</b>	<b>6.95</b>	<b>3</b>	<b>4.7</b>
<b>Control del final del ciclo de vida</b>	¿Qué hacemos con los microplásticos después de filtrarlos?	<b>5</b>	<b>4.1</b>	<b>4.2</b>	<b>5.1</b>	<b>8.3</b>	<b>7.5</b>
<b>Impacto social</b>	Número de personas sobre las que vamos a incidir	<b>4.4</b>	<b>5.4</b>	<b>5.5</b>	<b>6.3</b>	<b>7.6</b>	<b>9</b>
<b>Deseabilidad</b>	¿Están los clientes dispuestos a utilizarlo?	<b>3.3</b>	<b>7.5</b>	<b>7.8</b>	<b>7.25</b>	<b>5.9</b>	<b>6.25</b>
<b>Total</b>			<b>115.21</b>	<b>123.26</b>	<b>123.305</b>	<b>121.114</b>	<b>129.005</b>

**Nota:** Los datos obtenidos son un promedio obtenido de los puntajes que cada integrante del equipo le asignó a las ideas.

**Fuente:** Elaboración propia

A partir de la priorización de ideas, se obtuvo que la idea más marcada fue la de desarrollar un filtro aplicado en las PTAR, considerando las variables de viabilidad, durabilidad, control del final del ciclo de vida, impacto social y deseabilidad.

### **Definición final**

Posterior al proceso de ideación se hizo una segunda aproximación a la definición del problema, centrándolo con un usuario y contexto específico, haciendo uso de la herramienta “How might we?” obteniendo el siguiente enunciado:

*¿Cómo crear un sistema de remoción de microplásticos en las PTAR, que pueda ser usada por los operarios para evitar que los microplásticos lleguen a los ríos?*

### **¿Por qué PTAR?**

Las plantas de tratamiento de aguas residuales son lugares donde llegan las aguas residuales domésticas y/o industriales. Cada planta tiene sus características propias, pues su funcionamiento depende mucho del tipo de agua que llega a ellas, de la cantidad de etapas de tratamiento, de los procesos que utiliza en cada una, si son públicas o privadas, y del tipo de regulaciones del territorio en el que se encuentra.

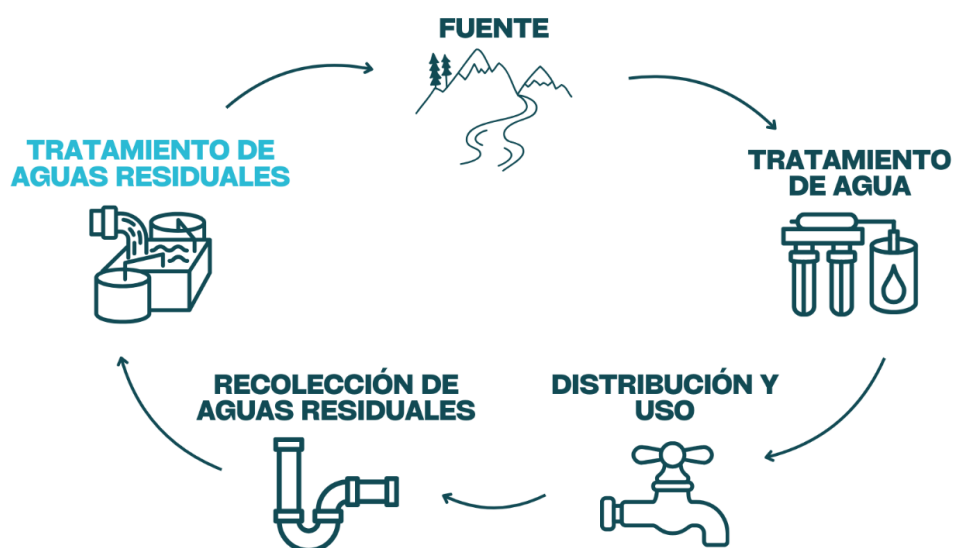
Tal como lo resalta Iyare et al. (2020) los efluentes de las PTAR son rutas importantes por medio de las cuales entran microplásticos a los ecosistemas acuáticos. Si bien los procesos de las PTAR no están diseñados para remover específicamente los microplásticos, existen tecnologías de estos procesos que pueden llevar a eliminar gran parte de estos microplásticos como es el caso de países como Suecia, Finlandia, Estados Unidos y Dinamarca en las que se logra remover entre el 97%-98% de los microplásticos presentes en sus aguas residuales. Sin embargo, estas cifras a pesar de abarcar un porcentaje alto de remoción, el restante representa una liberación alta de microplásticos al ambiente debido a los grandes volúmenes de agua con los que se trabaja en estas plantas.

Por otro lado, países con tecnologías menos avanzadas como es el caso de Colombia, tienen un vacío de información y de ejecución en el procesamiento de aguas residuales. Según lo observado en las visitas (siguiente apartado) y en las búsquedas realizadas, existe poca información disponible que hable de la remoción de microplásticos en las PTAR de Colombia, incluso se pudo encontrar que existen ciudades del país que no cuentan con estas plantas y que aquellas que si las poseen no cumplen con los estándares mínimos de los primeros dos tratamientos.

Además, como se observa en la figura 9, la manera como los humanos usamos el agua es cíclica, la tomamos de una fuente, luego la tratamos, la usamos, generamos aguas residuales y luego las sometemos a procesos para que regresen a la fuente. Por lo cual, se pudo entender que, si es posible eliminar los microplásticos en las PTAR, estaremos evitando que estos lleguen a la fuente de agua, beneficiando no sólo a los seres humanos sino también a los ecosistemas acuáticos y a los seres vivos que habitan en ellos.

### Figura 9

*Uso del agua por los seres humanos*



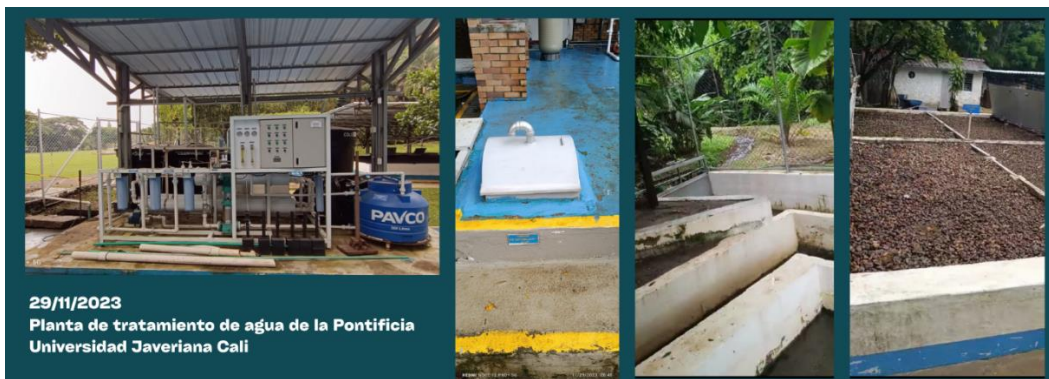
**Nota:** En la figura se muestra el ciclo de cómo los seres humanos hacen uso del agua.

**Fuente:** Elaboración propia

Para entender mejor la definición se hizo trabajo de campo, visitando plantas de tratamiento de aguas residuales privadas y públicas en Cali y en Helsinki.

### **Figura 10**

*Planta de tratamiento de agua de la Pontificia Universidad Javeriana Cali*



**Nota:** En la figura se muestra la visita que se realizó a la planta de tratamiento de agua de la Universidad Javeriana Cali

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 11**

*Planta de tratamiento de aguas residuales de Colgate Palmolive*



**Nota:** En la figura se muestra la visita que se realizó a la planta de tratamiento de aguas residuales de Colgate Palmolive la cual es industrial y privada.

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 12**

*Planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo*

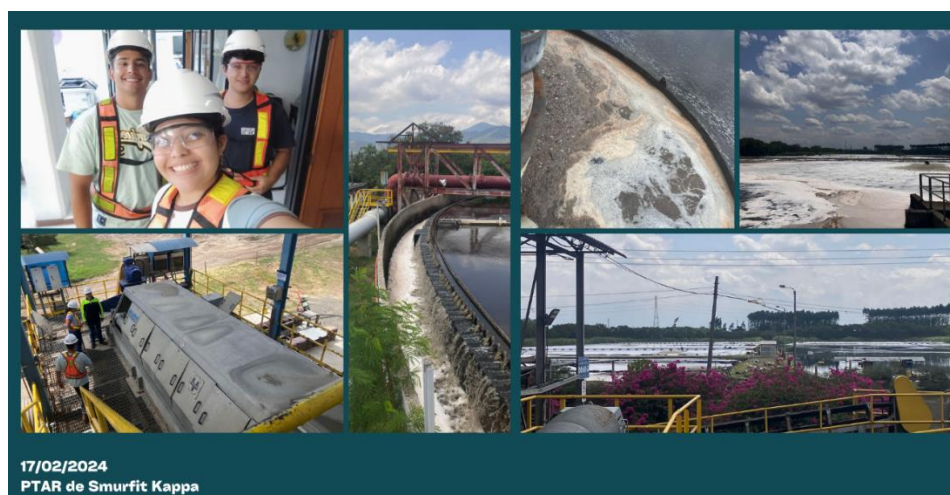


**Nota:** En la figura se muestra la visita que se realizó a la planta de tratamiento de aguas residuales Cañaveralejo la cual es a nivel municipal

**Fuente:** Elaboración propia

### Figura 13

*Planta de tratamiento de aguas residuales de Smurfit Kappa*



**Nota:** En la figura se muestra la visita que se realizó a la planta de tratamiento de aguas residuales de Smurfit Kappa

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 14**

*Planta de tratamiento de aguas residuales de Finlandia*



**Nota:** En la figura se muestra la visita que realizaron los participantes del equipo internacional a una planta de tratamiento de aguas residuales de Finlandia.

**Fuente:** Elaboración propia

***Segunda iteración de la definición del usuario***

Usando esta como la definición del usuario en conjunto con el equipo de Finlandia, se avanzó con las siguientes etapas de la metodología. Sin embargo, mientras se iteraba entre la etapa de ideación y validación, fue necesario reevaluar la definición del usuario que se había seleccionado. Aunque esta definición era un buen acercamiento para filtrar ideas, las soluciones que podían aplicarse con la tecnología actual resultaban poco innovadoras. Por tanto, mediante una decisión conjunta, se decidió realizar un avance en la ciencia, haciendo uso de un nuevo biomaterial que se encuentra en desarrollo: la nanocelulosa. De esta manera, en la siguiente iteración, al identificar y comprobar las características y usos de este nuevo material, se logró ampliar el espectro de posibles aplicaciones, incluyendo tanto innovaciones incrementales como

disruptivas. Finalmente, debido a la dirección en la que se inclinó el proyecto, no es posible definir un usuario en este momento. Se propone como trabajo futuro para el perfeccionamiento, priorización, prototipado y validación de las aplicaciones propuestas utilizando la nanocelulosa para la remoción de microplásticos en el agua.

## Prototipado

### *Selección de concepto*

#### **Definición de nanocelulosa.**

La celulosa es un compuesto polimérico natural. Se compone de microfibrillas extraídas de fibras animales y vegetales mediante cizalladura mecánica o por oxidación química. La nanocelulosa es uno de los materiales emergentes de este siglo, mostrando propiedades interesantes en muchos campos como la medicina, aditivos funcionales o tratamiento de aguas. Lo más interesante de este aspecto es su sostenibilidad. De hecho, la nanocelulosa está ampliamente disponible (proveniente de biomasa), es fácil y barata de producir, y además es un material degradable, no tóxico y renovable (Zinge, 2020).

El uso de la nanocelulosa como material para membranas de filtración está bien estudiado ya que presenta propiedades mecánicas interesantes y buenas propiedades de filtración. Sin embargo, estos estudios se centran en la eliminación de químicos (Voisin et al., 2017) (Mautner, 2020).

En un artículo publicado en 2022, Ilona Leppanen describe la posibilidad de usar nanocelulosa para capturar microplásticos. En este artículo, ella explica: "*Los ensamblajes de nanocelulosa higroscópicas muestran **propiedades peculiares de transporte de agua que involucran acción capilar y difusión.** Con la ayuda del flujo de agua, los nano y microplásticos parecen ser transportados dentro de la red de hidrogel de nanocelulosa. Además, la **gran área superficial de la red porosa** mejora la cohesión facilitando la captura de las partículas. La carga negativa general de la nanocelulosa también promueve la **acumulación de partículas** cargadas*

*positivamente, sin embargo, no impide la acumulación de partículas cargadas negativamente"* (Leppänen, 2022).

Este estudio muestra resultados interesantes. Sin embargo, en este estudio, la nanocelulosa se usa en forma de gel, esta muestra propiedades de adsorción interesantes, pero no demuestra la oportunidad de usarla como una membrana de filtración. De hecho, la creación de una película de filtración con nanocelulosa es algo que nunca se había hecho antes. Este proyecto es, por lo tanto, una iniciativa completamente nueva.

### **Filtro de nanocelulosa.**

De acuerdo con los resultados, este material parece ser una alternativa adecuada e innovadora a las membranas de filtración de agua existentes. La innovación del material resulta principalmente en sus aspectos de sostenibilidad y su eficiencia. La idea era usar este material para formar una película delgada que pudiera usarse como filtro.

La experiencia de otros investigadores, incluyendo a *Nashwa Attallah* (investigadora doctoral del departamento de Química de Materiales de Celulosa de la Universidad de Aalto) dio esperanza sobre la viabilidad de esta idea.

Pese a ello, nadie había intentado usar nanocelulosa para filtrar microplásticos del agua antes y había mucha incertidumbre. Nashwa primero expresó algunas reservas sobre la resistencia de la película, diciendo que las películas podrían no resistir alta presión. Pero también dijo que probablemente se podrían aumentar el grosor de la película o usar otro material, como un filtro Whatman, para formar la película y luego aumentar sus propiedades mecánicas.

Al principio, el mayor desafío parecía ser la resistencia mecánica. Rápidamente, el mayor desafío fue crear suficiente porosidad para que la membrana dejara pasar el agua.

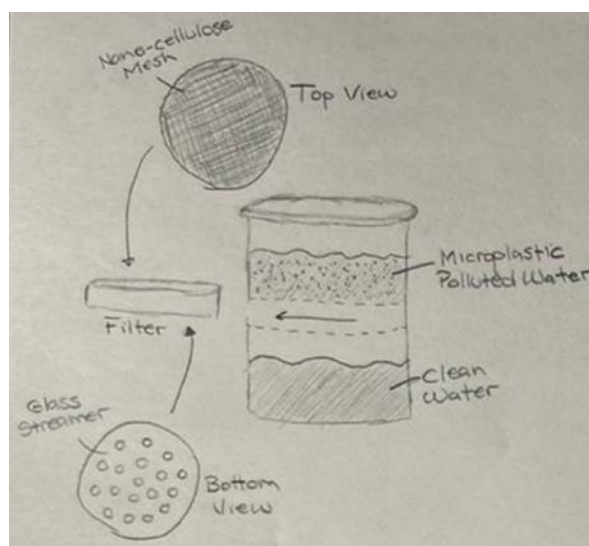
### *Diseño de prototipos*

#### **Diseños Iniciales.**

La idea inicial para un filtro de nanocelulosa involucraba una taza impresa en 3D de vidrio con una ranura extraíble que contenía una membrana de vidrio y una capa de nanocelulosa (Ver la figura 15).

#### **Figura 15**

*Boceto de la idea inicial del filtro*



**Nota:** En la imagen se muestra la idea de filtro que sería creado con la tecnología vidrio impreso en 3D.

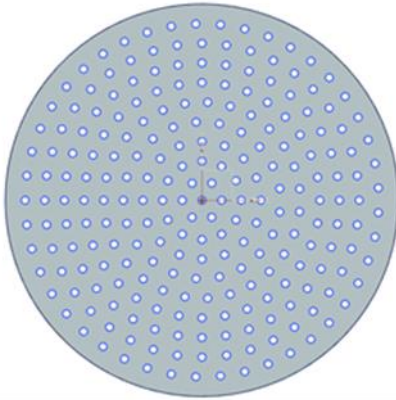
**Fuente:** Elaboración propia

## Diseño CAD de Filtros

Inicialmente, al considerar usar la tecnología de impresión en 3D de vidrio de Glassomer, se concibieron las siguientes membranas que contribuirían a probar la nanocelulosa.

### Figura 16

*Modelo CAD filtro para ser impreso con tecnología de vidrio Glassomer*

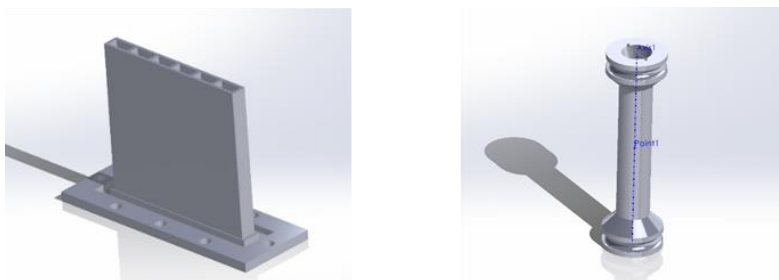


**Nota:** La figura 16 muestra una superficie de filtro microporoso que se utilizaría como soporte estructural para las películas de celulosa, como se muestra en el boceto de la figura 15.

**Fuente:** Elaboración propia

### Figura 17

*Membranas de diferentes geometrías*



**Nota:** La figura 17 representa geometrías complejas de membranas que permitirían simular el flujo de agua a través de plantas de tratamiento de aguas residuales.

**Fuente:** Elaboración propia

Estos diseños CAD no se usaron al final, ya que Glassomer no pudo ayudar a proporcionar las impresiones y, por lo tanto, se desarrollaron otras soluciones que no dependen de la tecnología de vidrio.

### **Diseño de concepto para plantas de tratamiento de agua.**

Para continuar con el proceso de prototipado, se hizo un diseño de membrana para entender el concepto y comportamiento del agua en contextos como las plantas de tratamiento de agua (ver figura 18).

### **Figura 18**

*Membrana desarrollada para simular el concepto de planta de tratamiento de agua*



**Nota:** La figura muestra la membrana prototipo desarrollada y construida que posee una estructura tipo sándwich,

**Fuente:** Elaboración propia

La membrana prototipo<sup>3</sup> asemeja a una estructura tipo sándwich, que consiste en varias capas ensambladas alrededor de un tubo central. Este tubo presenta una aleta circular a lo largo de su longitud, diseñada específicamente para alojar tornillos que aseguran el ensamblaje. La secuencia de capas comienza con un sello adyacente al tubo, seguido por una película de algodón destinada a actuar como prefiltro. Posteriormente, se agregó un filtro con poros de 1 mm, seguido por otro sello para completar el ensamblaje antes de adjuntar el tubo de salida. Los tornillos que atraviesan todas estas capas fueron apretados firmemente con tuercas, asegurando la integridad del ensamblaje y un rendimiento sin fugas. Para el movimiento del agua a través de esta configuración, se empleó una bomba de acuario de 12W capaz de entregar un flujo máximo de 10.2L/min y alcanzar una altura máxima de 1.08 metros, marca Evans.

---

<sup>3</sup> El instrumento de prueba de este concepto se encuentra detallado en apartados posteriores.

### ***Creación de película de nanocelulosa***

Para poder comprobar los conceptos, fue necesario crear las películas de nanocelulosa. Antes de crear las láminas era necesario fabricar el gel de nanocelulosa para el cual se utiliza un método llamado oxidación tempo. Como el proceso es bastante largo y complejo la estudiante de doctorado Nashwa ayudó con ello y proporcionó un gel concentrado de celulosa al 1%. Posterior a eso, se dieron dos variaciones al hacer las láminas, en la primera se creó la película de nanocelulosa a partir de una serie de procesos experimentales, mientras que en la segunda se hizo una incorporación de la película de nanocelulosa a los filtros Whatman. Ambos procesos se explican a continuación.

#### **Primera opción: Proceso de fabricación de película de nanocelulosa (CNF).**

El proceso de formación de la película siguió 5 pasos: ajuste de concentración, homogeneización, desaireación, moldeo en una placa de Petri y secado.

- ***Ajuste de concentración.***

Como se mencionó anteriormente, el gel proporcionado por Nashwa era un concentrado de fibras de celulosa al 1%. Siguiendo los consejos de Nashwa, se redujo esta concentración añadiendo agua a la solución. Según ella, una concentración demasiado alta daría una solución demasiado viscosa y sería difícil formar una película con ella. Por lo tanto, fueron creadas 2 soluciones, una concentrada al 0.3% y otra al 0.6%. La idea de tener 2 diferentes es comparar sus propiedades (mecánicas, resistencia al agua, flujo de agua, etc.).

- ***Homogeneización.***

Después de ajustar la concentración, fue importante mezclar la solución para hacerla homogénea. Para este proceso de mezcla, se utilizó el dispositivo Ultra Turax, mostrado en la Fig. 19.

- ***Proceso de desaireación.***

El último paso aumentó la calidad de la solución haciéndola homogénea, pero tuvo el efecto contrario de crear muchas burbujas en ella. Las burbujas de aire se evitaban en la solución porque podrían tener un impacto en las propiedades de la película, por lo que era necesario eliminarlas. Para ello, se utilizó un proceso de desaireación mediante vacío. Se succionó el aire del recipiente, atrayendo las burbujas con él. Las succiones no eran muy fuertes; por lo tanto, se asumió que no tuvieron influencia en la homogeneidad del gel.

### **Figura 19**

*Proceso de homogenización del gel y desaireación*



**Nota:** En la figura se muestra de izquierda a derecha el proceso de homogenización y el de desaireación.

**Fuente:** Elaboración propia

- *Formación de la película.*

El siguiente paso fue probablemente el más importante. Consistió en verter el gel en una placa de petri para crear las películas. El grosor de la película se controló eligiendo la cantidad de gel. El volumen de gel vertido se controló con una pipeta graduada. De hecho, se conocía la superficie de la placa de Petri ( $2\pi r^2$ ), con r el radio de la placa de petri.

Al elegir el volumen de solución,  $V = (2t\pi r^2)$  para un cilindro, fue posible determinar t, el grosor de la película. Por lo tanto, se crearon películas de diferentes grosores con las 2 soluciones. En total, se moldearon alrededor de 50 películas.

### **Figura 20**

*Formación de las películas de nanocelulosa*



**Nota:** En la figura se muestra el proceso de formación de las láminas de nanocelulosa en el cual se les daba la forma y grosor necesario.

**Fuente:** Elaboración propia

- ***Proceso de secado.***

Este paso final fue el más largo. Consistió en secar las películas en una sala controlada por temperatura y humedad. El secado propiamente dicho duró entre 1 y 4 días para las películas más gruesas.

**Segunda opción: Proceso de fabricación de la película de CNF incorporada con filtro Whatman.**

Durante las primeras pruebas, se observó que las películas de nanocelulosa no permitían el paso del agua, lo que sería un gran problema para usar la película como una membrana de filtración. Por lo tanto, Nashwa sugirió fundir la nanocelulosa sobre los filtros Whatman para aumentar la porosidad y permitir el paso del agua, además de hacer los filtros más estables para resistir la presión del agua.

Un filtro Whatman se refiere a un tipo de papel de filtro de celulosa o membrana y es ampliamente utilizado en laboratorios y entornos industriales para diversas aplicaciones como filtración, clarificación y separación de sólidos, líquidos o gases. Para las pruebas, se utilizaron filtros Whatman de Grado 1 que muestran el tamaño de poro más pequeño disponible: 11  $\mu\text{m}$ .

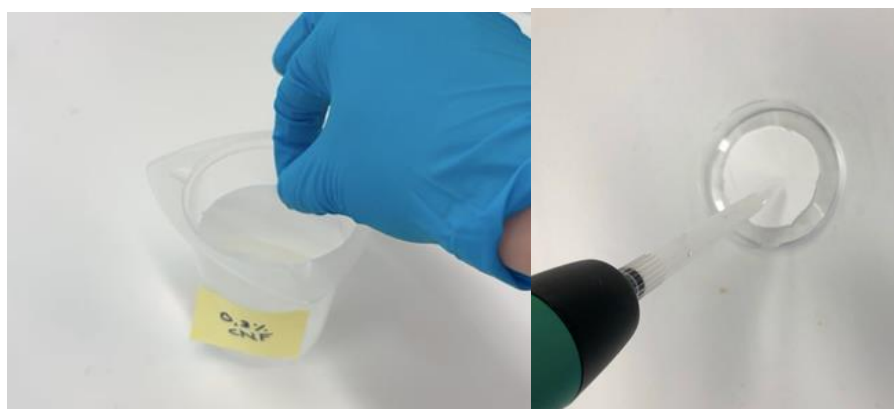
El paso del proceso fue el mismo que el explicado anteriormente, solo que en lugar de fundirse en una placa Petri, la Nanocelulosa se fundió en un filtro Whatman. Se utilizaron dos métodos diferentes (ver figura 21):

1. Sumergir el filtro Whatman en el gel de nanocelulosa.
2. Verter la nanocelulosa en una cara del filtro Whatman con una jeringa.

Los diferentes filtros fueron probados para comprobar si permitían el paso del agua, si resistían la presión del flujo y, en una etapa final, si capturaban una mayor cantidad de microplásticos que los filtros Whatman normales. Las pruebas se explican en los siguientes apartados.

### **Figura 21**

*Métodos para fundir la nanocelulosa a los filtros Whatman*



**Nota:** En la figura se muestra de izquierda a derecha el proceso de fundir la nanocelulosa con los filtro Whatman por sumergimiento y por rociado con jeringa.

**Fuente:** Elaboración propia

### ***Configuración de la muestra***

La parte más importante de la prueba de los filtros era tener microplásticos con los cuales poder realizar pruebas. Se utilizaron varios métodos en busca de adquirir microplásticos lo suficientemente pequeños como para parecerse a los encontrados en el agua potable y lo suficientemente cerca en tamaño para realizar pruebas adecuadas.

#### **Limado de microplásticos.**

El primer intento de adquirirlos fue usando una lima de 10-12 pulgadas para moler un trozo de polietileno durante 30 minutos. La Figura 22 muestra las virutas que se recogieron, no obstante, estas no eran aptas para la prueba debido a su inconsistencia en tamaño.

#### **Figura 22**

*Primer intento de obtención de microplásticos*



**Nota:** En la figura se muestran los microplásticos obtenidos por primera vez al realizar un proceso de limado.

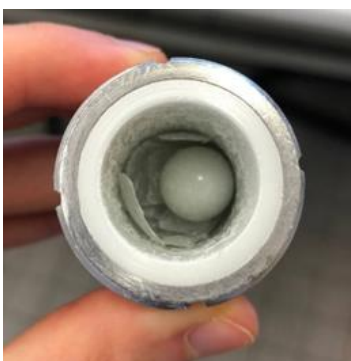
**Fuente:** Elaboración propia

### **Mini molino de bolas.**

El propósito del mini molino de bolas es agitar una cápsula que en su interior tiene una bola de acero que tritura los fragmentos del objeto insertado hasta que vuelvan polvo. Este proceso se hizo durante 15 minutos a 500 rpm y en la Figura 22 se muestra el resultado. Alrededor de los bordes del tubo, se observan virutas de plástico, pero también está combinado con pedazos astillados de la propia bola. La cantidad de plástico triturado fue poco y la mayoría no pudo ser completamente triturado debido a su falta de firmeza.

### **Figura 23**

*Resultado del uso del mini molino de bolas*



**Nota:** En la figura se muestra cómo quedó triturado el plástico luego de pasar por el mini molino de bolas.

**Fuente:** Elaboración propia

### **Molino de bolas planetario.**

El molino de bolas planetario es similar al mini molino de bolas excepto que el tubo es reemplazado por un frasco sellado lleno hasta la mitad con múltiples bolas de acero más pequeñas.

El resultado del uso de este molino fue que los plásticos se calentaron demasiado debido a la fricción por lo cual no se pudieron obtener muestras para realizar las pruebas.

### **Figura 24**

*Molino de bolas planetario*



**Nota:** En la figura se muestra cómo se ve el molino de bolas planetario que se utilizó como tercera opción para obtener los microplásticos para las pruebas.

**Fuente:** Elaboración propia

### **Compra de microplásticos.**

Finalmente, se optó por comprar microplásticos utilizados para investigación y desarrollo. Partículas de poliestireno etiquetadas fluorescentemente (PS) (L3030 de Sigma Aldrich) de tamaño  $\varnothing = 2 \mu\text{m}$  fueron utilizadas para analizar la capacidad de captura de microplásticos y para revelar los mecanismos de captura del hidrogel CNF y las películas autoportantes

**Figura 25**

*Visualización de los microplásticos comprados*



**Nota:** En la imagen se muestran los microplásticos fuera de la cápsula en la que fueron entregados.

**Fuente:** Elaboración propia

***Instrumento de Prueba*****Instrumento inicial: configuración de brida.**

El primer instrumento de prueba utilizado involucraba bridas de 45 mm de diámetro que encierran las películas de celulosa. En los extremos de las bridas hay un tubo de entrada, donde el agua viene directamente del fregadero, y un tubo de salida por donde fluye el agua que pasa a través de las películas (mostrado en la Figura 26). Las bridas se colocaron sobre un soporte de madera para tener una alineación vertical exacta del montaje.

**Figura 26**

*Primer instrumento de prueba “Bridas”*



**Nota:** En la figura se muestra cómo se ubicó el primer instrumento de prueba para examinar el comportamiento de las películas.

**Fuente:** Elaboración propia

Este montaje se utilizó temporalmente porque había algunas películas que eran más resistentes al flujo de agua, por lo que el agua regresaba por el tubo de entrada y se escapaba por el punto de conexión de los tubos.

**Instrumento de prueba final: aireador de fregadero.**

Un aireador de fregadero se convirtió en el montaje de prueba principal para las películas debido a su membrana incorporada y a que no había otros puntos débiles por donde el agua podría

escapar aparte del propio aireador. El diámetro de las películas utilizadas para el aireador era de 18 mm y estaban selladas en su lugar por un anillo de goma que comprime contra el grifo.

### **Figura 27**

*Configuración de la prueba aireador de fregadero*



**Nota:** En la figura se muestra la configuración de la prueba realizada con el aireador de fregadero.

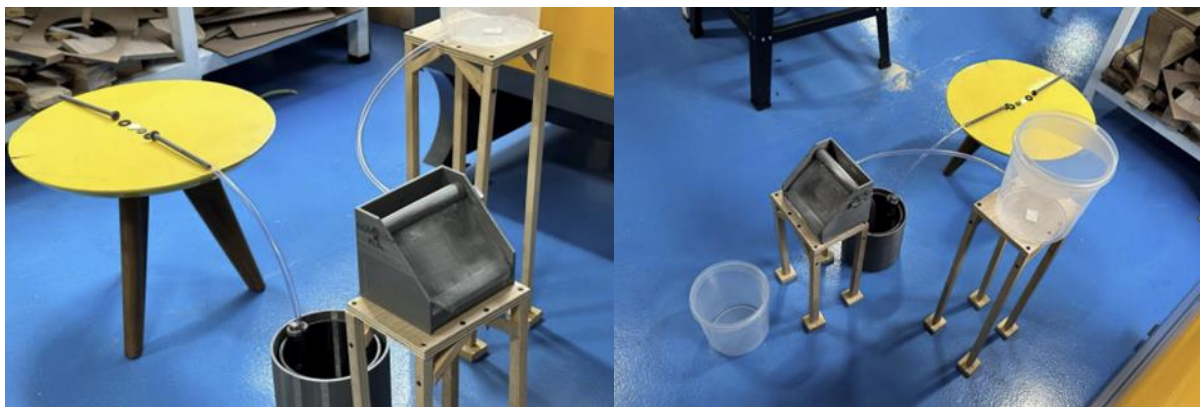
**Fuente:** Elaboración propia.

### **Instrumento de prueba: planta de tratamiento de aguas residuales a pequeña escala**

Como se observaba en apartados anteriores, se hizo una membrana tipo sándwich para conocer el comportamiento de una planta de tratamiento de agua la cual fue aplicada en este instrumento de prueba a escala el cual tenía por objetivo demostrar los procesos básicos de filtración y sedimentación utilizados en el tratamiento de aguas residuales para eliminar sólidos y otras impurezas, preparando el agua para etapas de purificación más avanzadas. El sistema consta de varios componentes clave dispuestos secuencialmente para simular el flujo de agua a través de una planta de tratamiento real. Cada componente juega un papel específico en la limpieza del agua, desde la eliminación de partículas grandes hasta la filtración de partículas más finas.

**Figura 28**

*Planta de tratamiento de agua residual (PTAR) a pequeña escala*



**Nota:** En la imagen se observa el ensamble elaborado para simular el comportamiento de la PTAR.

**Fuente:** Elaboración propia

En este instrumento de prueba el agua comienza su proceso en un tanque fuente posicionado a 60 cm sobre el suelo. Este tanque actúa como el punto de partida para el agua que será tratada, simbolizando la entrada de aguas residuales a la planta (ver figura 29).

**Figura 29**

*Fase 1 PTAR a escala*



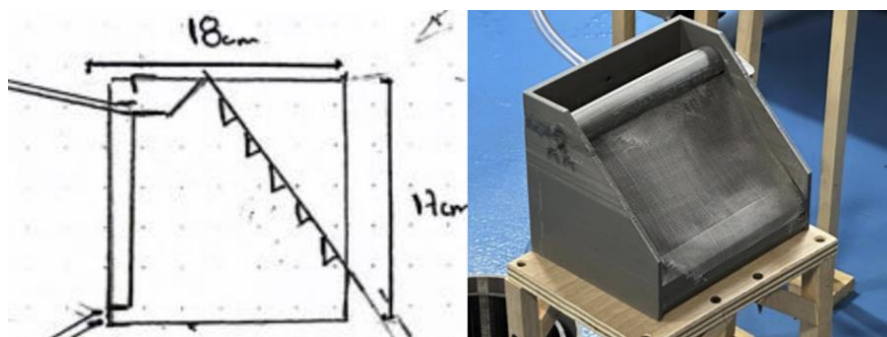
**Nota:** En la figura se muestra la primera etapa de la PTAR a escala en la que comienza con un balde que asemeja la entrada de agua a la planta.

**Fuente:** Elaboración propia.

Desde el tanque, el agua fluye a través de mangueras hacia un tamiz estático ubicado a 33 cm sobre el suelo. Este tamiz filtra los sólidos más grandes presentes en el agua, como hojas, papel y otros desechos.

### Figura 30

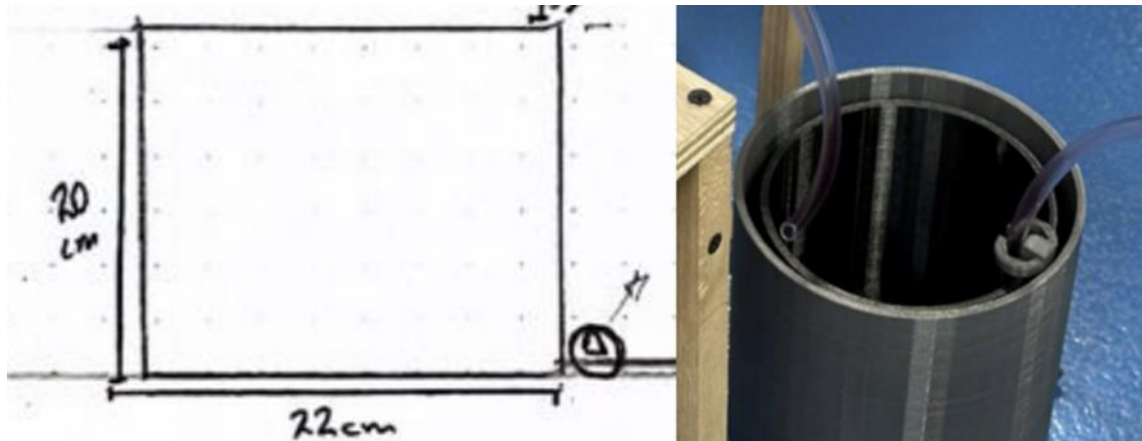
*Fase 2 PTAR a escala*



**Nota:** En la figura se muestra el tamiz estático de la fase 2 de la planta de tratamiento a escala.

**Fuente:** Elaboración propia.

Posteriormente, el agua se mueve hacia el tanque de sedimentación, que está directamente sobre el suelo. En esta etapa, las partículas más pesadas no capturadas por el tamiz se asientan en el fondo del tanque debido a la gravedad.

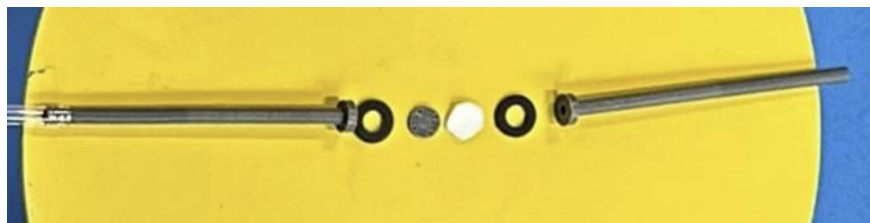
**Figura 31***Fase 3 PTAR a escala*

**Nota:** En la figura se muestra el tanque de sedimentación de la PTAR a escala ubicado en la fase 3.

**Fuente:** Elaboración propia

Después de la sedimentación, una pequeña bomba de acuario bombea el agua hacia el sistema de filtración. Este sistema está compuesto por:

- Tubo de Entrada: Canales que llevan el agua al sistema de filtración.
- Sello: Evita fugas de agua no controladas.
- Algodón en Forma de Hoja: Actúa como un filtro preliminar para partículas finas.
- Filtro de 1 mm: Proporciona filtración adicional, capturando partículas aún más pequeñas.
- Segundo Sello: Asegura la estanqueidad del sistema.
- Tubo de Salida: Permite que el agua filtrada continúe su flujo hacia el siguiente paso o salida.

**Figura 32***Fase 4 PTAR a escala*

**Nota:** En la figura se muestra la membrana o sistema de filtración utilizado en esta etapa de la PTAR a escala.

**Fuente:** Elaboración propia.

Al final del proceso, se realizó un análisis microscópico del algodón utilizado en el sistema de filtración para identificar los sólidos retenidos. Además, mediante un análisis visual, se comparó la claridad del agua antes y después del tratamiento para evaluar la eficacia del prototipo, encontrando que el sistema de filtración en esa posición si aporta en la eliminación de impurezas en el agua. No obstante, entendiendo hacia dónde se inclinaba el proyecto, se detuvo el progreso en la implementación de las PTAR porque se necesitaba más tiempo de investigación, recursos y herramientas para desarrollarlas. Por lo tanto, el equipo decidió centrarse en realizar pruebas con la nanocelulosa para garantizar su capacidad de eliminar microplásticos. Estas pruebas se enfocaron en el agua potable debido a su accesibilidad y la relación directa que tiene con los seres humanos.

### ***Criterios y proceso de evaluación***

Existen dos criterios principales que fueron analizados durante las pruebas. El objetivo principal era comparar las películas de CNF creadas con el filtro Whatman existente. Las pruebas tienen como objetivo demostrar si las películas de CNF creadas pueden superar a los filtros Whatman existentes. El primer criterio que se probó fue el flujo de agua, todas las películas fueron probadas respecto a su capacidad de permitir el paso tanto de baja como de alta presión de agua, además de soportar la presión sin romperse. El segundo criterio analizado durante las pruebas fue la capacidad de las diferentes películas para atrapar o filtrar microplásticos de tamaño de 2 micrones.

Para llevar a cabo las pruebas, se necesitaron métodos de evaluación específicos para comparar los resultados de las diferentes películas. Para la evaluación del flujo de agua, no se necesitó un equipo específico. Los resultados se obtuvieron observando el flujo de agua y la condición de la película después de las pruebas.

Para la capacidad de filtrado de microplásticos de las películas, se necesitaron más equipos y se consideraron dos opciones para esta prueba: la primera opción era medir el peso de la película antes y después de que el agua pase a través de ella, con la contingencia de que las películas fueran deshidratadas antes de volver a pesarlas después de que el agua haya pasado. Los pasos de la prueba se describen así:

- 1. Colocar microplásticos en la película.***
- 2. Pesar y registrar el peso de la película.***
- 3. Sellar la película en el aireador del fregadero y dejar pasar el agua durante un minuto.***
- 4. Retirar la película.***

**5. Deshidratar la película en un horno a 50°.**

**6. Pesar y registrar el peso de la película.**

De esta manera, se pudo calcular la cantidad de microplásticos que fueron filtrados en el proceso.

Una segunda opción fue utilizar la inspección visual con la ayuda de una **luz UV**. Los microplásticos etiquetados fluorescentemente adquiridos absorben luz UV y luego reemiten luz a una longitud de onda más larga, típicamente en el espectro visible. Esto permite una comparación visual de la cantidad de microplásticos recogidos después de que el agua pase a través de las películas.

### ***Iteraciones de las pruebas y observaciones***

Se hicieron 12 iteraciones de películas moldeadas más el filtro Whatman existente debido a su capacidad para soportar la presión del agua del fregadero y por la cantidad de microplásticos que es capaz de retener. Según el proceso de moldeo mencionado anteriormente, las películas estaban etiquetadas por consistencia, concentración de nanocelulosa, método de moldeo, el volumen de la concentración, el área de la película que fue cubierta con la solución y el número de lados que están cubiertos.

Por ejemplo,

Un filtro Whatman (WF) moldeado (C) con un lado completamente cubierto (FC) con 2,5 g de nanocelulosa (CNF) con una concentración de 0,3 sería etiquetado como [WF+CNF, 0,3, C, 2,5g, FC, (1)].

Otras palabras clave incluirían: parcialmente cubierto (PC), casi completamente cubierto (AFC), sumergido (D) en lugar de moldeado, o un filtro Whatman con tanto CNF como carbón activado (AC).

### **Prueba de presión del agua.**

#### ***Ejecución y documentación de la prueba.***

Debido a la falta de un manómetro, se probaron dos configuraciones de presión. Presión baja (BP), donde el grifo está en su presión más baja, y alta presión (AP), donde el grifo está en su máxima presión. Para cada prueba, la película se colocaba en el aireador del fregadero en baja presión durante un minuto y luego se retiraba del fregadero para una inspección visual. Si aún estaba intacta, recibía un ✓; de lo contrario, recibía una X. Luego, el aireador se volvía a colocar en el fregadero, y de la misma manera se abría el grifo a su máxima presión.

El flujo se etiqueta como "gotas" o "constante".

**Tabla 2**

*Resultados de la prueba del presión de agua*

<b>Película</b>	<b>BP</b>	<b>AP</b>	<b>Flujo</b>
Solo Whatman Filter	✓	X	Constante
Solo CNF, 0.3, C, 12g	X	X	Sin flujo
Solo CNF, 0.6, C, 12g	X	X	Sin flujo
[WF+CNF, 0.3, C, 2.5g, FC, (1)]	X	X	Gotas

[WF+CNF, 0.3, C, 1g, FC, (1)]	✓	X	Gotas
[WF+CNF, 0.3, C, 0.6g, PC, (1)]	✓	X	Constante
[WF+CNF, 0.6, C, 2.5g, FC, (1)]	✓	✓	Gotas
[WF+CNF, 0.6, C, 1.4g, FC, (1)]	✓	✓	Gotas
[WF+CNF, 0.6, C, 1g, AFC, (1)]	✓	X	Constante
[WF+CNF, 0.6, C, 0.6g, PC, (1)]	✓	X	Constante
[WF+CNF, 0.3, D, (2)]	✓	X	Constante
[WF+CNF, 0.6, D, (2)]	✓	X	Constante
[AC+WF+CNF, 0.6, D, (2)]	✓	X	Constante

**Nota:** En la tabla se muestran los resultados obtenidos a partir de la prueba de presión de agua en el aireador del fregadero.

**Fuente:** Elaboración propia

### ***Interpretación.***

Como muestran los resultados en la Tabla 2, se recopilaron diferentes datos para el análisis de la presión del agua. Se pueden observar diferencias en su flujo de agua así como en su estabilidad. La mayoría de las películas creadas conducen a un flujo de agua constante y pueden resistir el flujo de agua baja sin daños. Para el flujo de agua a alta presión, algunas de las películas muestran un pequeño agujero después de dejar pasar el agua. Para superar este problema, las películas creadas pueden combinarse con un filtro Whatman normal que ofrece soporte pero no tiene una gran influencia en el flujo de agua. La combinación del filtro Whatman con las películas creadas, permite que estas también pueden soportar mayor presión del agua.

Las películas que no permiten el flujo de agua son las películas compuestas solo de CNF. La razón de esto es que la película de solo CNF tiene menos porosidad que las películas combinadas de CNF/filtro Whatman, ya que la combinación con el filtro Whatman le da a las películas de CNF una estructura porosa. Como resultado, las películas solo de CNF no permiten el flujo de agua y, por lo tanto, no se consideraron para pruebas posteriores. La película "WF+CNF, 0.3, C, 2.5g" tampoco se consideró para pruebas adicionales ya que el filtro no soportó ni siquiera un flujo de baja presión.

Además se descartó el filtro AC+WF+CNF para evaluaciones adicionales, ya que el carbón activado no es suficientemente resistente al agua y por lo tanto no cumple con los requisitos ya que puede desprenderse y terminar en el agua.

### ***Rendimiento de Filtración de Microplásticos.***

Como se mostró en las observaciones e interpretaciones de la prueba de presión de agua, quedaron 9 películas que pueden ser analizadas más a fondo respecto a su capacidad de filtrar

microplásticos. Para comparar y evaluar el rendimiento de las pruebas, se consideraron tanto el método de medición de peso como la inspección visual con luz UV.

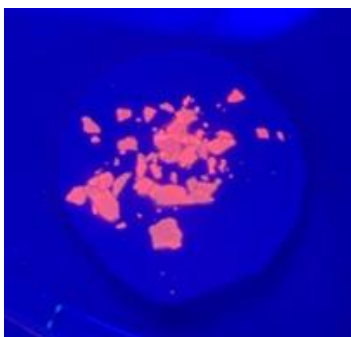
### *Ejecución y observaciones.*

En el primer ensayo, se probó el método de peso. Para obtener el peso de la película con los microplásticos, primero se tuvo que secar los microplásticos fluorescentes. Esto se hizo utilizando una sala de laboratorio con baja humedad. Para evaluar la tasa de captura de microplásticos, primero se pesaron las películas antes de colocar los microplásticos y luego se pesaron después de colocar los microplásticos, para calcular el peso neto de los MPs colocados. En el siguiente paso, se realizó la prueba y el agua se hizo pasar por el grifo y las películas.

Sin embargo, las pruebas realizadas mostraron que los microplásticos secos se aglomeraban y no se disolvían en el agua. Como resultado, las pruebas no consiguieron el propósito, ya que los microplásticos al aglomerarse aumentaron su tamaño, como se muestra en la figura 33.

### **Figura 33**

*Microplásticos secos aglomerados*



**Nota:** En la figura se muestra la manera en la que los microplásticos se aglomeraron entre sí al ser secados.

**Fuente:** Elaboración propia

Esto llevó a la conclusión de que el proceso de secado de los microplásticos no es adecuado para los propósitos de prueba y que necesitan ser utilizados en su condición fluorescente líquida.

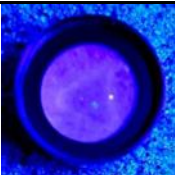
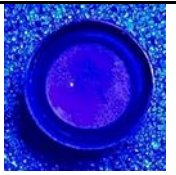

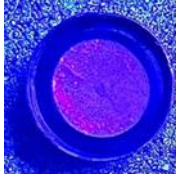
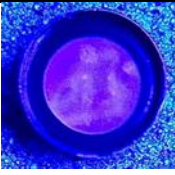

Por lo tanto, se ejecutó el segundo método de evaluación: utilizando los microplásticos fluorescentes, colocándolos sobre la película y luego observando la cantidad de microplásticos antes y después de la prueba mediante luz UV. Para hacerlo, se utilizó una cápsula de microplásticos para cada ensayo, lo que significa 1 ml de fluorescente que contiene partículas de microplásticos de 2  $\mu\text{m}$ . El contenido de una cápsula se colocó sobre la película en el grifo y luego tomó varios segundos para que el líquido pasara a través del filtro. Después de eso, se tomó una foto de la película que contenía los microplásticos antes de que el agua pasara a través de ella, utilizando la luz UV para resaltar los MPs.

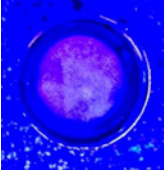
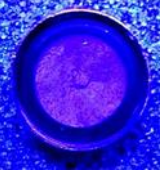
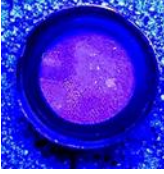
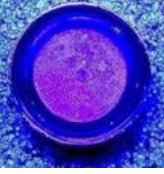

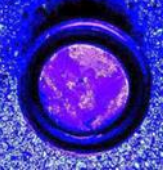
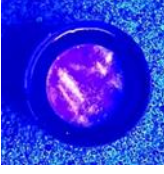
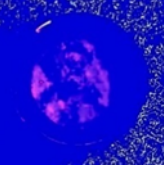
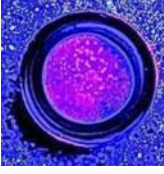



En el siguiente paso, la película se colocó en el aireador del fregadero y el agua se hizo pasar a través de la película durante un minuto en condiciones de baja presión. Después de eso, se tomó otra foto de los microplásticos en la película, lo que permitió una comparación visual antes y después de la prueba. Si la cantidad de microplásticos después de la prueba es similar a la cantidad antes de la prueba, el rendimiento de la película puede evaluarse como alto, ya que el filtro detuvo los microplásticos para que no pasaran. Si la cantidad es menor, significa que algunos de los microplásticos pasaron a través del filtro y su capacidad de remoción es menor.

El proceso de prueba se llevó a cabo para las 9 películas restantes, después de excluir las 3 muestras que no cumplieron con los requisitos en la prueba de flujo de agua. Los resultados de las 9 películas y su rendimiento de microplásticos se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3**

*Resultados pruebas rendimiento de filtración de microplásticos*

<b>Película</b>	<b>Antes de la Prueba</b>	<b>Después de la Prueba</b>	<b>Observaciones</b>
Solo filtro Whatman (Tamaño de poro: 11 $\mu\text{m}$ , <b>base</b> para comparación con películas creadas)			- Gran reducción de MPs, muchos microplásticos pasaron a través del filtro → <b>Rendimiento malo</b> para partículas de 2 $\mu\text{m}$
[WF+CNF, 0.3, C, 1g, FC, (1)]			- Cantidad similar de MPs visible → <b>Alto rendimiento</b>
[WF+CNF, 0.3, C, 0.6g, PC, (1)]			- Gran reducción de MPs, muchos microplásticos pasaron a través del filtro → <b>Rendimiento malo</b>

[WF+CNF, 0.6, C, 2.5g, FC, (1)]			- Cantidad similar de MPs visible → <b>Alto rendimiento</b>
[WF+CNF, 0.6, C, 1.4g, FC, (1)]			- Cantidad similar de MPs visible → <b>Alto rendimiento</b>
[WF+CNF, 0.6, C, 1g, AFC, (1)]			- Distribución similar de MPs - Pequeña reducción de MPs visible, algunos MPs pasaron a través del filtro → <b>Buen rendimiento</b>
[WF+CNF, 0.6, C, 0.6g, PC, (1)]			- Gran reducción de MPs, muchos microplásticos pasaron a través del filtro → <b>Rendimiento malo</b>
[WF+CNF, 0.3, D, (2)]			- Pequeña reducción de MPs visible, algunos MPs pasaron a través del filtro → <b>Buen rendimiento</b>
[WF+CNF, 0.6, D, (2)]			- No se observa reducción de MPs, ningún MP pasó a través del filtro

			→ <b>Rendimiento muy alto</b>
--	--	--	-------------------------------

**Nota:** En la tabla se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de rendimiento de filtración de microplásticos aplicados a diferentes películas de nanocelulosa.

**Fuente:** Elaboración propia

### *Interpretaciones.*

Después de realizar las pruebas, la observación y el análisis, se puede decir que existen diferencias de rendimiento entre las distintas películas. En primer lugar, se puede mencionar que el filtro Whatman, que sirve como base de comparación, muestra un mal desempeño en la filtración de microplásticos. Esto tiene sentido ya que el tamaño de poro del filtro Whatman es de 11 micrones mientras que las partículas utilizadas muestran un tamaño de 2 micrones. El objetivo de las pruebas era ver si la combinación con la nanocelulosa podía aumentar el rendimiento.

Como muestran los resultados en la Tabla 3, todas las películas creadas muestran un mejor rendimiento que el filtro Whatman. Sin embargo, el rendimiento de las películas moldeadas se diferencia entre sí. Las películas parcialmente cubiertas permiten el paso de una gran cantidad de MPs, lo cual se puede evaluar como un rendimiento bajo. Esto tiene sentido ya que el CNF no cubre toda la película y, por lo tanto, permite que las partículas pasen a través de las partes descubiertas.

La película CNF 0.3 sumergida y la película 0.6 casi completamente cubierta muestran un buen rendimiento. Un alto rendimiento se logra con las películas que fueron completamente cubiertas. La película CNF 0.6 sumergida muestra un rendimiento muy alto, ya que no hay diferencia visible entre el filtro antes y después de las pruebas.

En conclusión, se puede decir que los filtros con una mayor cantidad de nanocelulosa añadida muestran un rendimiento superior, mientras que las películas parcialmente cubiertas no impresionan con suficientes capacidades de filtrado.

### ***Resultados y Discusión General***

Después de haber realizado tanto las pruebas de presión del agua como las de microplásticos, se puede realizar un análisis y evaluación final, dado que el filtro debe permitir tanto un flujo de agua constante como mostrar un buen rendimiento de filtrado de microplásticos. Ambos aspectos deben tenerse en cuenta para la selección final de la mejor película. El resumen de ambos aspectos se muestra en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Evaluación final flujo de agua y rendimiento de filtrado*

<b>Película</b>	<b>Flujo de agua</b>	<b>Rendimiento de filtrado</b>
Solo filtro de Whatman	Constante	Rendimiento malo
[WF+CNF, 0.3, C, 1g, FC, (1)]	Gotas	Rendimiento alto
[WF+CNF, 0.3, C, 0.6g, PC, (1)]	Constante	Rendimiento malo
[WF+CNF, 0.6, C, 2.5g, FC, (1)]	Gotas	Rendimiento alto

[WF+CNF, 0.6, C, 1.4g, FC, (1)]	Gotas	Rendimiento alto
[WF+CNF, 0.6, C, 1g, AFC, (1)]	Constante	Rendimiento bueno
[WF+CNF, 0.6, C, 0.6g, PC, (1)]	Constante	Rendimiento malo
[WF+CNF, 0.3, D, (2)]	Constante	Rendimiento bueno
[WF+CNF, 0.6, D, (2)]	Constante	Rendimiento muy alto

**Nota:** En la tabla se muestra el análisis final del comportamiento de las películas de nanocelulosa con el filtro Whatman teniendo en cuenta el flujo de agua que permiten pasar y el rendimiento de filtración de microplásticos que poseen.

**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar que algunas de las películas que muestran una alta capacidad de filtrado de microplásticos solo permiten un flujo de agua inestable. Por lo tanto, el rendimiento general de estos filtros debe ser calificado como bajo. Lo mismo se aplica al filtro con un flujo de agua constante pero un mal rendimiento de filtrado.

Las únicas películas que permiten tanto un flujo constante como un buen o muy alto rendimiento de filtrado son las siguientes:

- WF+CNF, 0.6, C, 1g, AFC, (1): Flujo de agua constante, buen rendimiento de filtrado.
- WF+CNF, 0.3, D, (2), Flujo de agua constante, buen rendimiento de filtrado.
- WF+CNF, 0.6, D, (2), Flujo de agua constante, muy alto rendimiento de filtrado.

Dado que la película “WF+CNF, 0.6, D, (2)” no solo muestra un flujo de agua constante sino también un muy alto rendimiento de filtrado, definitivamente supera a las otras películas y muestra el mayor rendimiento general ya que puede filtrar microplásticos de tamaño de 2  $\mu\text{m}$  mientras permite un flujo de agua constante. Por lo tanto, esta película es seleccionada como la solución final.

### **Pasos siguientes y otras oportunidades para exploración**

#### ***Aplicación***

Después de haber realizado varias pruebas y análisis, se seleccionó la mejor película y se demostró que esta película aumenta el rendimiento de filtrado de microplásticos en el agua potable, en comparación con las películas de celulosa sostenibles existentes en el mercado. Como próximo paso, este concepto finalizado debe transformarse en un producto final con una aplicación influyente.

Para la película Whatman/CNF creada, especialmente la aplicación de un grifo o un fregadero puede considerarse adecuada y debe explorarse más. Es adecuado, ya que las películas mostraron un buen rendimiento en el filtrado de microplásticos de tamaño de 2 micrones, así como en la resistencia a la presión del agua del grifo. Por lo tanto, el grifo o el fregadero serían una gran posibilidad para mejorar la calidad del agua potable, tanto en hogares privados como en instalaciones públicas. En los siguientes pasos, se debe analizar el flujo máximo de agua exacto durante un período de tiempo más largo.

Otras aplicaciones podrían involucrar el uso de películas de nanocelulosa en conjunto con filtros Whatman para diversos propósitos, como la filtración en lavadoras, bombas manuales en pozos públicos en naciones en desarrollo, sistemas de irrigación, plantas de tratamiento de aguas

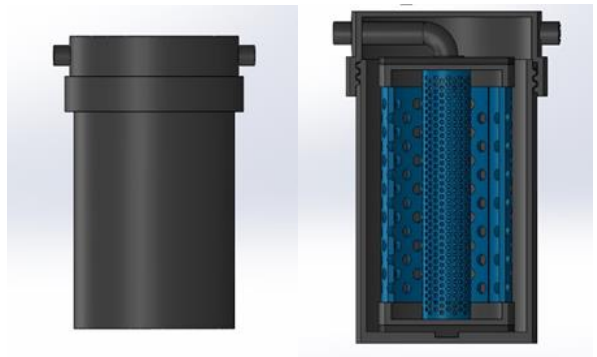
residuales e instalaciones de reciclaje. Sin embargo, es imperativo evaluar la resistencia al flujo de agua de acuerdo con aplicaciones específicas. Estas aplicaciones potenciales sirven como base para una exploración y desarrollo más profundos en este campo.

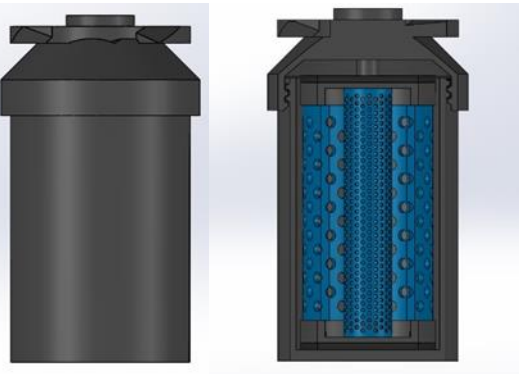
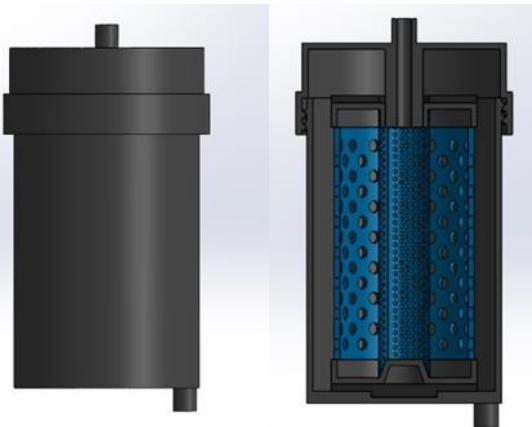
Como paso inicial se hizo un análisis del panorama actual y se llegó a la conclusión que en los sistemas de filtración discutidos, todos comparten un principio de funcionamiento y geometría fundamentalmente similares. Cada uno adopta una configuración cilíndrica en la que el agua fluye de manera transversal a través de las paredes del filtro, desde una entrada específica hasta una salida designada. Lo que distingue a cada uno de estos sistemas no es el método de filtración en sí, sino más bien la disposición y ubicación de estas entradas y salidas de agua. Esta variación implica diferentes sistemas de instalación, adaptándose así a las necesidades específicas de cada contexto o aplicación. Por ejemplo, en algunos casos, la entrada y salida pueden estar posicionadas en extremos opuestos para facilitar el flujo a través de todo el filtro, mientras que, en otros, podrían estar situadas más cerca una de la otra, dependiendo del diseño del sistema de filtrado y del espacio disponible para la instalación.

Por esta razón se propuso estos modelos de distintos filtros en los cuales se podría aplicar como **material filtrante la nanocelulosa** (ver tabla 4).

**Tabla 5**

*Posibles aplicaciones de la nanocelulosa como material filtrante en diferentes contextos*

<b>Filtro</b>	<b>Ámbito</b>	<b>Objetivo</b>
	<b>Hogar - Lavavajillas</b>	Evita la entrada de microplásticos al sistema municipal desde la fuente, reduciendo la contaminación ambiental.
	<b>Grifos Domésticos</b>	Provee agua potable libre de microplásticos, asegurando la salud de los consumidores en áreas urbanas.

	<b>Bebederos</b>	Ofrece agua segura y educa sobre la reducción de microplásticos en una comunidad educativa o entornos públicos.
	<b>Plantas de Tratamiento</b>	Mejora la eficacia de las plantas al capturar microplásticos antes de su descarga, protegiendo los ecosistemas acuáticos.

**Nota:** La tabla muestra posibles aplicaciones de la nanocelulosa como material filtrante de microplásticos en diferentes contextos basados en el uso que los seres humanos le dan al agua.

**Fuente:** Elaboración propia

Es importante destacar que estos diseños representan aplicaciones potenciales de la nanocelulosa como material filtrante en diversos contextos. Sin embargo, son meramente

conceptuales y no han sido puestos a prueba en situaciones reales. Aunque los diseños están bien fundamentados y se acercan a una posible implementación práctica, todavía no están listos para ser utilizados sin una validación y desarrollo adicional.

## **Conclusiones**

En conclusión, después de varias iteraciones dentro de las etapas de la metodología Design Thinking, se logró realizar un avance en el estado del arte con respecto a los diferentes métodos de filtración de microplásticos en el agua. Con la realización de este proyecto, se demostró que es posible hacer uso de un nuevo biomaterial como la nanocelulosa, empleándolo como capa filtrante dentro de una gran variedad de filtros físicos tipo membrana. Al usar este material como medio filtrante, aumenta la cantidad de microplásticos removidos de las fuentes hídricas, como se evidencia en las pruebas de laboratorio, siendo esta una mejor alternativa que otros materiales como la celulosa. Por medio de este avance, se busca que los estudios futuros tengan una mayor información sobre las características y el comportamiento de este material, permitiendo así avanzar en la construcción de una solución para un problema tan extenso y complejo como es la contaminación por microplásticos en las fuentes hídricas terrestres.

## Presupuesto

Para la gestión del presupuesto del proyecto, se utilizó un canal de compras único con un responsable designado. De esta forma, fue fácil llevar el registro del dinero utilizado a lo largo del proyecto. Uno de los factores importantes es que el proyecto giró en torno al desarrollo y estudio de este nuevo material, la nanocelulosa; por tanto, la mayor carga fue de investigación y síntesis de textos, que en su totalidad fueron gratuitos. Además, la Universidad Javeriana y la Universidad de Aalto proporcionaron todos los insumos para realizar la etapa de prototipado, como los geles de nanocelulosa y el filamento para las impresiones en 3D. Lo único que se compró para esta etapa fueron los filtros Whatman (de celulosa) y las muestras de microplásticos homogéneos. Por otro lado, no se hizo uso de la tecnología del vidrio de nuestro patrocinador, Glassomer. Por último, se incurrieron en gastos para la visita a la planta de tratamiento de aguas residuales y los materiales del stand de la gala. Como se puede ver, se utilizaron 3.900,75 euros del presupuesto de 10.000 euros.

**Tabla 6**

*Relación de gastos del proyecto*

No. Factura	Descripción	Fecha	Monto (Euros)
1	Cena integración del equipo	12/10/2023	€ 40.50
2	Suscripción web investigación	28/11/2023	€ 2.99
3	Visita planta de tratamiento de agua residual	2/2/2024	€ 66.30
4	Microplásticos	9/4/2024	€ 2878
5	Tintura de harina	24/04/2024	€ 17.99
6	Temu supplies	25/04/2024	€ 75.88

7	Luces UV	3/5/2024	€ 20.98
8	Camisetas del equipo	26/04/2024	€ 351
9	Posters	3/5/2024	€ 29
10	Cortinas Gala	15/05/2024	€ 349.93
11	Suministros del JSYK	15/05/2024	€ 14.25
12	Suministros de Tokmanni	15/05/2024	€ 53.93
Total			€ 3900.75

**Nota:** En la tabla se detalla en qué se invirtió el dinero que se tenía disponible para el desarrollo del proyecto.

**Fuente:** Elaboración propia

## **Recomendaciones**

### **Investigación sobre combinaciones de materiales**

Explorar la combinación de nanocelulosa con otros materiales que puedan mejorar las propiedades mecánicas y la eficacia de filtración. Por ejemplo, incorporar materiales con propiedades hidrofóbicas o iones metálicos podría mejorar la captura de partículas más pequeñas y aumentar la durabilidad del filtro.

### **Optimización de la estructura del filtro**

Continuar experimentando con diferentes estructuras y configuraciones de los filtros para maximizar la superficie de contacto y la eficiencia en la retención de microplásticos. Esto incluye ajustar el tamaño de poro, la densidad del filtro y la geometría global del sistema.

### **Evaluación de la vida útil y reciclabilidad**

Realizar estudios a largo plazo sobre la vida útil y la eficiencia de los filtros a lo largo del tiempo. Además, desarrollar estrategias para reciclar o reutilizar los componentes del filtro una vez que han alcanzado el final de su vida útil.

### **Desarrollo de métodos de prueba estándar**

Establecer métodos de prueba estandarizados para evaluar la efectividad de los filtros. Esto incluye protocolos para medir la eficiencia de filtración bajo diferentes condiciones operativas y para diferentes tipos de agua.

**Estudios de impacto ambiental y de salud**

Investigar más a fondo el impacto ambiental y de salud de los filtros de nanocelulosa, asegurándose de que no introduzcan subproductos nocivos en el agua y evaluar su comportamiento en diferentes entornos ecológicos.

## Futuros trabajos

Durante el proceso realizado, se identificaron una serie de vacíos de información y ejecución que podrían ser abordados en futuras investigaciones. Estos incluyen:

1. **Concientización sobre los microplásticos:** Se deben realizar programas de concientización para el público general. Además, se debe incentivar iniciativas de conocimiento básico y específico. Una muestra de esto es la página de web desarrollada con el patrocinador para dar un entendimiento básico de la problemática, este contenido estará disponible para el público en general a partir del 15 de junio de 2024 en el siguiente link: <https://clean-waters.co/>.
2. **Estudio de la nanocelulosa como nuevo biomaterial con potencial de filtración de microplásticos:** Investigar las propiedades y eficacia de la nanocelulosa para eliminar microplásticos del agua.
3. **Desarrollo de un filtro de agua potable a base de nanocelulosa para uso doméstico:** Crear y evaluar un filtro doméstico que utilice nanocelulosa para purificar el agua de microplásticos.
4. **Presencia de microplásticos en los sedimentos acuáticos:** Analizar la distribución y concentración de microplásticos en los sedimentos de diferentes cuerpos de agua.
5. **Situación de los microplásticos en Colombia y acciones actuales frente a ellos:** Investigar la prevalencia de microplásticos en Colombia y las medidas que se están tomando para abordarlos.

6. **Legislaciones o regulaciones sobre los microplásticos a nivel nacional e internacional:** Examinar las políticas y regulaciones existentes en diferentes países respecto a la gestión de microplásticos.
7. **Gestión de aguas residuales en Colombia:** Evaluar cómo se manejan las aguas residuales en el país y su papel en la proliferación de microplásticos.
8. **Disposición final de los microplásticos removidos del agua:** Investigar métodos efectivos y sostenibles para la eliminación de microplásticos extraídos del agua.
9. **Sistema para la estandarización de la toma de muestras y detección de microplásticos en el agua:** Desarrollar un sistema uniforme para la recolección y análisis de muestras de agua en busca de microplásticos.

Estas áreas representan oportunidades clave para profundizar en el conocimiento y mejorar las prácticas en la gestión y mitigación de la contaminación por microplásticos.

## Proceso de diseño desde cada carrera

### Angelo

Este proyecto me permitió emplear conocimientos específicos desde el campo de la ingeniería de sistemas y computación. La primera habilidad fue el discernimiento de forma estructurada y sistemática para enfrentar diferentes situaciones, seguido por la gestión del desarrollo de la página web para nuestro patrocinador. Esto incluyó la generación de la propuesta, el levantamiento de información, la identificación de componentes funcionales y no funcionales, la planificación y ejecución de todas las tareas necesarias para la creación del diseño, implementación en código y el despliegue del sitio web.

Mi función específica dentro del equipo fue la de Project Manager en Colombia, encargándome de la gestión general del proyecto, lo que incluyó: planificación de tareas, creación de cronogramas, manejo de presupuestos, levantamiento de recursos, gestión de interesados y gestión de compras para minimizar el costo de realización del viaje internacional. Del mismo modo, lideré el equipo en situaciones de estrés, gestioné conflictos y la comunicación con superiores.

Dada la naturaleza de este proyecto, pude desarrollarme en diferentes áreas de conocimiento, debido a que, siguiendo la metodología Design Thinking, fue necesario emplear múltiples habilidades y herramientas aprendidas durante mi proceso académico, como el pensamiento crítico, la investigación y síntesis de diferentes tipos de textos académicos, y la redacción de informes para distintos tipos de interesados, desde un documento interno para el equipo hasta una presentación ilustrativa para nuestros patrocinadores. Además, con este proceso exploré un campo en el que me había desempeñado poco, como es el diseño. Por último, empleé

constantemente habilidades blandas como el liderazgo, la resolución de conflictos y, lo que fue más retador para mí, la comunicación asertiva en otro idioma.

## **Deivy**

Embarcarme en el proyecto de desarrollo de filtros de nanocelulosa fue inicialmente un desafío que me sacó de mi zona de confort. Aunque mi formación como ingeniero mecánico no se alinea directamente con la química de materiales, descubrí que mi habilidad para resolver problemas y mi entendimiento de los procesos de fabricación podía ofrecer mucho al proyecto. Al principio, me concentré en entender profundamente las propiedades y el potencial de la nanocelulosa como material filtrante, lo que me permitió contribuir de manera significativa al diseño conceptual de los filtros.

A lo largo del proyecto, una de mis principales contribuciones fue facilitar la comunicación entre los miembros del equipo, que provenían de diferentes disciplinas. Esto no solo ayudó a integrar diversas perspectivas en nuestro enfoque, sino que también aseguró que todas las ideas fueran consideradas y valoradas. Mi enfoque siempre estuvo en mantenernos alineados con nuestros objetivos de sostenibilidad y eficacia, guiando al equipo a través de cada etapa del desarrollo del producto.

Durante las fases de prototipado y prueba, apliqué mis conocimientos técnicos para mejorar la manufactura de los filtros. Me encargué de optimizar los diseños para la fabricación, asegurando que fueran tanto funcionales como eficientes en términos de recursos. Este proceso no solo fue crucial para validar nuestras ideas, sino que también me proporcionó una valiosa experiencia práctica en el trabajo con nuevos materiales y tecnologías emergentes.

El proyecto culminó en una serie de pruebas que demostraron la viabilidad de nuestros filtros. A pesar de los desafíos, cada obstáculo superado fue una oportunidad de aprendizaje y un paso hacia nuestro objetivo final. La experiencia de ver cómo nuestras ideas se materializaban y

cumplían con los criterios de rendimiento deseados fue inmensamente gratificante. Este proyecto no solo enriqueció mi experiencia como ingeniero mecánico, sino que también reforzó mi pasión por la innovación y la sostenibilidad en el ámbito de la ingeniería.

**Natalia**

El PdP es un proyecto transdisciplinario y, aunque el reto que nos correspondió resolver no estaba directamente relacionado con mi carrera de Gastronomía y Artes Culinarias, pude hacer contribuciones significativas durante todo el proceso. Más allá de los conocimientos específicos de mi campo, aporté de varias maneras. En primer lugar, lideré al equipo destacando las potencialidades de cada miembro, lo que fomentó un ambiente de trabajo colaborativo y eficiente. Además, participé en la creación de ideas innovadoras y en el diseño de la experiencia de usuario, ambos aspectos cruciales para el éxito del proyecto.

En el ámbito de la investigación, me dediqué a buscar y seleccionar fuentes confiables que enriquecieran nuestro trabajo, asegurando que estuviera bien fundamentado. También me encargué de la redacción de textos, lo que incluyó la elaboración de contenidos claros y coherentes para distintas partes del proyecto. Mi apoyo en la creación de piezas gráficas y presentaciones fue clave para comunicar nuestras ideas de manera efectiva y atractiva.

Asimismo, desempeñé un papel fundamental en la planificación y gestión de recursos, asegurando que todos los elementos necesarios estuvieran disponibles para la realización del stand. Este proceso incluyó la adquisición de implementos y la coordinación logística. A través de estas diversas actividades, demostré que mis habilidades van más allá de la gastronomía, contribuyendo significativamente al éxito del proyecto.

## Referencias

- Bhuyan, Md. S. (2022). Effects of Microplastics on Fish and in Human Health. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.827289>
- Bostan, N., Ilyas, N., Akhtar, N., Mehmood, S., Saman, R. U., Sayyed, R., Shatid, A. A., Alfaifi, M. Y., Elbehairi, S. E. I., & Pandiaraj, S. (2023). Toxicity assessment of microplastic (MPs); a threat to the ecosystem. *Environmental Research*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116523>
- Boucher, J., & Friot, D. (2017). *Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources*. Gland, Switzerland: IUCN. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2017-002-En.pdf>
- Buteler, M. (2019). El problema del plástico: ¿Qué es la contaminación por plástico y por qué nos afecta a todos? *Desde la Patagonia difundiendo saberes*. 16(28), 56–60. [https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/109678/CONICET\\_Digital\\_Nro.9fbc68cb-0eb2-4000-b7f6-ac241af6e3f0\\_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/109678/CONICET_Digital_Nro.9fbc68cb-0eb2-4000-b7f6-ac241af6e3f0_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Castañeta, G., Gutiérrez, A. F., Nacaratte, F. y Manzano, C. A. (2020). Microplásticos: Un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición. *Revista Boliviana de Química*, 37(3), 160-175. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.37.3.4>
- Cherian, A. G., Liu, Z., McKie, M. J., Husein Almuhtaram, & Andrews, R. C. (2023). Microplastic Removal from Drinking Water Using Point-of-Use Devices. *Polymers*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/polym15061331>

Environmental Services Department City of Guelph. (s.f). <https://guelph.ca/wp-content/uploads/IntroductionToWastewater.pdf>

European Chemicals Agency. (2017). *How to decide whether a substance is a polymer or not and how to proceed with the relevant registration.*

[https://echa.europa.eu/documents/10162/23221373/example\\_how\\_to\\_register\\_non-polymer\\_en.pdf/0b2f82af-42a0-05b6-7d24-63d03e435a18](https://echa.europa.eu/documents/10162/23221373/example_how_to_register_non-polymer_en.pdf/0b2f82af-42a0-05b6-7d24-63d03e435a18)

Gazal, A. & Gheewala, S. (2020). Plastics, microplastics and other polymer materials -A threat to the environment. *Journal of Sustainable Energy and Environment*, 11, 113–122.

<https://jseejournal.com/media/240/attachment/Plastics,%20microplastics%20and%20pp.%20113-122.pdf>

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Ghosh, S., Sinha, J.K., Ghosh S., Vashisth, K., Han, S. & Bhaskar, R. (2023). Microplastics as an Emerging Threat to the Global Environment and Human Health. *Sustainability*, 15(14),

<https://doi.org/10.3390/su151410821>

Interaction Design Foundation - IxDF. (2016, May 25). What is Design Thinking (DT)?

Interaction Design Foundation - IxDF. <https://www.interaction-design.org/literature/topics/design-thinking>

Iyare, P. U., Ouki, S. K., & Bond, T. (2020). Microplastics removal in wastewater treatment plants: a critical review. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(10),

2664–2675. <https://doi.org/10.1039/D0EW00397B>

Laskar, N., & Kumar, U. (2019). Plastics and microplastics: A threat to environment.

*Environmental Technology & Innovation*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100352>

- Leppänen, I., Lappalainen, T., Lohtander, T., Jonkergouw, C., Arola, S., & Tammelin, T. (2022). Capturing colloidal nano-and microplastics with plant-based nanocellulose networks. *Nature Communications*, 13(1).  
[https://acris.aalto.fi/ws/portalfiles/portal/82036494/CHEM\\_Leppanen\\_et\\_al\\_Capturing\\_colloidal\\_nano\\_and\\_microplastics\\_2022\\_Nature\\_Communications.pdf](https://acris.aalto.fi/ws/portalfiles/portal/82036494/CHEM_Leppanen_et_al_Capturing_colloidal_nano_and_microplastics_2022_Nature_Communications.pdf)
- Liu, Y., Liu, H., & Shen, Z. (2021). Nanocellulose Based Filtration Membrane in Industrial Waste Water Treatment: A Review. *Materials*, 14(18).  
<https://doi.org/10.3390/ma14185398>
- Mautner, A. (2020). Nanocellulose water treatment membranes and filters: a review. *Polymer International*, 69(9), 741–751. <https://doi.org/10.1002/pi.5993>
- Piperagkas, O., Papageorgiou, N., & Karakassis, I. (2019). Qualitative and quantitative assessment of microplastics in three sandy Mediterranean beaches, including different methodological approaches. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219, 169–175.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.02.016>
- Prasath, B.B. & Poon, K. (2018). The Impacts of Microplastics to Environment. *Journal of Environmental Hazards*, 1(1), 101. <https://www.hilarispublisher.com/open-access/the-impacts-of-microplastics-to-environment.pdf>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo*. PNUD.  
<https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., &

- Giorgini, E. (2020). Plasticenta: Microplastics in Human Placenta. *BioRxiv (Cold Spring Harbor Laboratory)*. <https://doi.org/10.1101/2020.07.15.198325>
- Ross, P., van Schagen, K., & Rietveld, L. (2020). Design methodology to determine the water quality monitoring strategy of a surface water treatment plant in the Netherlands. *Drinking Water Engineering and Science*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.5194/dwes-13-1-2020>
- Scott, K. & Hughes, R. (Eds.). (1996). *Industrial membrane separation technology*. Springer Science+Business Media Dordrecht.
- Selvam, S., Manisha, A., Venkatramanan, S., Chung, S. Y., Paramasivam, C. R., & Singaraja, C. (2020). Microplastic presence in commercial marine sea salts: A baseline study along Tuticorin Coastal salt pan stations, Gulf of Mannar, South India. *Marine Pollution Bulletin*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110675>
- Soumya Shradhdya, P., Rishabb, A., Bahl, B., Maheshwari, K., & Banerjee, A. (2023). Impact of plastics in the socio-economic disaster of pollution and climate change: The roadblocks of sustainability in India. In Srivastav, A., Dubey, A., Kumar, A., Narang, S. & Khan, M. (Eds.). *Visualization Techniques for Climate Change with Machine Learning and Artificial Intelligence* (pp.77–100). Elsevier.
- Srivastava, A. (2023). *Plastic Pollution & Solution*. <https://www.ijfmr.com/papers/2023/5/8187.pdf>
- United Nations Environment Programme UNEP. (2021). *From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution*.

<https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>

Voisin, H., Bergström, L., Liu, P., & Mathew, A. (2017). Nanocellulose-Based Materials for Water Purification. *Nanomaterials*, 7(3), 57. <https://doi.org/10.3390/nano7030057>

Water Science School. (2019). *El Ciclo del Agua, The Water Cycle, Spanish | U.S. Geological Survey*. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish>

Zinge, C., & Kandasubramanian, B. (2020). Nanocellulose based biodegradable polymers. *European Polymer Journal*, 133, 109758. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109758>