



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis y propuesta de mejora de sistemas de  
regeneración de aguas.

Autor: Sergio Barcala García

Director: María del Mar Cledera Castro

Co-Director: Íñigo Sanz Fernández

Madrid

Agosto de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título:

“Análisis y propuesta de mejora de sistemas de regeneración de aguas”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

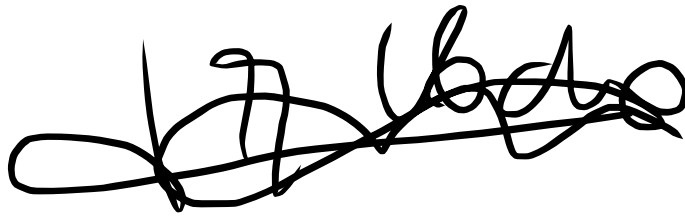
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Sergio Barcala García Fecha: ...16.../ ...08.../ ...2025...

Autorizada la entrega del proyecto

LOS DIRECTORES DEL PROYECTO



Fdo.: María del Mar Cledera Castro Fecha: 22./ 08./ 2025

Fdo.: Íñigo Sanz Fernández Fecha: ...../ ...../ .....



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis y propuesta de mejora de sistemas de  
regeneración de aguas.

Autor: Sergio Barcala García

Director: María del Mar Cledera Castro

Co-Director: Íñigo Sanz Fernández

Madrid

Agosto de 2025

# Agradecimientos

Me gustaría expresar mi gratitud a los directores de este Trabajo de Fin de Grado, los profesores María del Mar Cledera Castro e Íñigo Sanz Fernández, por proporcionarme la oportunidad de desarrollar este proyecto y por su orientación y dedicación durante el avance del mismo. Agradecer también a la empresa IBEROSPEC, por la donación por su parte de la instalación en la que se basa este trabajo, así como a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, por la oportunidad de formarme y abordar este proyecto. Finalmente, hacer especial mención al responsable del laboratorio de química de ICAI, Fernando Pérez García, por su apoyo durante los ensayos, su facilitación del material y su constante ayuda y predisposición ante cualquier necesidad surgida.

# ANÁLISIS Y PROPUESTA DE MEJORA DE SISTEMAS DE REGENERACIÓN DE AGUAS.

**Autor: Barcala García, Sergio**

Directores: María del Mar Cledera Castro e Íñigo Sanz Fernández.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el análisis y propuesta de mejora de un sistema de regeneración de aguas mediante filtración, basado en una membrana cerámica de carburo de silicio de la empresa Cembrane. El proyecto se enmarca en la creciente necesidad de optimización de los recursos hídricos en España, país especialmente afectado por fenómenos de sequía y estrés hídrico. Para ello, se evaluó en el laboratorio la instalación experimental de filtración, analizando su rendimiento en la mejora de diferentes parámetros como la turbidez, la conductividad, el pH y las sales inorgánicas en diferentes tipos de muestras, desde aguas de captación bruta de plantas de potabilización y agua tratada mediante coagulación-floculación para ensayos Jar-Test hasta clarificado real de fangos industriales.

Los resultados mostraron la elevada eficacia del sistema en la clarificación y la mejoría de la calidad del agua, alcanzando reducciones de turbidez de hasta un 99 % en algunos casos y mejoras significativas en los parámetros fisicoquímicos estudiados, incluso en escenarios de alta carga contaminante. Además, se constató la sinergia entre los tratamientos convencionales de coagulación-floculación y la filtración por membrana, confirmando su idoneidad como etapa avanzada en procesos tanto de potabilización como de depuración.

Paralelamente, durante la experimentación se detectaron limitaciones en el diseño del prototipo, como la pérdida de presión al descender el nivel del agua, la baja velocidad de filtración en muestras con elevado nivel de sólidos en suspensión o la dificultad de limpieza del sistema. Estas cuestiones dieron lugar a una propuesta de mejora mediante el diseño actualizado de la instalación, que incorpora tres membranas, un doble circuito de filtración y un sistema de drenaje y limpieza más eficiente. En conjunto, el proyecto contribuye al avance de tecnologías de regeneración de agua más sostenibles y eficientes, con un alto potencial de aplicación en contextos industriales, urbanos y medioambientales, y está fuertemente alineado con los actuales objetivos globales de sostenibilidad.

**Palabras clave:** Agua, Membrana, Residual, Sistema de Regeneración, Filtración, Ensayo, Captación, Coagulación, Floculación.

## 1. Introducción

El presente Trabajo de Fin de Grado aborda el análisis y la propuesta de mejora de un sistema de regeneración de aguas mediante filtración con membrana cerámica de carburo de silicio. Este proyecto se enmarca en un contexto de creciente presión sobre los recursos hídricos, en el que la reutilización y la sostenibilidad constituyen pilares fundamentales para garantizar el abastecimiento futuro. España, caracterizada por una disponibilidad desigual de agua y por fenómenos recurrentes de sequía, representa un

escenario especialmente crítico que refuerza la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas innovadoras [1].

El proyecto se ha centrado en evaluar el rendimiento de una instalación experimental de filtración, proporcionada por la empresa IBEROSPEC Environmental Technologies [2], mediante la realización de ensayos con diferentes tipos de muestras de agua, desde aguas de captación hasta clarificados de fangos industriales, con el fin de determinar su eficacia en cuanto a funcionamiento y en la reducción de diferentes parámetros como la turbidez y las sales inorgánicas, así como en la mejora de otros parámetros fisicoquímicos esenciales, especialmente el pH y la conductividad. Los resultados obtenidos demuestran la capacidad del sistema para alcanzar calidades exitosas en relación a los estándares de reutilización y potabilización, confirmando su idoneidad como etapa avanzada de tratamiento.

Paralelamente, se identificaron limitaciones operativas de la instalación que fueron abordadas mediante una propuesta de rediseño, incorporando mejoras orientadas a incrementar el caudal de filtración, facilitar la limpieza, permitir una doble etapa de tratamiento y optimizar la manejabilidad. Esta propuesta se presenta como una base sólida para futuras investigaciones y para la aplicación de esta tecnología en contextos industriales y medioambientales reales.

En definitiva, este trabajo contribuye al estudio y la mejora de tecnologías de regeneración de agua, alineándose además con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, y plantea soluciones viables y sostenibles que favorecen la transición hacia un modelo de economía circular en la gestión de los recursos hídricos.

## **2. Definición del proyecto**

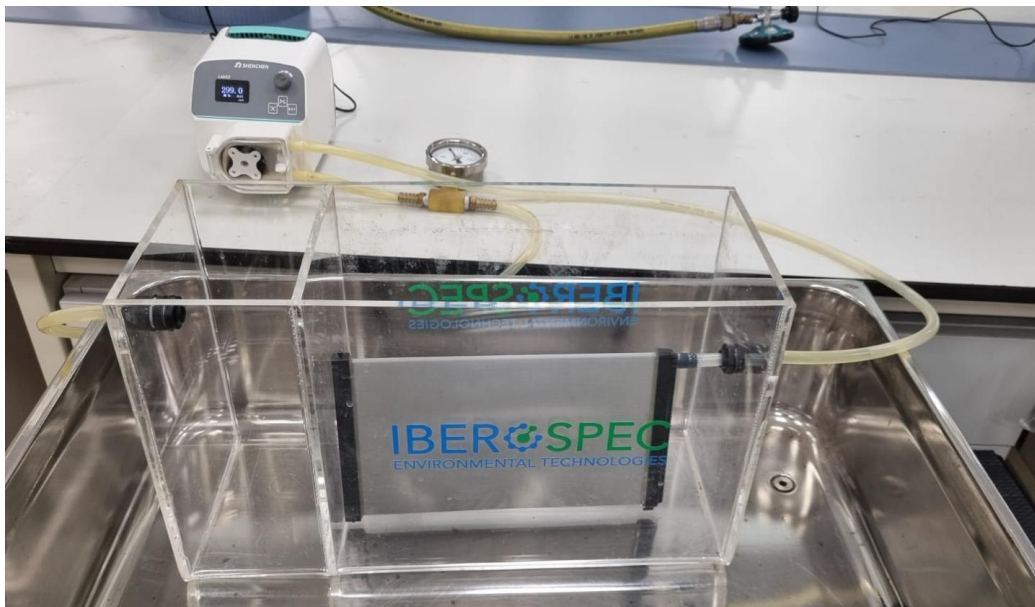
El proyecto desarrollado tiene como finalidad principal el estudio, análisis y mejora de un sistema de regeneración de agua basado en una instalación de filtración por membrana cerámica de carburo de silicio. La investigación se planteó desde un enfoque técnico y experimental, con el objetivo de comprobar la eficacia del prototipo en la reducción de contaminantes y en la mejora de la calidad del agua, así como de identificar las limitaciones operativas del equipo para proponer soluciones de optimización.

La metodología se estructuró en distintas fases complementarias. En primer lugar, se realizó un estudio de los requisitos de calidad y salubridad establecidos por la normativa española para diferentes usos del agua regenerada, lo que permitió fijar un marco de referencia para evaluar el rendimiento del sistema. A continuación, se analizó el diseño y funcionamiento del prototipo, describiendo sus componentes principales, como la membrana de ultrafiltración, la bomba peristáltica y las cavidades del soporte de metacrilato, así como sus condiciones de operación. Posteriormente, se llevaron a cabo ensayos experimentales con diferentes tipos de muestras de agua (captación bruta, agua tratada mediante coagulación-floculación y clarificado de fangos), comparando los valores de parámetros relevantes antes y después del filtrado.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos y de los problemas detectados durante la operación (baja velocidad de filtración en muestras con alta carga de sólidos, dificultad de vaciado, desgaste de tuberías, pérdida de presión al descender el nivel de agua, entre otros), se desarrolló una propuesta de rediseño del sistema. Esta incluye la incorporación de múltiples membranas, un doble circuito de filtración, un sistema de drenaje eficiente y mejoras en la manejabilidad, con el propósito de aumentar la eficacia del tratamiento y facilitar su aplicación en contextos industriales o ambientales a mayor escala.

### 3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

La instalación experimental, eje de este proyecto de este estudio, fue concebida como un banco de pruebas compacto para la evaluación del comportamiento de la membrana cerámica de ultrafiltración de la compañía Cembrane [3] en diferentes condiciones de operación. El equipo, proporcionado a ICAI por la empresa IBEROSPEC, está constituido por una estructura de metacrilato transparente dividida en dos cavidades: una principal, destinada a alojar la membrana de carburo de silicio, y otra secundaria, en la que se recoge el agua filtrada, denominada también permeado. Ambas se encuentran conectadas mediante un sistema hidráulico impulsado por una bomba peristáltica, que genera la presión necesaria para forzar el paso del fluido a través de la membrana. La Figura 1 muestra una fotografía de la instalación al completo:



*Figura 1 - Montaje completo de la instalación previo al ensayo de filtración (elaboración propia).*

El elemento central del sistema es la membrana de carburo de silicio, un material con alta resistencia química, mecánica y térmica, capaz de retener partículas de tamaño igual o superior a  $0,1 \mu\text{m}$ . Gracias a su elevada permeabilidad presenta un rendimiento superior frente a membranas convencionales, lo que la hace idónea para aplicaciones exigentes en tratamiento de aguas potables, residuales o industriales. Además, el sistema permite

alternar entre los modos de filtración y contralavado, prolongando su vida útil y facilitando la limpieza de la superficie filtrante.

La instalación se diseñó para simular condiciones de operación reales en laboratorio, integrando accesorios de control como un manómetro analógico, un sistema de tuberías flexibles y una pantalla de control en la bomba. Todo el conjunto fue montado sobre un carro elevador de aluminio, lo que asegura su portabilidad y facilita las tareas de montaje, limpieza y almacenamiento.

#### **4. Resultados**

Los ensayos realizados en el laboratorio permitieron caracterizar el comportamiento de la instalación de filtración en diferentes escenarios de complejidad creciente. Se trabajó con tres tipos de muestras. Inicialmente, agua de captación bruta de procesos de potabilización, menos exigente; a continuación, agua tratada mediante coagulación-floculación, destinada a la realización del ensayo Jar – Test, y finalmente agua procedente de un clarificado de fangos industriales. En todos los casos, se compararon los valores de parámetros clave antes y después de la filtración, obteniéndose resultados concluyentes sobre la eficacia del sistema.

En los primeros ensayos con aguas de captación, se constató la capacidad de la membrana para reducir de manera consistente la turbidez, pasando de valores iniciales en torno a 70 NTU a menos de 1 NTU en el permeado. Asimismo, se observaron descensos significativos en la conductividad y en la concentración de sales inorgánicas como cloruros, nitratos y sulfatos. Estos resultados evidencian la eficacia del sistema en escenarios de exigencia moderada, confirmando la idoneidad de la membrana como etapa avanzada de potabilización.

En los ensayos con agua tratada por coagulación-floculación (Jar-Test), la combinación del pretratamiento químico con la filtración por membrana permitió alcanzar niveles de turbidez extremadamente bajos, como 0,27 NTU, con reducciones superiores al 99 %. Este comportamiento demostró la gran sinergia entre ambos procesos, favoreciendo la clarificación del agua y la retención de partículas coloidales. Paralelamente, se registraron disminuciones en la conductividad y un incremento del oxígeno disuelto, atribuible a la aireación del proceso y a la reducción de materia orgánica.

El ensayo final con agua de clarificado de fangos representó el escenario más exigente, dado su alto contenido de sólidos y materia orgánica residual. A pesar de esta complejidad, el sistema logró reducir la turbidez inicial de 96,6 NTU hasta 21,9 NTU, es decir, una mejora del 77 %. Además, la aplicación de coagulantes mostró que el sulfato de aluminio resultaba más eficaz que el cloruro férrico, alcanzando turbideces finales cercanas a 1,5 NTU en el clarificado. En paralelo, se registró una disminución de la conductividad (de 720 a 648  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y un notable aumento del oxígeno disuelto (del 19 % al 60 % de saturación), indicadores de una mejora sustancial de la calidad ecológica

del agua. La Figura 2 muestra el proceso de filtración del ensayo final, en el que se aprecia notablemente el mencionado descenso de la turbidez.



*Figura 2 - Proceso de filtrado de muestra de clarificado, 21 de mayo de 2025, (Elaboración propia)*

## 5. Conclusiones

El desarrollo del proyecto ha permitido demostrar la eficacia del sistema de filtración en distintos escenarios de tratamiento de agua, así como identificar las principales limitaciones operativas del prototipo y proponer soluciones de mejora.

Los ensayos evidenciaron que la membrana es capaz de reducir de forma drástica la turbidez, hasta valores inferiores a 1 NTU en condiciones controladas, y de provocar descensos significativos en la conductividad y en la concentración de sales inorgánicas. En escenarios más exigentes, como el tratamiento de aguas procedentes de clarificados de fangos, se logró una mejora notable de la calidad del efluente, acompañada de un aumento del oxígeno disuelto y de la eficacia del proceso Jar-Test. Además, la reducción de turbidez fue también notable, aunque no excelente como en ensayos previos, lo que sugiere la optimización del proceso añadiendo una segunda etapa de filtrado. Estos resultados confirman la viabilidad del sistema como etapa avanzada tanto en procesos de potabilización como en depuración.

Asimismo, el proyecto reveló una serie de limitaciones en el diseño inicial de la instalación, como la baja velocidad de filtración con aguas muy cargadas, la pérdida de presión al descender el nivel de agua, el desgaste de tuberías y la dificultad de la limpieza y el vaciado del sistema. Estas cuestiones fueron abordadas mediante una propuesta de mejora, apreciable en la Figura 3, diseñando un nuevo modelo, compuesto por una estructura de metacrilato con tres cavidades en vez de dos, tres membranas y dos bombas

peristálticas, permitiendo incrementar el caudal, mejorar la eficiencia en muestras complejas, facilitar la limpieza y posibilitar una segunda etapa de filtración.

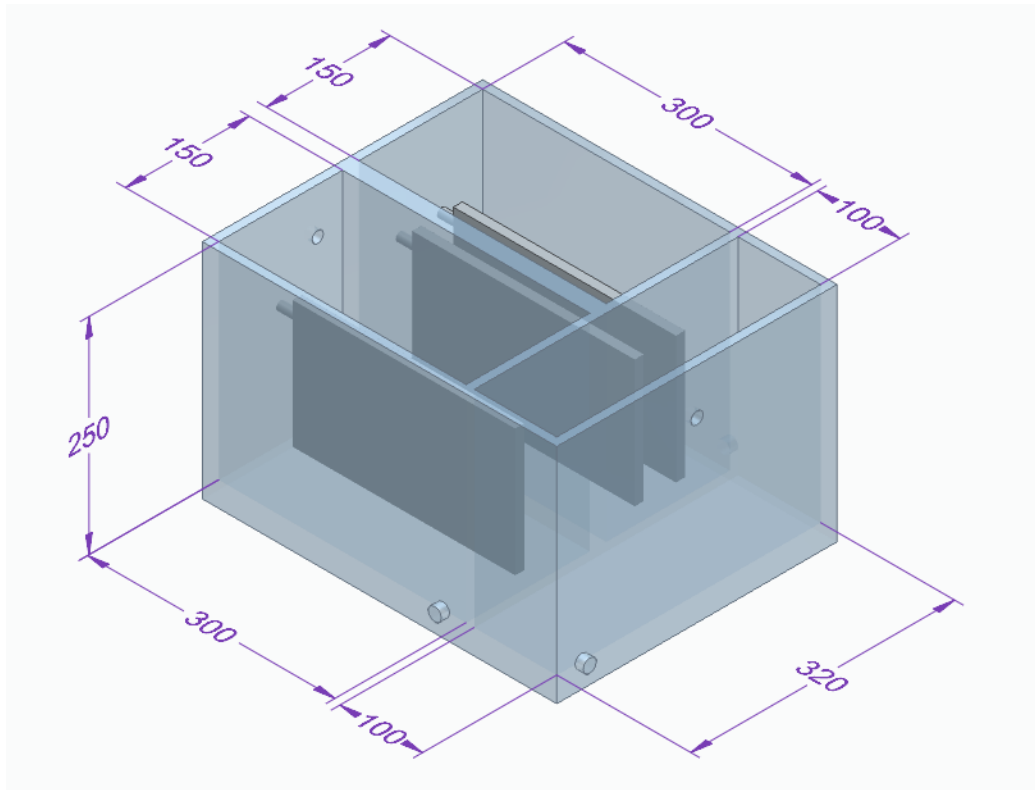


Figura 3 - Modelado de la instalación de filtración mejorada, cotas en milímetros. (Elaboración propia)

En definitiva, este trabajo aporta una base sólida para el desarrollo de sistemas de regeneración de agua más eficientes y sostenibles, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y con la transición hacia un modelo de economía circular. La experiencia adquirida en este prototipo abre la puerta a su aplicación a mayor escala en contextos industriales, urbanos y medioambientales, donde el acceso a agua de calidad es cada vez más crítico.

## 6. Referencias

- [1] Confederación Hidrográfica del Segura, «SITUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ESPAÑA: EFECTOS,» *Ministerio de Medio Ambiente*, <https://www.chsegura.es/es/cuenca/planificacion/plan-hidrologico-nacional/evaluacion-ambiental-estrategica/>.
- [2] IBEROSPEC Environmental Technologies, «Membranas cerámicas de ultrafiltración Cembrane para el tratamiento de agua potable y agua residual,» 10 Marzo 2022, <https://iberospec.com/noticias/membranas-ceramicas-de-ultrafiltracion-cembrane-para-el-tratamiento-de-agua-potable-y-agua-residual/>.
- [3] Cembrane, «Clean Water For Life,» <https://cembrane.com/>.

# ANALYSIS AND IMPROVEMENT PROPOSAL OF WATER REGENERATION SYSTEMS

**Author: Barcala García, Sergio.**

Supervisors: María del Mar Cledera Castro and Íñigo Sanz Fernández.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## ABSTRACT

This Final Degree Project focuses on the analysis and improvement proposal of a water regeneration system through filtration, based on a silicon carbide ceramic membrane developed by the company Cembrane. The project is framed within the growing need to optimize water resources in Spain, a country particularly affected by droughts and water stress. For this purpose, the experimental filtration installation was evaluated in the laboratory, analyzing its performance in improving parameters such as turbidity, conductivity, pH, and inorganic salts in different types of samples, ranging from raw intake from potable water treatment plants and water treated by coagulation-flocculation in Jar-Test tests to real sludge clarification from industrial facilities.

The results showed the high efficiency of the system in water clarification and quality improvement, achieving turbidity reductions of up to 99% in some cases and significant improvements in the physicochemical parameters studied, even under high contaminant load scenarios. Furthermore, the synergy between conventional coagulation-flocculation treatments and membrane filtration was confirmed, reinforcing its suitability as an advanced stage in both drinking water treatment and wastewater purification processes.

In parallel, several limitations were detected in the prototype design during the experimental phase, such as pressure loss when the water level dropped below the membrane, low filtration speed in samples with a high content of suspended solids, and difficulties in cleaning the system. These issues led to an updated design proposal for the installation, incorporating three membranes, a double filtration circuit, and a more efficient drainage and cleaning system. Overall, the project contributes to the development of more sustainable and efficient water regeneration technologies, with strong potential for application in industrial, urban, and environmental contexts, and is closely aligned with current global sustainability objectives.

**Keywords:** Water, Membrane, Wastewater, Regeneration System, Filtration, Trial, Intake, Coagulation, Flocculation.

## 1. Introduction

This Final Degree Project addresses the analysis and improvement proposal of a water regeneration system through filtration with a silicon carbide ceramic membrane. The project is framed within a context of increasing pressure on water resources, where reuse and sustainability constitute fundamental pillars to ensure future supply. Spain, characterized by an unequal availability of water and recurrent drought events, represents a particularly critical situation that reinforces the need to develop innovative technological solutions [1].

The project focused on evaluating the performance of an experimental filtration installation, provided by the company IBEROSPEC Environmental Technologies [2], by carrying out tests with different types of water samples, ranging from intake water to industrial sludge clarifications. The objective was to determine its effectiveness in terms of performance and in the reduction of parameters such as turbidity and inorganic salts, as well as in the improvement of other essential physicochemical parameters, especially pH and conductivity. The results obtained demonstrate the system's ability to achieve successful quality levels in relation to reuse and drinking water standards, confirming its suitability as an advanced treatment stage.

In parallel, the operational limitations of the installation were identified and addressed through a redesign proposal, which introduced improvements designed to increase filtration flow, facilitate cleaning, enable a double treatment stage, and optimize manageability. This proposal is presented as a solid base for future research and for the application of this technology in real industrial and environmental contexts.

In short, this work contributes to the study and improvement of water regeneration technologies, aligning with the United Nations Sustainable Development Goals, and proposes viable and sustainable solutions that foster the transition towards a circular economy model in water resource management.

## **2. Project definition**

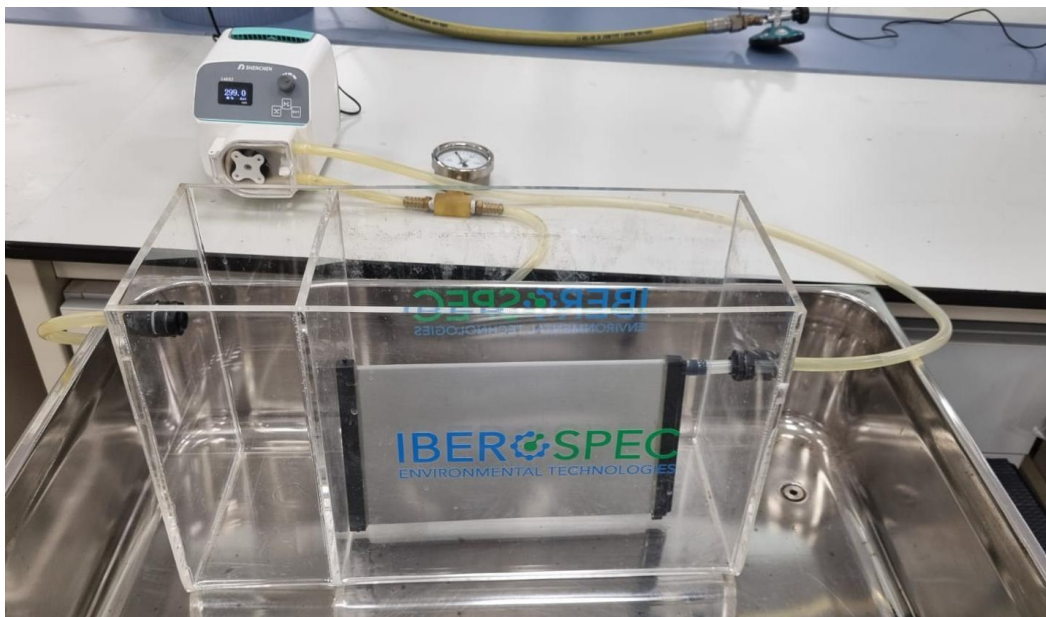
The main purpose of the project is the study, analysis and improvement of a water regeneration system based on a silicon carbide ceramic membrane filtration installation. The research was designed from a technical and experimental perspective, with the aim of verifying the effectiveness of the prototype in reducing contaminants and improving water quality, as well as identifying the operational limitations of the equipment to propose optimization solutions.

The methodology was structured in different complementary phases. First, a study of the quality and health requirements established by Spanish regulations for different uses of regenerated water was carried out, which made it possible to establish a reference framework to evaluate the performance of the system. Next, the design and operation of the prototype were analyzed, describing its main components, such as the ultrafiltration membrane, the peristaltic pump, and the methacrylate support chambers, as well as its operating conditions. Subsequently, experimental tests were carried out with different types of water samples (raw intake, water treated by coagulation-flocculation, and sludge clarification), comparing relevant parameters values before and after filtration.

Finally, based on the results obtained and the problems detected during operation (low filtration speed in samples with high solid loads, drainage difficulties, pipe wear, pressure loss when the water level dropped, among others), a system redesign proposal was developed. This included the incorporation of three membranes, a double filtration circuit, an efficient drainage system, and improvements in manageability, with the purpose of increasing treatment effectiveness and facilitating its application in industrial or environmental contexts on a larger scale.

### 3. Model's description

The experimental installation was conceived as a compact test bench for the evaluation of the performance of Cembrane's ceramic ultrafiltration membrane [3] under different operating conditions. The equipment, provided to ICAI by the company IBEROSPEC, consists of a transparent methacrylate structure divided into two chambers: a main one, designed to house the silicon carbide membrane, and a secondary one, where the filtered water, also referred to as permeate, is collected. Both chambers are connected through a hydraulic system driven by a peristaltic pump, which generates the necessary pressure to force the fluid through the membrane. Figure 1 shows a photograph of the complete installation.



*Figure 1 - Complete setup of the installation before the filtration test (Own elaboration).*

The central element of the system is the silicon carbide membrane, a material with high chemical, mechanical, and thermal resistance, capable of retaining particles with a size equal to or greater than  $0.1 \mu\text{m}$ . Thanks to its high permeability, it demonstrates superior performance compared to conventional membranes, making it suitable for demanding applications in drinking water, wastewater, or industrial water treatment. In addition, the system allows alternating between filtration and backwash modes, extending its service life and facilitating the cleaning of the filtering surface.

The installation was designed to simulate real operating conditions in a laboratory environment, integrating control accessories such as an analog manometer, a flexible piping system and a control screen on the pump. The entire assembly was mounted on an aluminum lifting cart, ensuring portability and facilitating assembly, cleaning and storage tasks.

#### 4. Results

The laboratory tests made it possible to characterize the behavior of the filtration installation in different scenarios of increasing complexity. Three types of samples were used: initially, raw intake water from drinking water treatment processes, which is less demanding, water treated through coagulation-flocculation for the Jar-Test and finally, water from an industrial sludge clarification process. In all cases, key parameter values were compared before and after filtration, obtaining conclusive results on the effectiveness of the system.

In the first tests with intake water, the membrane consistently reduced turbidity, lowering initial values of around 70 NTU to less than 1 NTU in the permeate. Significant decreases were also observed in conductivity and in the concentration of inorganic salts such as chlorides, nitrates, and sulfates. These results demonstrate the effectiveness of the system in moderately demanding scenarios, confirming the suitability of the membrane as an advanced stage of drinking water treatment.

In the tests with water treated by coagulation-flocculation (Jar-Test), the combination of chemical pretreatment with membrane filtration enabled extremely low turbidity levels, such as 0.27 NTU, with reductions greater than 99%. This performance demonstrated the strong synergy between both processes, enhancing water clarification and the retention of colloidal particles. At the same time, decreases in conductivity and an increase in dissolved oxygen were recorded, attributable to both aeration during the process and the reduction of organic matter.

The final test, with sludge clarification water, represented the most demanding scenario, given its high content of solids and residual organic matter. Despite this complexity, the system managed to reduce the initial turbidity from 96.6 NTU to 21.9 NTU, representing a 77% improvement. In addition, the application of coagulants showed that aluminum sulfate was more effective than ferric chloride, achieving final turbidity levels close to 1.5 NTU in the clarified water. In parallel, a decrease in conductivity was recorded (from 720 to 648  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), along with a notable increase in dissolved oxygen (from 19% to 60% saturation), both indicators of a substantial improvement in the quality of the water. Figure 2 shows the filtration process during the final test, clearly illustrating the mentioned reduction in turbidity.



*Figure 2 - Filtration process of clarified sample, May 21, 2025 (Own elaboration).*

## **5. Conclusions**

The development of the project has demonstrated the effectiveness of the filtration system in different water treatment scenarios, as well as identified the main operational limitations of the prototype and proposed improvement solutions.

The tests showed that the membrane is capable of drastically reducing turbidity, to values below 1 NTU under controlled conditions, and of producing significant decreases in conductivity and in the concentration of inorganic salts. In more demanding scenarios, such as the treatment of water from sludge clarification, a notable improvement in effluent quality was achieved, accompanied by an increase in dissolved oxygen and in the effectiveness of the Jar-Test process. Moreover, the reduction in turbidity was also remarkable, although not as excellent as in previous trials, suggesting that the process could be optimized by adding a second filtration stage. These results confirm the feasibility of the system as an advanced stage in both drinking water treatment and wastewater purification.

In addition, the project revealed several limitations in the initial design of the installation, such as low filtration speed with highly loaded waters, pressure loss when the water level decreased, pipe wear and difficulty in cleaning and draining the system. These issues were addressed through an improvement proposal, illustrated in Figure 3, by designing a new model composed of a methacrylate structure with three chambers instead of two, three membranes, and two peristaltic pumps, allowing an increase in flow, greater efficiency with complex samples, easier cleaning, and the possibility of a second filtration stage.

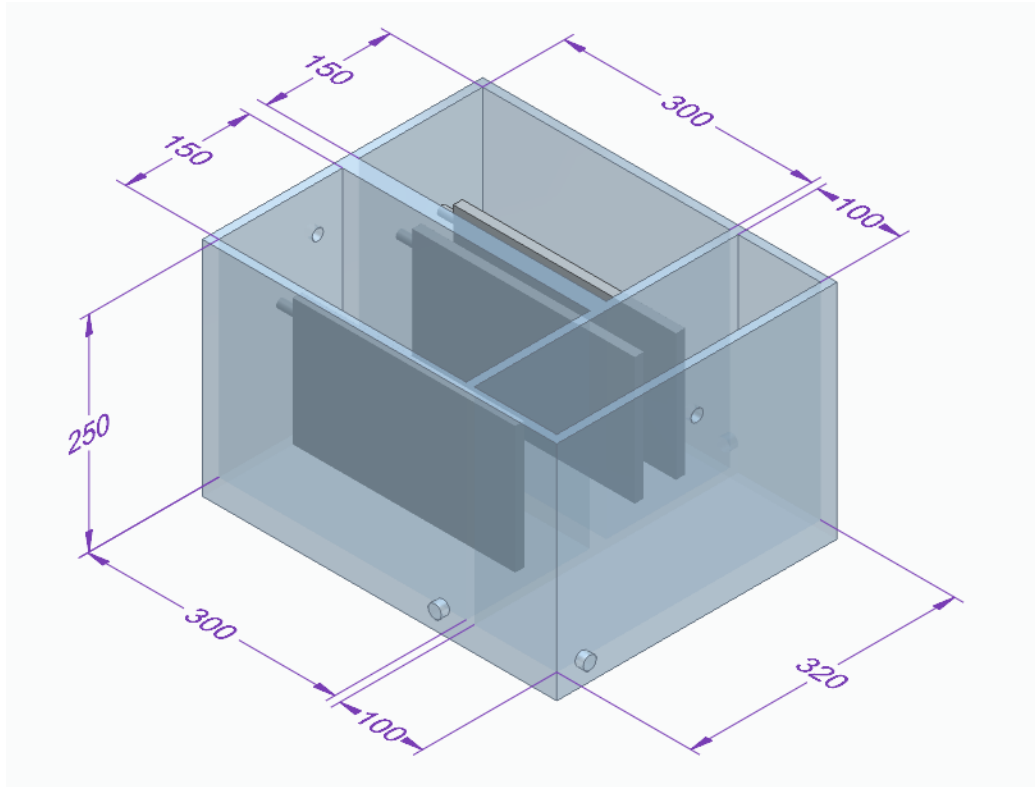


Figure 3 - Model of the improved filtration system, dimensions in millimeters (author's work).

In conclusion, this work provides a solid basis for the development of more efficient and sustainable water regeneration systems, aligned with the Sustainable Development Goals and with the transition towards a circular economy model. The experience obtained with this prototype opens the way for its application on a larger scale in industrial, urban, and environmental contexts, where access to quality water is increasingly critical.

## 6. References

- [1] Confederación Hidrográfica del Segura, «SITUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ESPAÑA: EFECTOS,» *Ministerio de Medio Ambiente*, <https://www.chsegura.es/es/cuenca/planificacion/plan-hidrologico-nacional/evaluacion-ambiental-estrategica/>.
- [2] IBEROSPEC Environmental Technologies, «Membranas cerámicas de ultrafiltración Cembrane para el tratamiento de agua potable y agua residual,» 10 Marzo 2022, <https://iberospec.com/noticias/membranas-ceramicas-de-ultrafiltracion-cembrane-para-el-tratamiento-de-agua-potable-y-agua-residual/>.
- [3] Cembrane, «Clean Water For Life,» <https://cembrane.com/>.

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>7</b>
1.1 Motivación del proyecto.....	7
1.2 Situación hídrica en España .....	9
1.3 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	12
1.4 Objetivos del proyecto.....	14
<b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....</b>	<b>16</b>
2.1 Descripción de la instalación.....	16
2.2 Descripción de la membrana de filtración.....	19
2.3 Aplicaciones actuales de la membrana.....	22
2.4 Situación de mercado de la empresa Cembrane .....	25
<b>Capítulo 3. Estado de la Cuestión .....</b>	<b>26</b>
3.1 Aplicaciones del agua regenerada .....	26
3.2 Filtración en sistemas de tratamiento de agua.....	28
3.3 Normativa del agua regenerada .....	29
<b>Capítulo 4. Metodología de Trabajo .....</b>	<b>32</b>
4.1 Introducción.....	32
4.2 Proceso de filtración en el laboratorio.....	33
4.2.1 Procedimiento de filtración.....	33
4.2.2 Procedencia de las muestras .....	37
4.2.3 Medidas de seguridad.....	40
4.2.4 Problemas detectados.....	42
4.3 Metodología de análisis del agua .....	43
<b>Capítulo 5. Análisis de Resultados.....</b>	<b>49</b>
5.1 Primer análisis con aguas de captación .....	50
5.2 Segundo análisis con aguas de captación .....	52
5.3 Primer análisis con agua Jar-Test.....	54
5.4 Segundo análisis con agua Jar-Test.....	57
5.5 Análisis final con agua de clarificado de fangos .....	62

<b>Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</b>	<b>66</b>
6.1 Conclusiones de los resultados obtenidos en el laboratorio .....	66
6.2 Diseño y propuesta de mejora de la instalación .....	70
<b>Capítulo 7. Bibliografía.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO I: Tablas de requerimientos del agua regenerada.....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO II: P1 - Aguas Captación [24].....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO III: Práctica 2 – Análisis de aguas residuales [24] .....</b>	<b>85</b>

## *Índice de ilustraciones*

Ilustración 1 - Distribución espacial de la escorrentía total anual (mm) [4] .....	10
Ilustración 2 - Situación de las masas de agua subterránea según los planes de tercer ciclo de las Confederaciones hidrográficas [5] .....	11
Ilustración 3 - Montaje completo de la instalación previo al ensayo de filtración (elaboración propia).....	16
Ilustración 4 - Bomba peristáltica compacta HF-LabS3 de Hygiaflex [9].....	18
Ilustración 5 - Representación de la capacidad efectiva de filtración en micras de una membrana Cembrane [11] .....	20
Ilustración 6 - Representación del principio de filtración desde el exterior hacia el interior, y viceversa, en una única membrana [11] .....	21
Ilustración 7 - Ensayo inicial, 11 de septiembre de 2024 (Elaboración propia).....	33
Ilustración 8 - Etapa preliminar de limpieza y comprobación de funcionamiento (Elaboración propia).....	34
Ilustración 9 - Instalación de filtrado en funcionamiento (Elaboración propia).....	35
Ilustración 10 - Material empleado en el ensayo final (Elaboración propia) .....	36
Ilustración 11 - Ensayos con aguas de captación, 11 de febrero y 26 de marzo de 2025 (Elaboración propia).....	38
Ilustración 12 - Ensayos con muestra Jar-Test, 7 de marzo y 10 de abril de 2025 (Elaboración propia).....	39
Ilustración 13 - Ensayo con muestra de clarificado de fangos de 2025 (8 litros) (Elaboración propia).....	40
Ilustración 14 - Medidas de seguridad. Bata, guantes y gafas (izquierda, [23]) y manómetro de control de presión (derecha, elaboración propia).....	41
Ilustración 15 - Calibración del pH-metro (izquierda) y del electrodo selectivo de conductividad (derecha) (Elaboración propia) .....	45

Ilustración 16 - Ejemplo de medición de pH, conductividad y oxígeno disuelto (Elaboración propia).....	45
Ilustración 17 - Ejemplo valoración con AgNO <sub>3</sub> (Elaboración propia).....	46
Ilustración 18 - Ejemplo de análisis espectrofotométrico, de amonio en este caso (Elaboración propia) .....	47
Ilustración 19 - Ejemplo de ensayo Jar - Test (Elaboración propia) .....	48
Ilustración 20 - Equipo completo para el ensayo de agua clarificada, 21 de mayo de 2025 (Elaboración propia). .....	48
Ilustración 21 - Ejemplo de análisis espectrofotométrico de amonio en una muestra (Elaboración propia) .....	53
Ilustración 22 - Imagen del ensayo del 7 de marzo de 2025, con apreciable reducción de la turbidez tras la filtración (Elaboración propia).....	55
Ilustración 23 - Imagen de los volúmenes de flóculos formados en el análisis del permeado, 7 de marzo de 2025, (Elaboración propia) .....	56
Ilustración 24 - Proceso de agitación durante el ensayo Jar-Test, 7 de marzo de 2025, (Elaboración propia) .....	56
Ilustración 25 - Imagen de los volúmenes de flóculos formados en el análisis del agua bruta y del permeado, 10 de abril de 2025, (Elaboración propia) .....	59
Ilustración 26 - Medida de pH de la muestra previa al filtrado, 10 de abril de 2025, (Elaboración propia) .....	60
Ilustración 27 - Medida de conductividad y oxígeno disuelto de la muestra posterior al filtrado, 10 de abril de 2025, (Elaboración propia) .....	61
Ilustración 28 - Proceso de filtrado muestra de clarificado, 21 de mayo de 2025, (Elaboración propia).....	63
Ilustración 29 - Imagen de los volúmenes de flóculos formados en el análisis del agua bruta y del permeado, 21 de mayo de 2025, (Elaboración propia).....	64
Ilustración 30 - Medida de conductividad, pH y oxígeno disuelto de la muestra posterior al filtrado, 21 de mayo de 2025, (Elaboración propia).....	65
Ilustración 31 - Imagen del ensayo final, comparando el permeado (izquierda) y la muestra sin filtrar (derecha), (Elaboración propia) .....	68

Ilustración 32 - Modelado de la instalación de filtración original, cotas en milímetros. (Elaboración propia) .....	71
Ilustración 33 - Modelado de la instalación de filtración mejorada, cotas en milímetros. (Elaboración propia) .....	72
Ilustración 34 - Modelado de la instalación en planta, cotas en milímetros. (Elaboración propia).....	73

## *Índice de tablas*

Tabla 1 - Resultados del primer análisis con aguas de captación, 11 de febrero de 2025... 51	51
Tabla 2 - Resultados del segundo análisis con aguas de captación, 26 de marzo de 2025 . 52	52
Tabla 3- Resultados del primer ensayo Jar-Test, 7 de marzo de 2025 .....	54
Tabla 4 - Resultados del segundo ensayo Jar-Test, 10 de abril de 2025 .....	57
Tabla 5 - Resultados del ensayo final, 21 de mayo de 2025 .....	62

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

### ***1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO***

El acceso a agua potable es actualmente un desafío en muchas regiones del planeta, lo que ha otorgado a la sostenibilidad y a la reutilización un papel fundamental en el futuro bienestar de las sociedades.

En el contexto global actual, diferentes factores como el crecimiento poblacional, la expansión industrial y el aumento de la explotación de recursos han derivado en un gasto hídrico descontrolado y, como resultado, en la necesidad de diseñar e implementar sistemas eficientes de depuración y regeneración de agua para garantizar su abastecimiento a medio y largo plazo.

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas, alrededor del 36% de la población mundial, lo que equivale a 2400 millones de personas, viven en regiones con escasez de agua y se estima que, para el año 2050, este porcentaje superará el 50% [1]. Por estos motivos, los sistemas de depuración y regeneración del agua se han convertido en un factor fundamental en el desarrollo de la economía actual, así como en una solución para garantizar el acceso eficiente y sostenible al agua, permitiendo su reutilización en diversas actividades económicas y reduciendo el impacto ambiental de las descargas contaminantes.

La regeneración de aguas residuales permite ampliar la disponibilidad de recursos hídricos mediante su reutilización en usos no potables como el riego agrícola, los procesos industriales o la recarga de acuíferos. Además de contribuir a la sostenibilidad ambiental y disminuir la presión sobre las fuentes hídricas naturales, la regeneración del agua también aporta beneficios económicos. Al incrementar la cantidad de agua disponible para diversos usos no domésticos, se reduce la dependencia de fuentes convencionales, cuyo coste de obtención sería cada vez más elevado en ausencia de este tipo de soluciones. Por lo tanto, la implementación y optimización de sistemas efectivos de depuración es, no solo una vía para

disminuir la contaminación hídrica y el consumo de un bien natural cada vez más escaso, sino un impulso tanto de la economía como de la industria, reduciendo costes y facilitando el acceso en épocas del año de mayor sequía y lugares que sean necesarios.

Por otro lado, ante esta necesidad y el marco actual de fomento del ecologismo por parte de gobiernos y empresas, están aumentando las inversiones en tecnologías de tratamiento y regeneración con el objetivo de reducir el impacto ambiental de los vertidos de aguas residuales y de optimizar el consumo de agua potable. Esto convierte a la investigación y la inversión en tecnologías pioneras en este ámbito en una gran oportunidad empresarial, alineada además con la necesidad existente de fomento de la sostenibilidad.

En definitiva, en un contexto global e industrializado, donde el agua se ha ido convirtiendo en un recurso cada vez más limitado y estratégico, la depuración y regeneración de aguas emergen como una solución imprescindible para garantizar la sostenibilidad y el abastecimiento futuro. La creciente presión sobre los recursos hídricos, impulsada por el crecimiento poblacional, la urbanización acelerada y las necesidades de la industria, exige la adopción de tecnologías innovadoras y políticas de gestión sostenible que ayuden a mitigar esta problemática.

Finalmente, otro aspecto clave de este proyecto es su carácter multidisciplinar en cuanto a ingeniería, ya que combina conocimientos de biotecnología, gestión ambiental y diseño de una pequeña instalación. La exploración de este tema no solo permitirá comprender a fondo los beneficios y aplicaciones de la regeneración de agua, sino también proponer soluciones innovadoras para su implementación y mejora en distintos sectores.

## **1.2 SITUACIÓN HÍDRICA EN ESPAÑA**

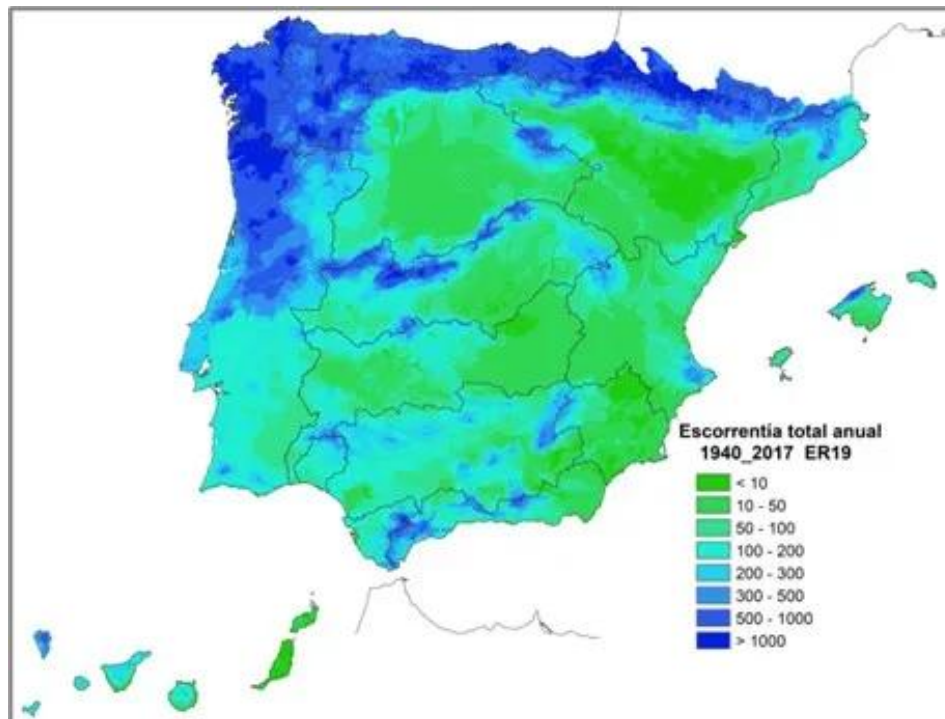
España presenta una situación hídrica especialmente compleja, caracterizada por una disponibilidad desigual del agua en el territorio, una alta variabilidad climática y una presión creciente sobre los recursos hídricos. Por estos motivos, el país se enfrenta graves problemas relacionados con la disponibilidad y la distribución de agua, especialmente en las regiones del sureste peninsular y en los archipiélagos. Las principales problemáticas son las siguientes:

En primer lugar, las sequías recurrentes y prolongadas que se producen en España, fenómeno que se ha visto agravado en los últimos años debido al cambio climático. Esto impacta de forma directa en la disponibilidad de agua para el abastecimiento urbano, la agricultura de regadío y la industria.

En el caso de la agricultura de regadío, que representa el mayor consumo de agua en España, las restricciones impuestas durante los periodos de escasez afectan tanto a la productividad como a la viabilidad económica de numerosas explotaciones, en particular en zonas áridas como el sureste peninsular. Por otro lado, otro sector muy afectado en periodos de escasez es el industrial, especialmente en aquellas actividades que requieren grandes volúmenes de agua para procesos productivos, de refrigeración o de limpieza. En muchos casos, la disminución de la disponibilidad del recurso obliga a recurrir a fuentes alternativas, como la reutilización de aguas residuales o la captación de agua regenerada, con el fin de mantener la actividad sin comprometer el medio ambiente ni el suministro a otros usos prioritarios. [2]

Por otro lado, la distribución geográfica de las precipitaciones es considerablemente desigual, ya que, mientras el norte y el noroeste peninsular disfrutan de abundancia hídrica, el sureste y el sur del país presentan un clima semiárido, con lluvias escasas y concentradas en cortos periodos del año. Como se aprecia en la Ilustración 1, que muestra la media de la escorrentía total anual de los 77 años previos a 2017, zonas como Galicia, la cornisa cantábrica y los Pirineos cuentan con una escorrentía total anual que supera los 1.000 mm anuales, mientras que numerosas áreas de Murcia, Alicante, Castilla la Mancha, Almería y

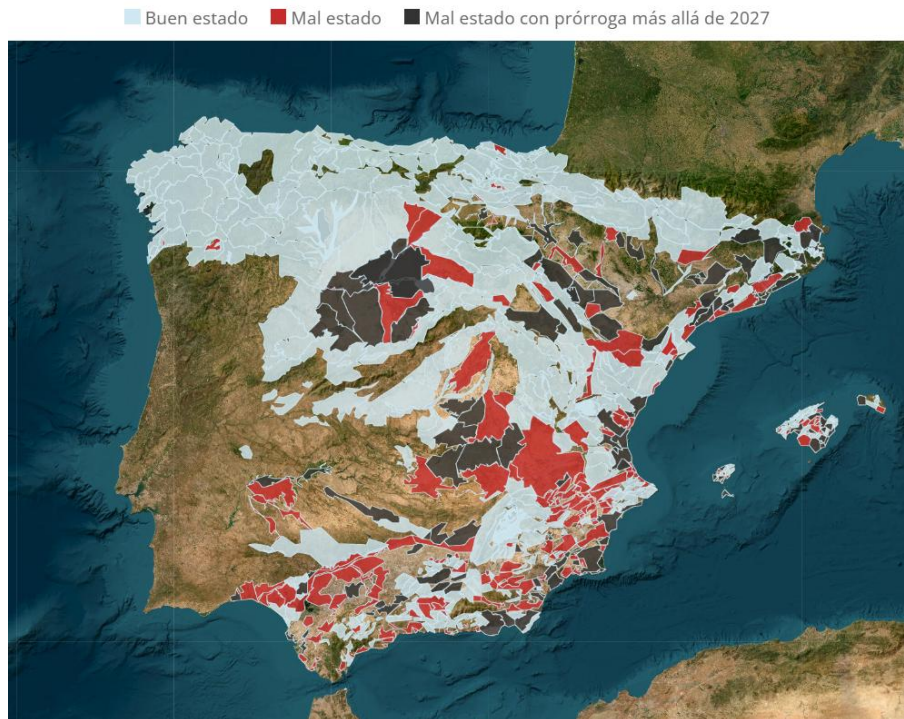
Aragón no alcanzan los 50 mm, y en algunos casos ni siquiera los 10 mm anuales (la escorrentía anual medida en milímetros equivale a los litros por metro cuadrado que fluyen a lo largo de un año) [3].



*Ilustración 1- Distribución espacial de la escorrentía total anual (mm) [4]*

Adicionalmente, en las últimas décadas la presión sobre las masas de agua subterránea en España ha aumentado de forma alarmante. Según la investigación “SOS Acuíferos”, realizada por DATADISTA junto a Greenpeace España y basada en los documentos de los planes de tercer ciclo (2022-2027) de las confederaciones hidrográficas “El 44% de las masas de agua bajo el suelo se encuentran en mal estado, ya sea químico, cuantitativo o ambos” [5], lo que significa que se extrae de estos acuíferos más agua de la que pueden recargar de forma natural y que presentan intrusión salina en zonas costeras y contaminación química producida por altas concentraciones de nitratos, pesticidas u otros contaminantes, relacionada directamente con la actividad agrícola intensiva. Como muestra la Ilustración 2,

estas consecuencias se acentúan en regiones interiores de la Península y en la costa suroeste del país.



*Ilustración 2 - Situación de las masas de agua subterránea según los planes de tercer ciclo de las Confederaciones hidrográficas [5]*

Además, la falta de infraestructuras de depuración eficientes en muchas zonas rurales y urbanas contribuye al vertido de aguas residuales mal tratadas, lo que agrava el deterioro de la calidad del agua, tanto subterránea como superficial.

Los impactos derivados todas estas cuestiones no solo comprometen la sostenibilidad de los recursos hídricos, sino que también ponen en riesgo el suministro a la población, la viabilidad del regadío y la conservación de ecosistemas dependientes del agua subterránea, como humedales, riberas y manantiales [6]. En este contexto, la regeneración de agua emerge como una solución estratégica, no solo para recuperar el equilibrio y la calidad de las aguas, sino también para garantizar la disponibilidad de agua de calidad en un escenario de creciente presión climática y demográfica.

### ***1.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE***

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecidos por la Organización de las Naciones Unidas son un conjunto 17 metas globales establecidas en 2015 que representan los principales retos sociales, económicos y ambientales del siglo XXI. Su finalidad es erradicar la pobreza, reducir las desigualdades, proteger el medio ambiente y garantizar el bienestar de las generaciones presentes y futuras. Este proyecto, centrado en el análisis de una instalación de filtración de agua, se alinea de forma directa con varios de estos objetivos, en especial aquellos vinculados con la gestión del recurso hídrico, la innovación tecnológica y la sostenibilidad ambiental [7].

El primero y el más estrechamente relacionado con este proyecto, el ODS 6, “Agua limpia y saneamiento”, el cual busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos los ciudadanos. Este objetivo aborda desafíos como el acceso universal y equitativo al agua potable asequible, la mejora de la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, y la provisión de servicios de saneamiento e higiene adecuados. Además, promueve la gestión sostenible de los recursos hídricos, la protección y restauración de ecosistemas relacionados con el agua, y la cooperación internacional para ayudar a los países en desarrollo a promover e implantar actividades y programas relacionados con la sostenibilidad del agua y el saneamiento.

El ODS 7, “Energía asequible y no contaminante”, persigue el desarrollo universal de fuentes de energía modernas, sostenibles y eficientes. La filtración y el tratamiento del agua están estrechamente ligados al consumo energético, por lo que la adopción de tecnologías que lo minimicen contribuye directamente a reducir la huella ambiental del proceso. Por lo tanto, este proyecto tiene relación con la reducción de vertidos contaminantes procedentes de la producción energética, disminuyendo así la contaminación.

El ODS 9, “Industria, innovación e infraestructura”, se centra en construir infraestructuras eficientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación tecnológica. El proyecto se centra especialmente en el desarrollo sostenible de la industria y de nuevas tecnologías de filtración de agua, explorando principios de eficiencia energética, gestión ambiental e ingeniería de procesos.

El ODS 10, “Reducción de las desigualdades”, con un carácter social, buscando el desarrollo hídrico en todo el planeta mediante tecnología eficiente. El proyecto explora nuevas soluciones accesibles y adaptables que permitan acercar el agua limpia a comunidades que actualmente enfrentan restricciones hídricas severas, especialmente en regiones rurales o semiáridas, lugares en los que es un bien muy escaso o de difícil obtención.

El ODS 11, “Ciudades y comunidades sostenibles”, establece la necesidad de optimizar el uso del agua en entornos urbanos, donde la presión sobre los sistemas de saneamiento y abastecimiento es elevada. La implementación de tecnologías de depuración y regeneración se presenta como solución clave en la mejora de la eficiencia hídrica en ciudades que tienen mucha demanda debido a consumo humano, limpieza e industrias.

El ODS 12, “Producción y consumo responsables”, centrado en garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, transformando los procesos actuales de producción y consumo para lograr una gestión eficiente de los recursos naturales, reducir la generación de desechos y minimizar los impactos ambientales. Este proyecto encaja perfectamente en este objetivo, al transformar las aguas residuales en un recurso aprovechable, cerrando el ciclo del agua y fomentando un modelo de economía circular.

Los ODS 13 y 15, “Acción por el clima” y “Vida de ecosistemas terrestres”, también alineados con este trabajo, ya que la regeneración del agua disminuye la extracción de fuentes naturales y contribuye a la preservación de humedales, ríos y acuíferos, todos ellos amenazados por el cambio climático. Además, al reducir la necesidad de nuevas infraestructuras de captación, se minimiza el impacto ambiental sobre el territorio.

El ODS 14, “Vida submarina”, que se centra en prevenir y evitar los vertidos y la contaminación en ríos y mares. La filtración de agua residual, añadida a un correcto tratamiento, es una solución idónea para su posterior reutilización o correcto retorno al medio, minimizando así el impacto ambiental.

## **1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

Este proyecto tiene como finalidad el análisis técnico y funcional de la instalación de filtración de agua descrita, con el propósito de evaluar su eficacia, identificar oportunidades de mejora y valorar su viabilidad de aplicación en contextos reales. La metodología se basa en la comparación entre las condiciones iniciales del agua y los resultados obtenidos tras su paso por el sistema de filtrado, lo que permitirá verificar el grado de cumplimiento de los requisitos de calidad. Además, se plantean posibles optimizaciones tanto del proceso como de la propia instalación, así como un análisis preliminar de su potencial de implementación en el mercado.

Para el proyecto, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Estudio de requerimientos de salubridad del agua  
Análisis de los criterios de calidad del agua exigidos por la normativa española para diferentes usos, especialmente en lo relativo a la potabilidad, salubridad y seguridad sanitaria. Esto permitirá establecer un marco de referencia para evaluar la eficacia del sistema de filtrado, identificando los parámetros que deben ser controlados, como turbidez, conductividad, pH, sólidos en suspensión, entre otros.
2. Análisis del prototipo a utilizar  
Describir detalladamente el diseño de la instalación, incluyendo sus componentes principales, principio de funcionamiento, materiales empleados, caudal de trabajo, tipo de filtro y condiciones de operación. Este análisis permitirá comprender el fundamento del proceso de filtración y evaluando así su eficiencia y su adaptabilidad a distintos contextos de uso.

3. Medidas anteriores y posteriores al estudio, analizando los resultados

Realizar ensayos experimentales con las muestras, comparando los valores de los parámetros del agua previos y posteriores al paso por el filtro. Esta fase permitirá determinar la eficacia real del sistema en la eliminación de contaminantes, así como su capacidad de cumplir con los estándares normativos, analizando posteriormente los resultados obtenidos.

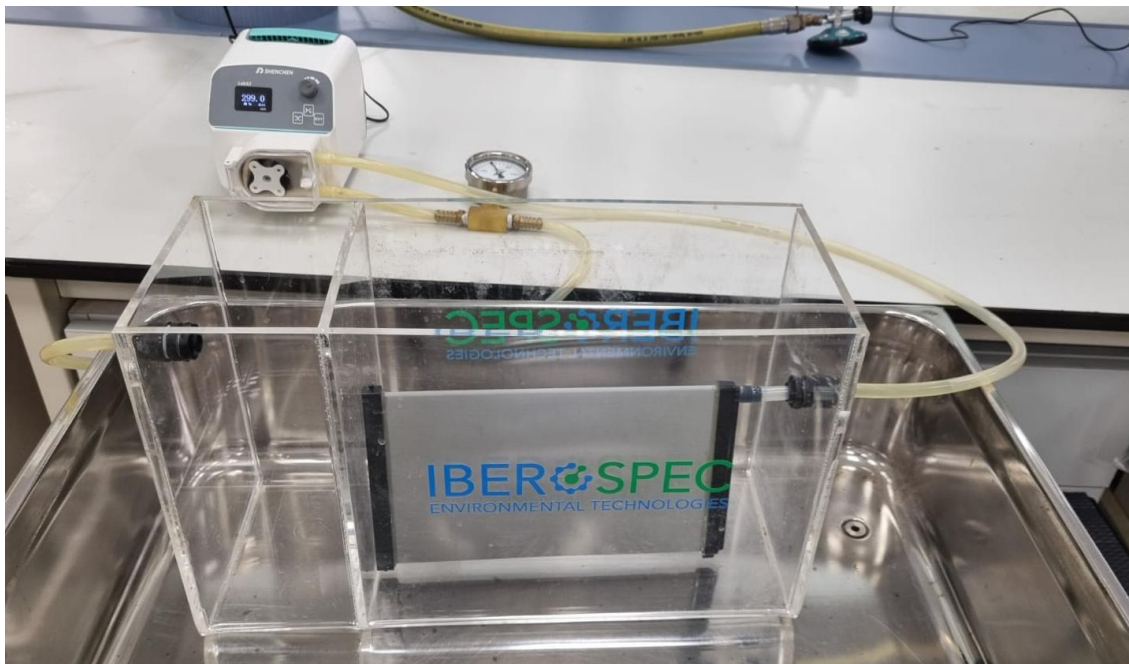
4. Búsqueda de mejoras y optimizaciones en el proceso

En función de los resultados obtenidos a lo largo de los ensayos, se identificarán limitaciones o deficiencias en la instalación y se propondrán mejoras con el objetivo de optimizar su rendimiento, eficiencia o facilidad de uso. Posteriormente, se propondrá un diseño final de la instalación, que cuente con dichas mejoras y que permita realizar ensayos con mayor eficiencia y a mayor escala.

## Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

La instalación en la que se basa este proyecto (Ilustración 3) es fruto de una donación realizada por la empresa “IBEROSPEC Environmental Technologies” a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, con el objetivo de impulsar la investigación ambiental, fomentar el aprendizaje aplicado en el ámbito del tratamiento de aguas y proporcionar a los estudiantes una herramienta práctica para la realización de ensayos experimentales.



*Ilustración 3 - Montaje completo de la instalación previo al ensayo de filtración (elaboración propia).*

El sistema está constituido por un banco de pruebas compacto, cuyo componente principal es un soporte de metacrilato transparente dividido en dos compartimentos.

- La cavidad principal, que aloja la membrana cerámica plana de ultrafiltración de carburo de silicio (SiC), dispuesta en posición vertical y sumergida completamente

en estado de funcionamiento. Sus dimensiones son 300 mm de largo, 250 mm de alto y 150 mm de ancho, lo que significa un volumen máximo de 11,25 litros:

$$0,3 * 0,25 * 0,15 = 0,01125 m^3 = 11,25 l$$

Tomado que la altura de la membrana es 154 mm, el volumen de agua a tratar necesario para cubrirla completamente es:

$$0,3 * 0,154 * 0,15 = 0,00693 m^3 = 6,93 l$$

Lo ideal, para obtener al menos 2 litros de agua filtrada (permeado) sería trabajar con al menos 7 u 8 litros de líquido bruto.

- La segunda cavidad, de menor volumen, en la que se vierte el permeado, de dimensiones 100 mm de largo, 250 mm de alto y 150 mm de ancho, pudiendo entonces alojar un volumen de 3,75 litros de fluido clarificado:

$$0,1 * 0,25 * 0,15 = 0,00375 m^3 = 3,75 l$$

Para inducir el flujo a través de la membrana, el sistema cuenta con una bomba peristáltica, ubicada externamente. Esta bomba genera una diferencia de presión entre ambas cavidades, lo que permite el paso del fluido desde el lado de alimentación hacia el interior de la membrana [8]. El modelo de la bomba peristáltica es HF-LabS3 de Hygiaflex. Esta es ideal para la instalación, ya que tiene un tamaño y consumo reducidos, añadido a un volumen de ruido considerablemente bajo. Cuenta con una carcasa de plástico ABS, especialmente diseñada para ser resistente a la corrosión y antiestática, que además permite una visualización clara del cabezal y del tubo durante el funcionamiento. También cuenta con una pantalla OLED que muestra la velocidad del motor, que puede ser controlada manualmente mediante un regulador [9]. En la Ilustración 4 se muestra la imagen de comercialización de la bomba peristáltica, cuyas características técnicas son:

- “Caudal mínimo: 0,0024 ml/min
- Caudal máximo: 930 ml/min
- Velocidad: hasta 350 rpm
- Resol. de velocidad: 0,1 rpm

- Presión: hasta 1 bar
- Cabezales: HF-UD15 o minipump” [9]



*Ilustración 4 - Bomba peristáltica compacta HF-LabS3 de Hygiaflex [9]*

El conexionado hidráulico entre la bomba y el sistema de metacrilato se realiza mediante tuberías flexibles de polímero, en las cuales se ha incorporado un manómetro analógico para el control de la presión, ubicado en el tramo de conexión entre la bomba y la cámara de salida del permeado.

Finalmente, todo el equipo ha sido montado en un recipiente de aluminio que, a su vez, ha sido colocado en un carro elevador. Esto facilita en gran medida el trabajo durante los ensayos, permitiendo transportar la instalación por el laboratorio, subirlo o bajarlo cuando es necesario, limpiarlo y almacenarlo correctamente tras su uso.

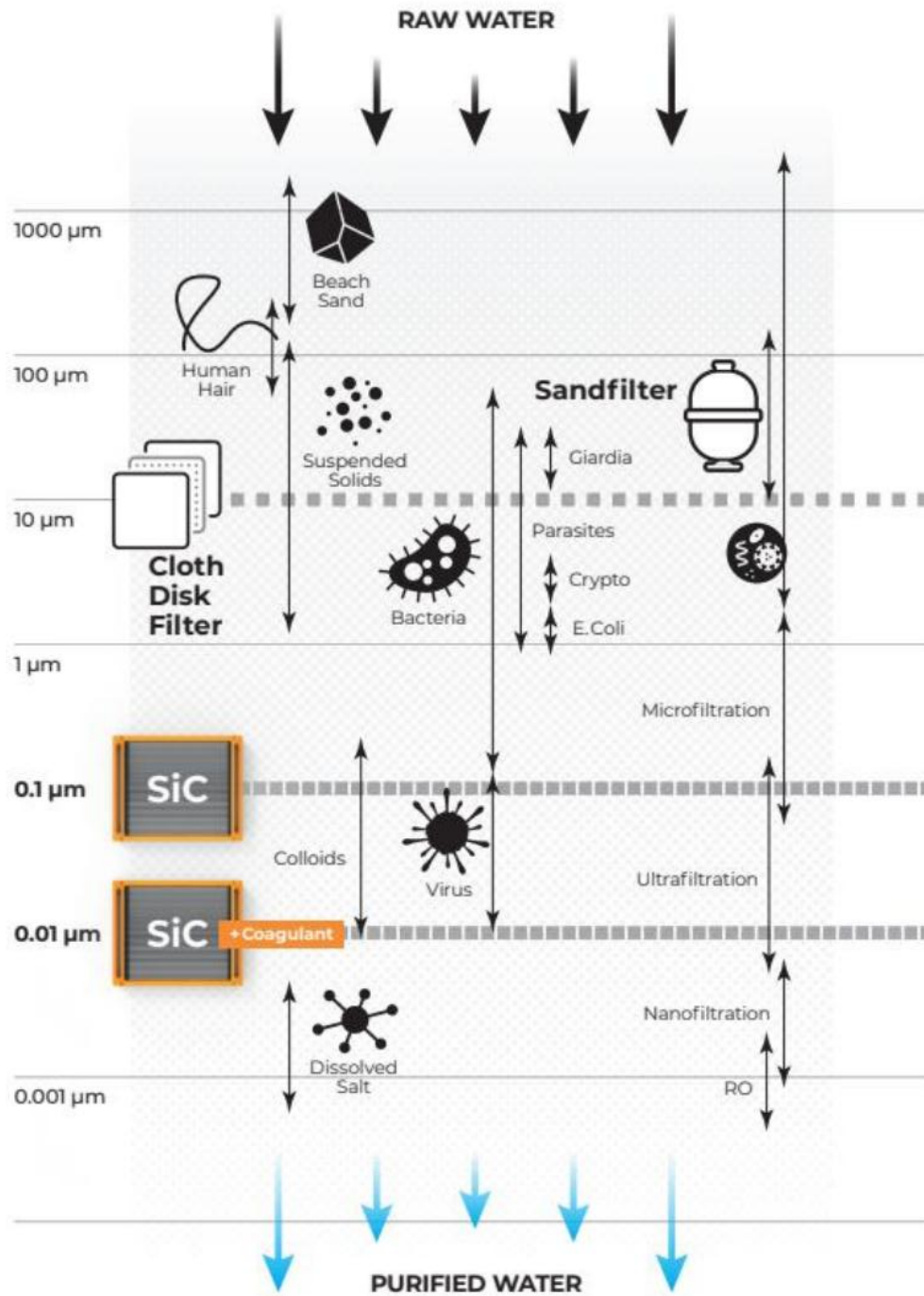
En definitiva, la configuración de la instalación permite simular condiciones reales de operación de la membrana y es ideal tanto para la evaluación de su rendimiento, así como para el análisis del permeado, y estudio del funcionamiento de la membrana y otros fenómenos característicos de los procesos de filtración por membranas.

## **2.2 DESCRIPCIÓN DE LA MEMBRANA DE FILTRACIÓN**

El elemento principal de la instalación es la membrana cerámica de ultrafiltración construida por la compañía “Cembrane”. Esta empresa comercializa las membranas en módulos que contienen 42 de ellas, pudiendo hacer torres de hasta 15 módulos. Es decir, cada torre llegaría a tener un máximo de 630 membranas. Cabe destacar que la instalación a estudiar cuenta con una única membrana, por lo que los resultados obtenidos en los ensayos se pueden considerar a mucha menor escala que el producto final real.

La membrana está fabricada con carburo de silicio (SiC) como material principal de filtración, y con una permeabilidad superior a “3.000 LMH/bar @ 20° C”, es decir, que, a 20° C y en una hora, un metro cuadrado de membrana es capaz de filtrar más de 3.000 litros de agua por bar de presión, según la ficha técnica de la propia Cembrane [10]. Su peso es de 0,9 kg y sus dimensiones son 575 mm de longitud, 154 mm de altura (con 145 mm de longitud real de filtración) y 11 mm de espesor, de los que 6 mm corresponden al material filtrante y el resto al encapsulado [10]. Sin embargo, la membrana utilizada en la instalación es una adaptación para el equipo individual, siendo el largo la mitad aproximadamente de la membrana que se comercializa en el interior de los módulos, midiendo 270 mm de largo.

Como se representa en la Ilustración 5, la membrana es capaz de filtrar elementos de tamaño igual o mayor a 0,1  $\mu\text{m}$ , como pequeñas partículas sólidas, arena, cabello, hongos, polvo, glóbulos rojos y bacterias. Por otro lado, no es capaz de filtrar endotoxinas, sales acuosas, azúcares o iones metálicos disueltos:



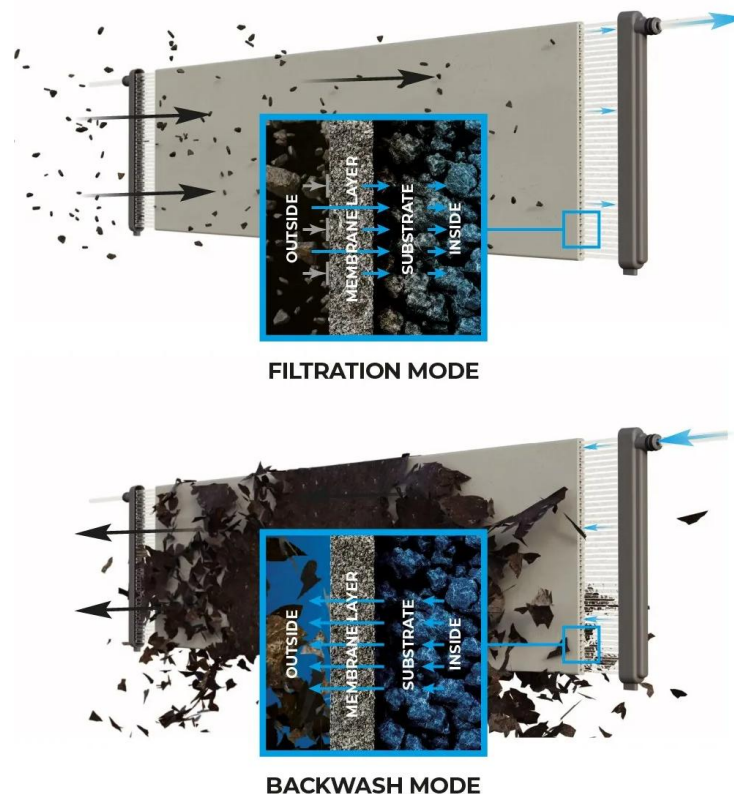
*Ilustración 5 - Representación de la capacidad efectiva de filtración en micras de una membrana Cembrane*

[11]

La membrana tiene dos modos de funcionamiento, el de filtración y el de contra lavado, como muestra la Ilustración 6:

En la imagen superior se representa el modo de filtración, en el que el agua contaminada pasa por diferencia de presión generada por una bomba, desde el exterior de la membrana hacia su interior, atravesando la capa filtrante. Durante este proceso, las partículas sólidas y los contaminantes quedan retenidos en la superficie externa de la membrana, permitiendo únicamente el paso del agua limpia.

En la representación inferior se muestra el modo de contra lavado, en el que se invierte el flujo, haciéndolo circular desde el interior hacia el exterior, desprendiendo y eliminando los sólidos acumulados sobre la superficie externa de la membrana, restaurando así su capacidad de filtración y prolongando su vida útil [10].



*Ilustración 6 - Representación del principio de filtración desde el exterior hacia el interior, y viceversa, en una única membrana [11]*

## **2.3 APLICACIONES ACTUALES DE LA MEMBRANA**

### **Optimización de sistemas de tratamiento con filtros de arena**

El producto comercializado por Cembrane representa una solución innovadora para modernizar instalaciones convencionales de tratamiento de agua que utilizan filtros de arena como etapa principal de depuración. Este enfoque permite sustituir o complementar el sistema tradicional por módulos de membranas cerámicas de carburo de silicio (SiC) sin necesidad de realizar modificaciones estructurales significativas.

La propuesta consiste en instalar las membranas SiC directamente dentro de los tanques existentes donde operaban los filtros de arena, aprovechando la misma infraestructura hidráulica y espacio físico. Las membranas funcionan sumergidas, y el proceso de filtración se realiza de forma directa desde el agua bruta hasta la obtención de agua filtrada de alta calidad, eliminando etapas intermedias como la sedimentación o el uso de cartuchos de microfiltración.

Esta optimización ofrece numerosas ventajas. En primer lugar, aporta mayor eficiencia de en el proceso de filtración gracias a su porosidad de  $0,1\ \mu\text{m}$ , reteniendo sólidos en suspensión, microorganismos y partículas coloidales con mayor eficacia que los filtros tradicionales de arena. Esto no solo disminuye el número de etapas del proceso, sino que también mejora la calidad del agua tratada, consiguiendo una turbidez inferior a  $0,1\ \text{NTU}$  y eliminación casi por completo las bacterias, lo que resulta especialmente ventajoso en aplicaciones de agua potable. Además, permite reducir el uso de productos químicos, disminuyendo considerablemente la dosificación de coagulantes y floculantes, lo que se traduce en menor producción de lodos y menores costes operativos.

Por otro lado, permite una instalación sencilla de los módulos cerámicos, que se integran fácilmente en los tanques existentes, operando incluso por gravedad sin la necesidad de añadir bombas. Finalmente, este sistema presenta una mayor vida útil menores costes de mantenimiento y limpieza, ya que el carburo de silicio tiene alta resistencia química, térmica y mecánica, con una vida útil estimada superior a los 10 años [12].

### **Recuperación del agua de contra lavado de filtros de arena:**

Aunque, en los tratamientos con filtro de arena, Cembrane principalmente se añade como sustitución de fases del proceso, su aplicación también permite recuperar y reutilizar el agua empleada para el contra lavado de filtros de arena sin necesidad de tratamiento previo, maximizando así la eficiencia, ya que más del 10 % del agua tratada, que contiene sólidos en suspensión, bacterias, parásitos y metales pesados, con turbidez que en ocasiones supera los 1,000 NTU, se consume en esta operación. En sustitución, la tecnología de Cembrane recupera hasta un 95 % del agua, alcanzando calidades adecuadas para su reutilización [12].

### **Tratamiento de agua potable:**

Otro ámbito de aplicación es el proceso de tratamiento de agua potable. Las membranas cerámicas de Cembrane, gracias a su elevada permeabilidad y diseño compacto, son aplicables tanto en aguas superficiales como subterráneas (dulces o salobres), para el pretratamiento de un posterior proceso de ósmosis inversa, como, en algunos casos, para producción directa de agua apta para consumo humano. En consecuencia, el desarrollo y la implementación de plantas que integren módulos de filtración Cembrane puede representar un avance significativo, especialmente en regiones donde el acceso al agua potable es limitado, particularmente durante los meses de verano, permitiendo recuperar aguas procedentes de otras aplicaciones y tratarlas hasta alcanzar los parámetros exigidos para su consumo como agua potable [12].

### **Tratamiento de agua residual municipal e industrial:**

Las membranas de Cembrane también ofrecen una solución eficaz y duradera para el tratamiento de aguas residuales tanto industriales como municipales. Gracias a su elevada resistencia química, térmica y mecánica, son capaces de operar en condiciones exigentes, soportando fluidos con altas concentraciones de sólidos, grasas, aceites, productos químicos agresivos o cargas orgánicas elevadas. Estas membranas permiten tratar efluentes de sectores como el alimentario, farmacéutico, minero, petroquímico, papelería y electrónico, así como aguas residuales urbanas, incluyendo agua clarificada o efluentes tratados para su

reutilización. Su estructura plana y diseño modular favorecen una operación compacta y de bajo mantenimiento, reduciendo significativamente el consumo de productos químicos y energía, al tiempo que mejoran la eficiencia y la recuperación de agua [12].

### **Optimización de biorreactores de membrana:**

Los biorreactores de membrana combinan procesos biológicos convencionales de lodos activados con una etapa de separación por membrana, permitiendo una depuración más eficiente del agua residual y una elevada calidad del efluente tratado. En este tipo de sistemas, las membranas actúan como una barrera física que retiene los sólidos en suspensión y la biomasa, eliminando la necesidad de decantadores secundarios. En este marco, los módulos de Cembrane ofrecen ventajas significativas frente a las membranas poliméricas convencionales gracias a su resistencia química, térmica y mecánica, siendo capaces de operar de forma estable en condiciones exigentes, al igual que en tratamiento de aguas residuales industriales o municipales con alta carga orgánica o presencia de compuestos agresivos. Uno de los beneficios más destacados de su uso en sistemas de biorreactores de membrana es su capacidad para soportar mayores concentraciones de sólidos totales suspendidos sin comprometer el flujo de permeado, permitiendo aumentar la carga biológica del sistema, reducir el volumen del reactor y optimizar la eficiencia del tratamiento. Adicionalmente, las membranas pueden integrarse de forma sumergida en reactores existentes o en nuevas instalaciones, gracias a su diseño modular y su compatibilidad con estructuras prefabricadas o de hormigón, lo que facilita en gran medida su instalación en la mejora o renovación de plantas ya existentes [12].

En definitiva, esta tecnología ha sido aplicada con éxito en diversos sectores, desde tratamiento de aguas residuales hasta distintos sistemas de regeneración, ofreciendo una solución eficiente, compacta y sostenible para la reutilización del agua.

## ***2.4 SITUACIÓN DE MERCADO DE LA EMPRESA CEMBRANE***

Cembrane, una compañía privada, fundada en 2014 y adquirida por Ovivo en noviembre de 2021. Está presente en más de 50 países, trabajando con fabricantes de equipos originales e integradores de sistemas, alcanzando aplicaciones tanto en el sector municipal como industrial, incluyendo la potabilización y la reutilización de aguas residuales [13].

En 2023, Cembrane inauguró una nueva fábrica en Texas, Estados Unidos, que, sumada a su sede en Lynge, Dinamarca, fortaleció su capacidad productiva y logística para atender una creciente demanda global [14]. El mercado de membranas, según datos de Fortune Business Insights, alcanzó un valor de aproximadamente 8.270 millones de dólares en 2024 y podría crecer a 14.210 millones de dólares hacia 2032 [15], lo que significa un crecimiento superior al 70% en 8 años, lo que refleja la importancia de este sector para el futuro y la sostenibilidad de nuestro planeta, así como la oportunidad de mercado en la que se ha convertido.

En conclusión, Cembrane se posiciona como una empresa especializada y adaptable en el mercado en auge de ultrafiltración. Su enfoque en membranas cerámicas de alta resistencia le permite atender aplicaciones difíciles y de alto valor añadido, en un contexto global que exige cada vez más eficiencia y productividad en el tratamiento de aguas en condiciones desafiantes.

## **Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

### **3.1 APLICACIONES DEL AGUA REGENERADA**

El agua regenerada, desde su llegada a la planta de tratamiento hasta su nuevo uso, se somete a una serie de procesos avanzados de depuración y controles de calidad que garantizan el cumplimiento de los requisitos sanitarios y ambientales establecidos para cada aplicación específica. Este tipo de recurso hídrico, que se obtiene a partir de aguas residuales urbanas o industriales previamente depuradas, constituye una herramienta clave para paliar la escasez de agua en regiones con déficit hídrico, como ocurre en gran parte de España, donde la presión sobre acuíferos y cuencas hidrográficas es especialmente elevada.

Las principales aplicaciones del agua regenerada son las siguientes [16]:

- Usos urbanos. En grandes ciudades, la reutilización de agua es muy importante para actividades como riego de parques y jardines, limpieza y baldeado de calles, fuentes o sistemas contra incendios. Su importancia se debe a la escasez en muchas ocasiones de agua potable dedicada al uso humano, por lo que es conveniente y muy beneficioso un suministro de agua regenerada para actividades que no requieren de agua completamente apta para el consumo, cubriendo estas necesidades y reduciendo la demanda sobre otras fuentes de suministro, en muchas ocasiones sobreexplotadas.
- Usos industriales, sector que requiere grandes volúmenes de agua durante diferentes procesos, como en cadenas de producción, en sistemas de refrigeración y seguridad o en circuitos cerrados de enfriamiento en procesos a altas temperaturas. El agua regenerada se utiliza, por ejemplo, en torres de refrigeración de plantas energéticas, refinerías o fábricas de gran consumo, donde su aplicación reduce el uso de agua dulce y contribuye a la sostenibilidad de la actividad económica.

- Usos ambientales. La regeneración de agua se destina también a la conservación y recuperación de ecosistemas acuáticos, mediante la recarga de acuíferos, la aportación a cauces fluviales o el mantenimiento de humedales. Estas prácticas permiten garantizar caudales ecológicos, mejorar la biodiversidad y frenar la degradación de hábitats que dependen del agua.
- Usos agrícolas. El regadío es el principal consumidor de agua en España, representando cerca del 80% de las extracciones totales [17]. En este contexto, el agua regenerada es un recurso estratégico, ya que puede emplearse en el riego de cultivos, viveros y campos de golf, siempre bajo estrictos controles sanitarios y normativos, como los fijados por el Real Decreto 1085/2024. Su utilización contribuye a mejorar la eficiencia hídrica del sector agrario y a reducir la presión sobre las fuentes convencionales, especialmente en zonas de clima semiárido como el sureste peninsular.

En este escenario, la regeneración de agua ha ganado protagonismo en los últimos años, adquiriendo un papel fundamental dentro de la economía circular en países con climas áridos y estrés hídrico como España, que han implementado sistemas de regeneración a gran escala, permitiendo reducir la dependencia de fuentes convencionales diversificando el origen del suministro, fomentando un modelo más sostenible en la gestión de los recursos [6].

### ***3.2 FILTRACIÓN EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA***

La filtración constituye una de las etapas esenciales tanto en los procesos de potabilización como en los de depuración de aguas residuales, ya que permite separar y atrapar partículas sólidas y microorganismos presentes en el agua. En una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), la filtración desempeña un papel fundamental dentro de los tratamientos terciarios y avanzados, constituyendo una barrera eficaz frente a contaminantes fisicoquímicos y biológicos que no se eliminan en las etapas convencionales de depuración (pretratamiento, decantación primaria y tratamiento biológico secundario). Tras estas fases, el agua depurada suele presentar todavía restos de sólidos en suspensión, nutrientes y microorganismos patógenos que deben ser eliminados para garantizar su vertido seguro o su reutilización como agua regenerada [18]. En este punto se aplican distintas tecnologías, como la filtración granular, realizada mediante lechos de arena, que retiene partículas finas y reduce la turbidez; la filtración de carbón activo, eficaz en la eliminación de materia orgánica disuelta, pesticidas o compuestos responsables de olores y sabores; y, cada vez con mayor presencia, los sistemas de membranas y ósmosis inversa. Estas últimas ofrecen un nivel de depuración superior al actuar como barreras físicas frente a bacterias, virus y sólidos coloidales, permitiendo alcanzar parámetros de calidad muy exigentes, indispensables en aplicaciones de reutilización agrícola, urbana o industrial [19].

Una de las tecnologías más relevantes en EDAR es el biorreactor de membrana que combina un reactor biológico de fangos activos con un sistema de ultrafiltración o microfiltración sumergido. Este acoplamiento no solo mejora la calidad del efluente, sino que permite compactar las instalaciones al eliminar la necesidad de decantadores secundarios, aumentando la eficiencia y reduciendo la huella espacial de la planta.

Por otro lado, en una Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP), la filtración constituye una de las fases centrales del proceso, siendo su función principal la retención de partículas sólidas, coloides, microorganismos y materia orgánica residual que no se eliminan

en las etapas de coagulación, floculación y decantación (CFD). Del mismo modo que en la EDAR, existen diferentes tecnologías de filtración. En primer lugar, la filtración de arena, que es la más común en las ETAP [19], en la que el agua atraviesa lechos granulares donde quedan atrapados los sólidos en suspensión y parte de la materia orgánica. Por otro lado, otra tecnología es filtración con carbón activo, que se utiliza para la eliminación de compuestos orgánicos disueltos, pesticidas, metales y sustancias responsables de olores y sabores. Finalmente, la microfiltración y ultrafiltración mediante membranas son las tecnologías más recientes, que actúan como una barrera física frente a bacterias y sólidos en suspensión, ofreciendo una calidad de agua superior y más constante que los filtros tradicionales. Son especialmente útiles cuando la fuente de agua presenta elevada turbidez o contaminación microbiológica.

En definitiva, la filtración tanto en una ETAP como una EDAR es una etapa esencial de tratamiento avanzado del agua, mejorando la claridad y calidad del agua, y constituyendo uno de los pasos finales para garantizar el cumplimiento normativo y permitir la reutilización de este recurso de forma sostenible, contribuyendo a la economía circular y a la adaptación de nuestra sociedad frente el cambio climático.

### **3.3 *NORMATIVA DEL AGUA REGENERADA***

A la hora de analizar los requerimientos a cumplir por el agua regenerada, el proyecto se basó en el Real Decreto 1085/2024, publicado el 23 de octubre de 2024, que aprueba el nuevo Reglamento de reutilización del agua, derogando íntegramente el anterior Real Decreto 1620/2007 e incorporando un marco normativo actualizado y alineado con las normativas de la Unión Europea, que integra una mayor gestión del riesgo y establece medidas de carácter preventivo adaptadas a diferentes tipos de uso [21]. Este reglamento se aplica tanto a aguas regeneradas procedentes tanto de depuradoras urbanas como industriales, y reconoce hasta 28 aplicaciones distintas, agrupadas en cuatro grandes

categorías, que son uso urbano, uso agrícola, uso industrial y otros (que incluyen ganadería, acuicultura, recreativos y forestales).

Por otro lado, uno de los factores clave de este nuevo reglamento es la obligatoriedad de un Plan de Gestión del Riesgo del Agua Regenerada, que debe elaborarse por las partes responsables del sistema de tratamiento, como las plantas depuradoras o regeneradoras y los operadores de distribución y suministro. Esta planificación debe identificar los riesgos en las fases de producción, suministro y uso, y definir medidas preventivas para proteger la salud humana, el medio ambiente y la sanidad animal [21].

Asimismo, se refuerzan de manera significativa los requisitos de calidad del agua regenerada, estableciendo un marco normativo más estricto que el de 2007. El nuevo reglamento fija una clasificación de usos (agrícola, urbano, industrial y otros) y asocia a cada uno de ellos criterios de calidad mínimos, definidos en tres grandes bloques: parámetros microbiológicos, parámetros fisicoquímicos y contaminantes emergentes. Los requerimientos más relevantes se muestran en el Anexo I [22].

En el ámbito microbiológico, se exige el control de indicadores como la bacteria *Escherichia coli*, que representan riesgos directos para la salud pública. Para el riego agrícola, por ejemplo, los límites de *E.coli* varían en función del tipo de cultivo (consumo en crudo, procesado o industrial), garantizando que el agua no suponga un riesgo de transmisión de enfermedades [22].

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos, el decreto contempla la monitorización de la turbidez, sólidos en suspensión, nutrientes como el nitrógeno o el fósforo), pH, conductividad eléctrica y demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) [22]. Estos controles aseguran no solo la seguridad sanitaria del agua regenerada, sino también su compatibilidad ambiental, evitando procesos de eutrofización en suelos y cuerpos receptores, así como daños en cultivos. Los análisis de laboratorio realizados durante este proyecto se centraron principalmente en monitorizar estos parámetros y analizar su evolución tras el paso del agua por el sistema de filtrado.

Finalmente, el aspecto más innovador de este Real Decreto es la incorporación de los contaminantes emergentes, entre los que se incluyen fármacos, pesticidas y microplásticos, cuya presencia en aguas regeneradas puede tener efectos a medio y largo plazo tanto en los ecosistemas como en la salud humana. Aunque no todos los parámetros cuentan aún con valores límite universales, se establece la necesidad de realizar evaluaciones periódicas del riesgo y adoptar medidas de prevención cuando se detecten concentraciones significativas [22].

En conclusión, esta nueva normativa de calidad refuerza la confianza en la reutilización del agua, asegurando que los riesgos para la salud, el medio ambiente y la sanidad animal se reduzcan a niveles aceptables, al tiempo que se fomenta una gestión preventiva y adaptativa, capaz de responder a los desafíos derivados del cambio climático y de la creciente presión sobre los recursos hídricos, convirtiendo la regeneración de agua en una estrategia esencial dentro de la economía circular y la protección del medioambiente.

## **Capítulo 4. METODOLOGÍA DE TRABAJO**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Este proyecto se basa en gran medida en el desarrollo de ensayos experimentales en laboratorio, que permiten evaluar de forma cuantitativa la eficacia de la instalación de filtración en cuestión. A través de una serie de ensayos planificados, se pretende caracterizar el comportamiento del sistema frente a distintos tipos de aguas y condiciones de operación, para valorar su posible aplicación en contextos reales de tratamiento y reutilización.

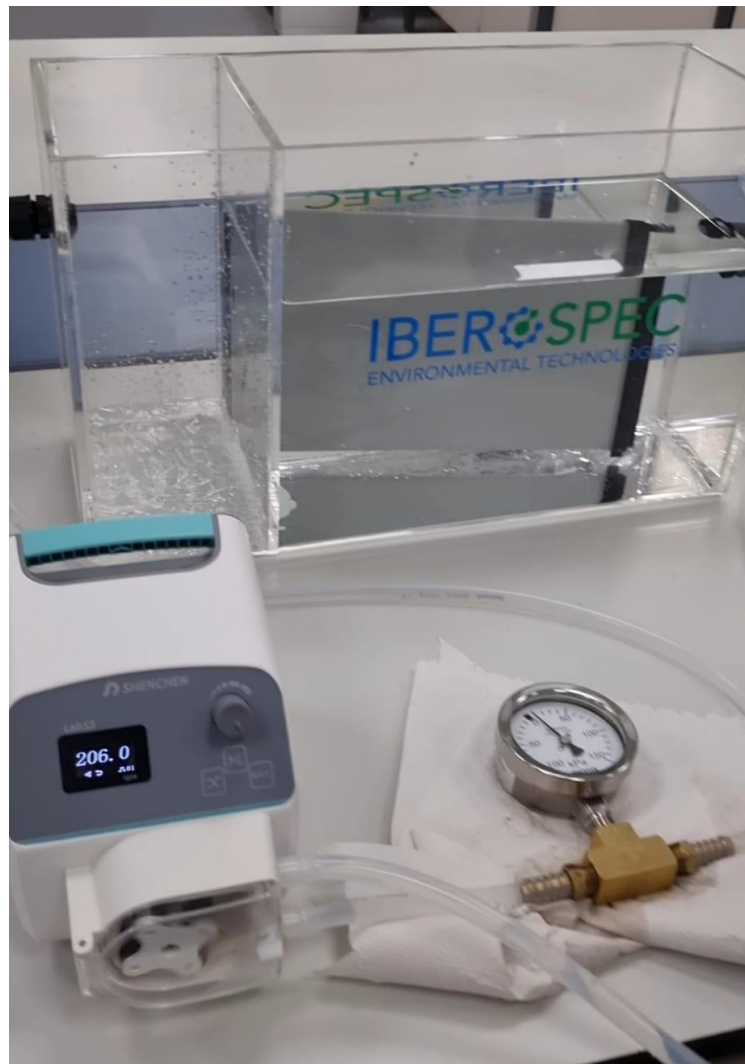
Los principales objetivos del trabajo experimental son:

- Analizar y aprender a utilizar la instalación de filtración, comprendiendo su funcionamiento, puesta en marcha, conexiones, modos de operación y procedimientos de mantenimiento, utilizando inicialmente agua limpia antes de realizar ensayos más en profundidad.
- Realizar los ensayos con muestras reales, llevando a cabo el protocolo necesario tanto en limpieza como en procedimiento con el equipo, y analizar la calidad del agua antes y después del proceso de filtración.
- Evaluar la eficacia del sistema en la retención de sólidos en suspensión, turbidez, conductividad, oxígeno disuelto y otros parámetros relevantes.
- Verificar el correcto funcionamiento operativa de la membrana y su resistencia frente a posibles ensuciamientos o incrustaciones.
- Recopilar datos cuantitativos que permitan comprobar el rendimiento del sistema.
- Obtener una base empírica que sirva como apoyo a las conclusiones generales del proyecto y a propuestas de optimización para una futura instalación.

## **4.2 PROCESO DE FILTRACIÓN EN EL LABORATORIO**

### **4.2.1 PROCEDIMIENTO DE FILTRACIÓN**

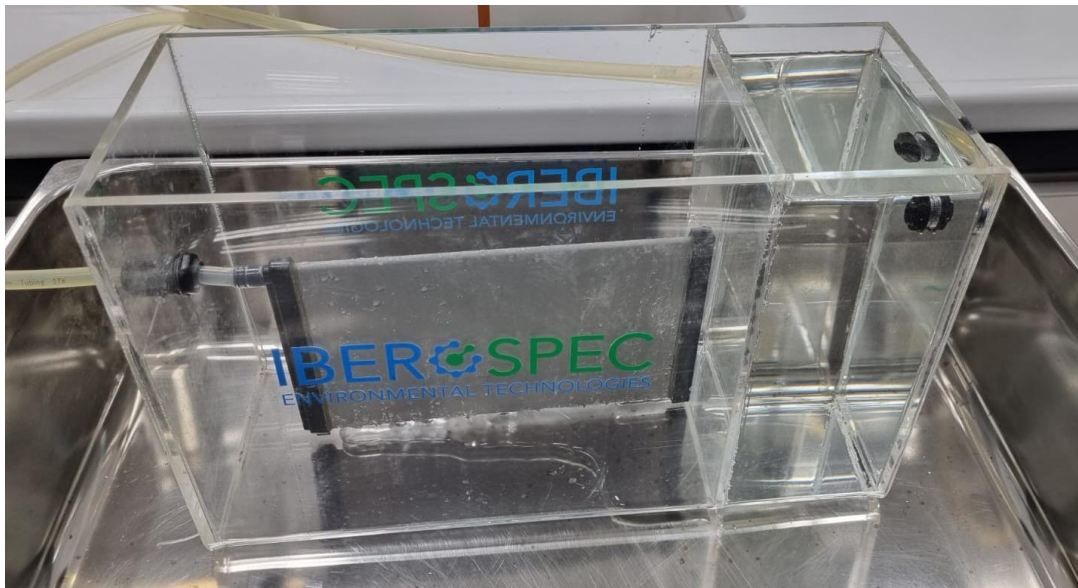
Como se ha comentado en el punto anterior, el primer ensayo con la instalación (Ilustración 7) tuvo como objetivo entender y aprender a cerca del funcionamiento del sistema. Este se llenó con agua limpia, para ponerlo en funcionamiento, evaluar el circuito en ambos sentidos, de filtración y de contra lavado y simular un posible ensayo, realizando por primera vez el encendido y apagado, con sus respectivas fases y procesos de limpieza.



*Ilustración 7 - Ensayo inicial, 11 de septiembre de 2024 (Elaboración propia)*

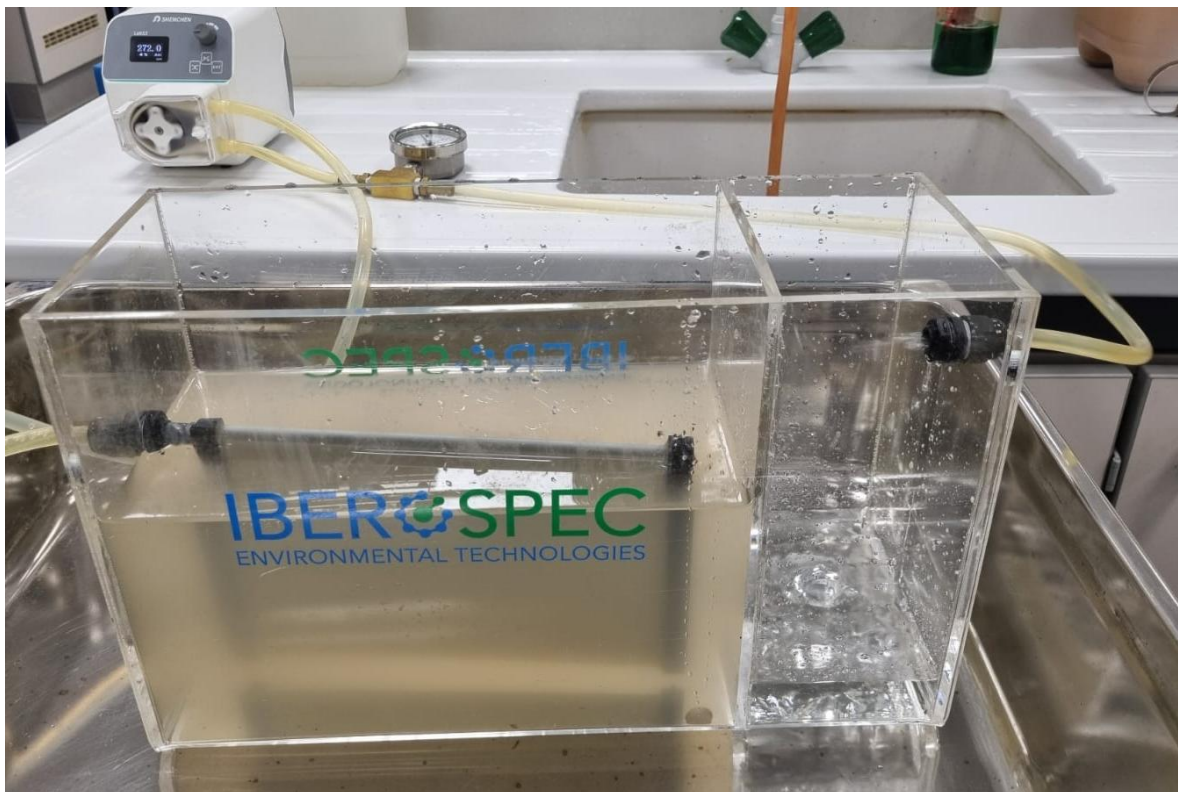
Una vez comprobado el sistema de actuación de la instalación, se comenzó con los ensayos reales. El procedimiento se inició en todos los casos con una fase de preparación y verificación del sistema de filtración en el laboratorio. Esta etapa preliminar tuvo como objetivo asegurar el correcto su montaje tras el tiempo sin uso, así como un primer proceso de limpieza para eliminar posibles contaminantes que pudieran distorsionar los análisis posteriores, asegurando así su fiabilidad (Ilustración 8). Esta limpieza consistió en llenado del compartimento menor con agua limpia, procedente de red, que permitió poner el sistema en funcionamiento en modo de contra lavado, activando así la bomba y limpiando tanto los conductos como la membrana de posible contaminación remanente, permitiendo además verificar los siguientes puntos antes de continuar:

- La ausencia de fugas en las conexiones hidráulicas.
- La correcta circulación del agua a través de los conductos y de la membrana.
- Funcionamiento de la bomba de alimentación.
- El correcto funcionamiento de los dispositivos de control (pantalla de la bomba y manómetro de la salida de esta).



*Ilustración 8 - Etapa preliminar de limpieza y comprobación de funcionamiento (Elaboración propia)*

Superada esta fase, y una vez comprobada la estabilidad operativa del sistema, se vació el circuito y se procedió al llenado del compartimento de la membrana con el agua objeto de estudio, siguiendo los protocolos establecidos para su manipulación y caracterización. Una vez lleno, se puso en marcha el flujo y, por lo tanto, el proceso de filtración (Ilustración 9), durante el que se empezó a preparar el material para el posterior análisis del agua, tomando las muestras del agua bruta antes de filtrar, todo mientras se vigilaba el proceso por si ocurrieran errores o para detectar posibles fugas o deficiencias a mejorar.



*Ilustración 9 - Instalación de filtrado en funcionamiento (Elaboración propia)*

Se realizaron múltiples ensayos en el laboratorio, aumentando la carga de contaminación de las muestras utilizadas, hasta concluir con un último ensayo con agua procedente de una planta industrial real de clarificado de fangos, consiguiendo de este modo la caracterización de la instalación en una situación a la que se podría enfrentar en caso de ser implementada

en una planta de depuración. La Ilustración 10 muestra todo el equipo y material de laboratorio utilizado en dicha práctica, ordenado antes de comenzar.



*Ilustración 10 - Material empleado en el ensayo final (Elaboración propia)*

#### **4.2.2 PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS**

A lo largo del proyecto de caracterización de la instalación, se emplearon diferentes tipos de muestras representativas de diversas etapas de tratamiento. El objetivo fue evaluar el comportamiento del sistema frente a aguas con distintas características fisicoquímicas y cargas contaminantes, simulando situaciones reales a las que podría enfrentarse una instalación de regeneración.

La selección de las muestras respondió a un criterio de progresividad, comenzando con aguas de menor carga para verificar el correcto funcionamiento del sistema y pasando posteriormente a aguas más complejas que pudieran poner a prueba la capacidad de retención de la membrana y su resistencia al ensuciamiento. Como se ha comentado anteriormente, el primer ensayo se hizo con agua completamente limpia, proveniente de la red y, más adelante, se analizaron muestras de tres tipos de procedencia:

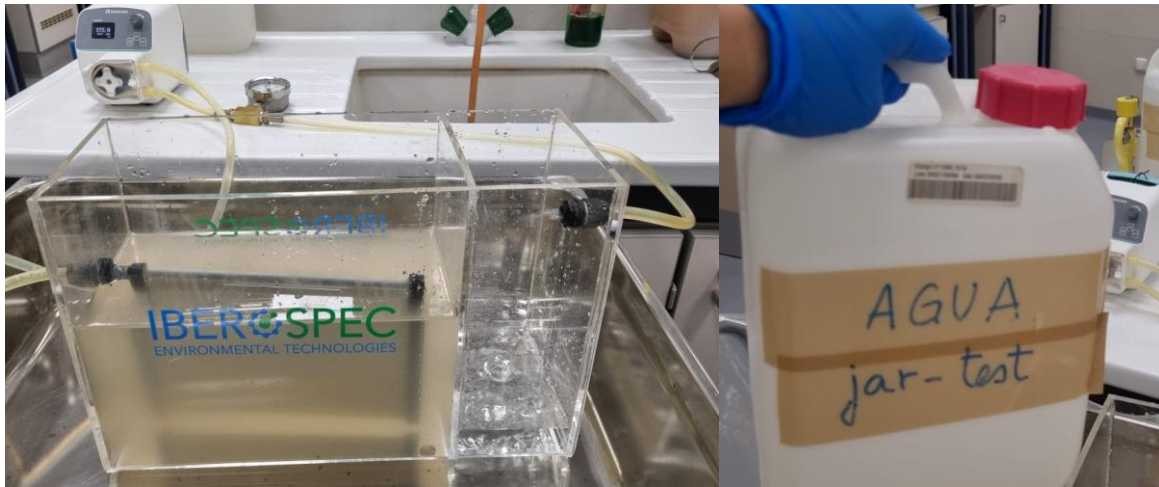
El primer ensayo se llevó a cabo utilizando aguas de captación destinadas a procesos de potabilización (Ilustración 11). Se trata, por tanto, de agua bruta, sin tratamiento previo, directamente recogida del sistema de entrada a una planta de tratamiento, y constituye un ejemplo típico del tipo de recurso hídrico de significativo valor en caso de poder ser reutilizado. La calidad de este tipo de agua es altamente variable, ya que depende de múltiples factores, entre ellos las condiciones climáticas, el régimen hidrológico de la zona la época del año y el origen del recurso. Puede tratarse de agua superficial, proveniente de ríos, embalses o canales, o subterránea, extraída de pozos o acuíferos. En general, se trata de aguas con una carga moderada de sólidos en suspensión, turbidez baja o media, baja en el caso del ensayo, y presencia detectable de materia orgánica disuelta, así como posibles trazas de microorganismos o nutrientes.

Estas características convierten este tipo de agua en una muestra ideal para llevar a cabo un primer ensayo real en condiciones de exigencia moderadas y validar la eficiencia y el correcto funcionamiento de la membrana en etapas iniciales de tratamiento. Además, su composición es representativa de los caudales que alimentan muchas plantas de regeneración, por lo que los resultados obtenidos tienen una alta aplicabilidad práctica.



*Ilustración 11 - Ensayos con aguas de captación, 11 de febrero y 26 de marzo de 2025 (Elaboración propia)*

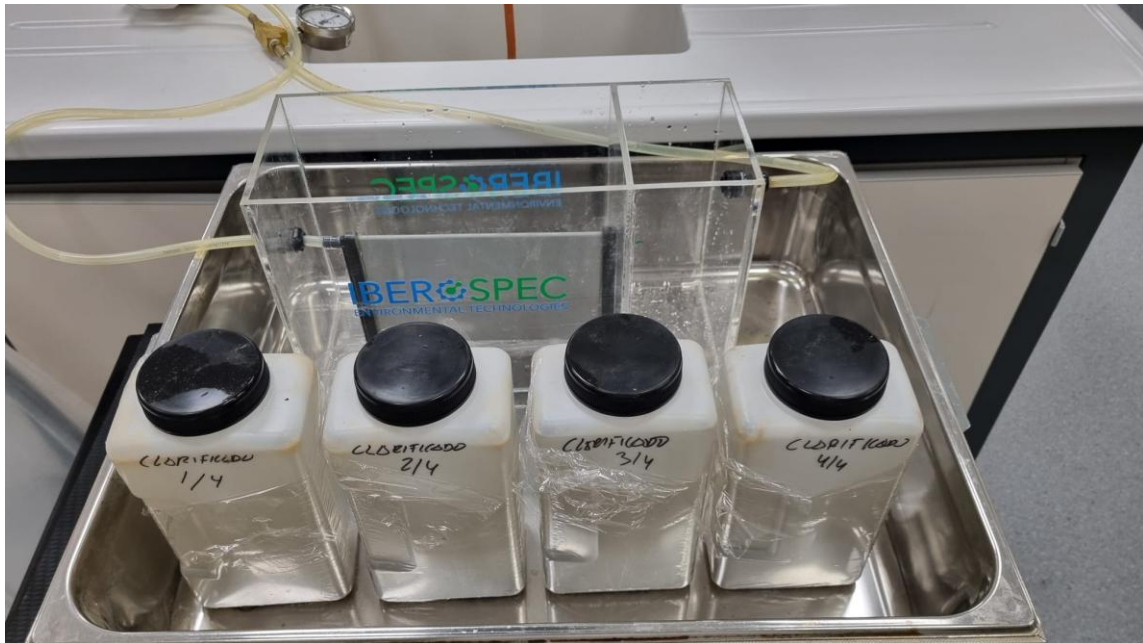
Otro conjunto de muestras provino de ensayos de coagulación-floculación realizados en laboratorio mediante el procedimiento estandarizado de estudio de Jar-Test (Ilustración 12). Este método simula en escala reducida los procesos de tratamiento fisicoquímico aplicados en estaciones depuradoras para facilitar la eliminación de sólidos finos, coloides y compuestos orgánicos disueltos presentes en el agua bruta. En cada ensayo se dosificó una concentración específica de dos coagulantes distintos, sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) y cloruro de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ), seguida de una etapa de agitación lenta para favorecer la formación de flóculos. Posteriormente, las muestras fueron decantadas durante un tiempo definido, tras el cual se extrajo el sobrenadante para ser analizado. Estas muestras representan un efluente parcialmente decantado, con una turbidez significativa, pero aún con presencia de partículas coloidales sedimentables y flóculos en suspensión. El objetivo de aplicar este tipo de muestra fue evaluar si la membrana cerámica mejora aún más la calidad del agua tras un tratamiento convencional, y comprobar en los análisis posteriores si la presencia de coagulantes influye en el rendimiento del sistema,



*Ilustración 12 - Ensayos con muestra Jar-Test, 7 de marzo y 10 de abril de 2025 (Elaboración propia)*

Finalmente, se realizó un ensayo final con una muestra con mayor carga contaminante, procedente de un clarificado de fangos de una planta industrial real, obtenida tras la separación de la fase líquida en procesos de deshidratación mecánica de lodos (Ilustración 13). Este tipo de agua representa uno de los escenarios más exigentes para la membrana, ya que suele contener altas concentraciones de sólidos suspendidos, materia orgánica degradada, nutrientes disueltos como nitrógeno y fósforo, y posibles partículas conductoras.

Este tipo de muestra representa uno de los escenarios más agresivos a los que puede enfrentarse la membrana cerámica, por lo que su inclusión en el proyecto permite explorar aspectos clave como la capacidad de retención de sólidos y materia coloidal, el grado de ensuciamiento que sufre la membrana, tanto superficial como interno, en condiciones de máxima carga o la viabilidad de recuperar parte del agua contenida en estos efluentes para usos secundarios no potable, como riego industrial, limpieza urbana o refrigeración de maquinaria. En definitiva, el tratamiento de este tipo de aguas tiene un elevado interés ambiental, por lo que el análisis de los resultados de su filtración avanzada es de gran interés.



*Ilustración 13 - Ensayo con muestra de clarificado de fangos de 2025 (8 litros) (Elaboración propia)*

### 4.2.3 MEDIDAS DE SEGURIDAD

Durante todo el procedimiento se aplicaron protocolos de seguridad establecidos por el laboratorio, necesarios al tratar con aguas contaminadas y en un entorno con reactivos peligrosos, como es el caso. Las medidas de seguridad seguidas durante los ensayos fueron:

- La primera y más importante, uso constante de guantes de protección, bata de laboratorio y gafas de seguridad, mostradas en la Ilustración 14, especialmente necesarios durante la manipulación del agua a tratar en la instalación y durante los ensayos que incluyen reactivos químicos.
- Secado de manos a la hora de manipular equipos eléctricos, con especial cuidado con el conexionado de la bomba peristáltica, que precisa de alimentación de la red.
- Supervisión constante de los niveles de capacidad de los compartimentos, especialmente el del permeado y, durante el contra lavado, el del agua bruta, así como la presión del manómetro, para evitar condiciones de riesgo.

- Correcto uso del material del laboratorio, respetando el orden y limpieza del mismo. Es importante el uso adecuado de los botes de los reactivos, abriéndolos solo el tiempo estrictamente necesario, así como la correcta limpieza de los utensilios utilizados durante el ensayo y para poder ser guardados de manera segura.
- Gestión adecuada de residuos generados, especialmente al finalizar el ensayo, ya que es necesario recoger y limpiar los recipientes que han estado en contacto con el agua contaminada, así como todos los líquidos utilizados durante los análisis, que contienen reactivos de distintos tipos.
- Sistemas adicionales del laboratorio accesibles en todo momento, como lavaojos y ducha de emergencia.

La implementación de este protocolo fue fundamental para garantizar la seguridad durante el trabajo en el laboratorio, especialmente necesaria al tratar con reactivos químicos y grandes volúmenes de agua contaminada, asegurando así la integridad del usuario, del propio sistema de filtración y de las instalaciones.



*Ilustración 14 - Medidas de seguridad. Bata, guantes y gafas (izquierda, [23]) y manómetro de control de presión (derecha, elaboración propia)*

#### **4.2.4 PROBLEMAS DETECTADOS**

Durante la realización de los ensayos experimentales con la instalación de filtración se identificaron diversos problemas técnicos y operativos. Si bien algunos fueron detectados rápidamente y solucionados de forma eficaz para continuar con el proceso, otros tienen relación con la propia instalación, y se propondrá una mejora de esta mediante modificaciones y nuevos diseños más adelante en este documento:

Uno de los principales inconvenientes surgió en el proceso de desagüe del sistema tras cada ensayo. La instalación no cuenta con un sistema de vaciado por gravedad eficaz, provocando que quedasen volúmenes residuales de agua tras cada filtrado, dificultando la renovación total del agua entre ensayos y generando riesgos de contaminación cruzada entre muestras. Esto obligó a extraer manualmente el fluido restante, tanto agua bruta en el compartimento de la membrana como permeado en el adyacente, lo que implicaba una pérdida de tiempo, una maniobra complicada e inadecuada con el soporte de metacrilato y una posible contaminación y deterioro de algunos componentes por manipulación directa.

Otro aspecto importante observado fue la velocidad de filtración, que en algunos casos resultó ser inferior a la esperada. Esto podría estar relacionado con varios factores, como el ensuciamiento parcial de la membrana tras tiempo filtrando o una insuficiente presión de succión generada por la bomba peristáltica. La baja velocidad afectó directamente a los tiempos de obtención de permeado, necesitando aproximadamente 7 minutos por litro de permeado, aumentando a 10 minutos con agua con elevado nivel de contaminación, exigiendo ajustes en los tiempos de operación. Esta situación se vio acentuada al disminuir el nivel del agua bruta por debajo de la altura de la membrana, perdiendo superficie de filtrado y disminuyendo la presión de la columna de agua. Como consecuencia, no solo se ralentizó el proceso, sino que se produjo vacío en el conducto de conexión entre la membrana y la bomba, comprimiéndose y dificultando el flujo del permeado. Durante el ensayo se introdujeron sólidos en el compartimento con el fin de elevar este nivel, pero fue complicado conseguir el tamaño adecuado para que cupiera sin alterar la posición de la membrana, por lo que sería conveniente, en un nuevo diseño, incluir bloques sólidos a medida para

utilizarlos en caso de que el volumen de la muestra a filtrar sea menor del indicado, elevando así el nivel una vez se vierta en la instalación y permitiendo un filtrado más rápido y eficiente.

Durante los ciclos de ensayo se hizo notable el desgaste de los tubos, especialmente en aquellos sometidos a mayor presión, como la conexión con la membrana, llegándose a producir una rotura en ese punto con el sistema en marcha. Este problema supuso la interrupción del ensayo y un riesgo de contaminación del entorno de trabajo, ya que se produjo una fuga del permeado que se derramó sobre el material del laboratorio y necesitó de la reparación necesaria de la zona afectada para reestablecer el funcionamiento, con el consecuente retraso. Estos tubos, fabricados en material flexible, mostraron debilitamiento progresivo por lo que, en un diseño futuro, sería conveniente reforzarlos, especialmente en las uniones, o sustituirlos por otros más resistentes.

Finalmente, se detectaron errores de medición y de calibración del medidor de conductividad y oxígeno disuelto, ya que, como se comentará en el siguiente apartado, de resultados, se obtuvo que parámetros como la conductividad, los sulfuros y los fosfatos habían aumentado en el permeado con respecto a las pruebas al agua bruta. Esto no tiene sentido en un proceso de microfiltrado, por lo que se tuvo en consideración y se repitió el ensayo, calibrando nuevamente y de manera adecuada los aparatos de medida.

### ***4.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL AGUA***

Una vez filtrados las diferentes clases de agua, se procedió a su análisis fisicoquímico tomando muestras tanto del fluido bruto como del permeado tras el paso por la membrana. Los métodos utilizados siguen protocolos estandarizados de laboratorio y permitieron caracterizar los parámetros más relevantes para determinar la calidad del agua y la eficiencia del sistema.

El proceso de análisis comienza una vez se ha obtenido el volumen suficiente de permeado, momento en el cual se detiene la bomba peristáltica y se desconecta de la red, para

seguidamente extraer mediante pipetas el volumen necesario de ambos recipientes (agua bruta y permeado) y así proceder a distintos ensayos.

El análisis de las aguas de captación se basó en la medida de parámetros relacionados con la potabilización del agua. La primera etapa consistió en la determinación de la conductividad, el pH y el oxígeno disuelto, que sirven como indicadores generales de la calidad del agua y permiten evaluar su evolución tras el proceso de filtración.

El pH indica la acidez o basicidad del agua y puede influir directamente en la eficiencia de la filtración y en el comportamiento de los sólidos presentes. La medida se realizó con un pH-metro digital, previamente calibrado mediante disoluciones patrón de pH 4 y pH 7 (Ilustración 15), siguiendo el protocolo estándar. Se utilizó un volumen de muestra de aproximadamente 50 litros, colocado en un vaso de precipitados limpio, en el que se introdujo el electrodo hasta estabilizar la lectura.

La conductividad eléctrica, medida en microSiemens por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), es un indicador de la concentración de sales disueltas en el agua (iones), por lo que su medida proporciona información sobre la carga iónica global del medio. Se utilizó un conductímetro de electrodo selectivo, calibrado previamente con una disolución patrón de  $1413 \mu\text{S}/\text{cm}$  (Ilustración 15), y la medición se llevó a cabo sobre la muestra de 50 ml.

El oxígeno disuelto (OD) indica el grado de oxigenación del agua, especialmente relevante en aguas con presencia de materia orgánica biodegradable. Una baja concentración de oxígeno puede indicar procesos de descomposición biológica o alta demanda bioquímica de oxígeno. La medida se realizó mediante una sonda específica de OD, previamente calibrada.

Es importante recalcar la importancia de calibrado de los tres electrodos de medición, ya que en el primer ensayo no se realizó, lo que dio lugar a mediciones incoherentes, como se comentará en el apartado de “Análisis de resultados”. El detalle completo de los procedimientos y volúmenes está indicado en el Anexo II [24].



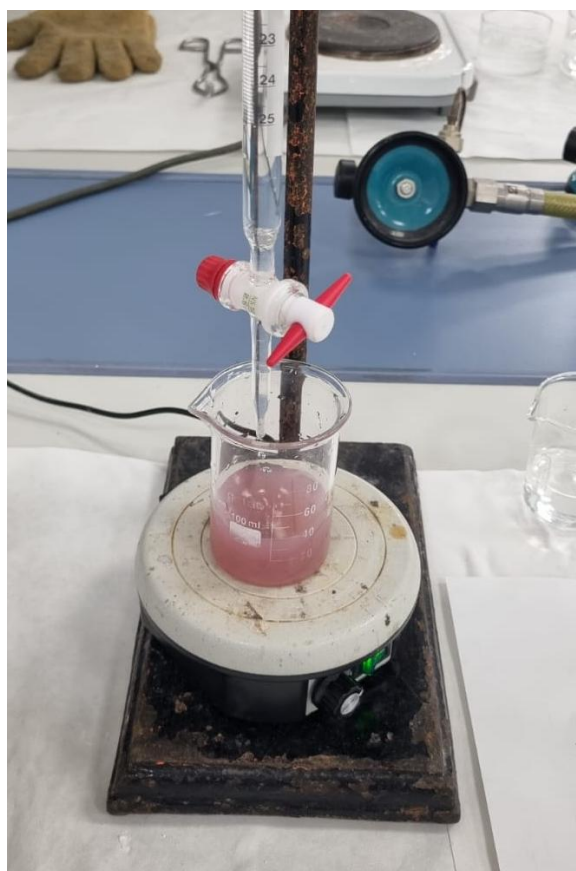
*Ilustración 15 - Calibración del pH-metro (izquierda) y del electrodo selectivo de conductividad (derecha) (Elaboración propia)*



*Ilustración 16 - Ejemplo de medición de pH, conductividad y oxígeno disuelto (Elaboración propia)*

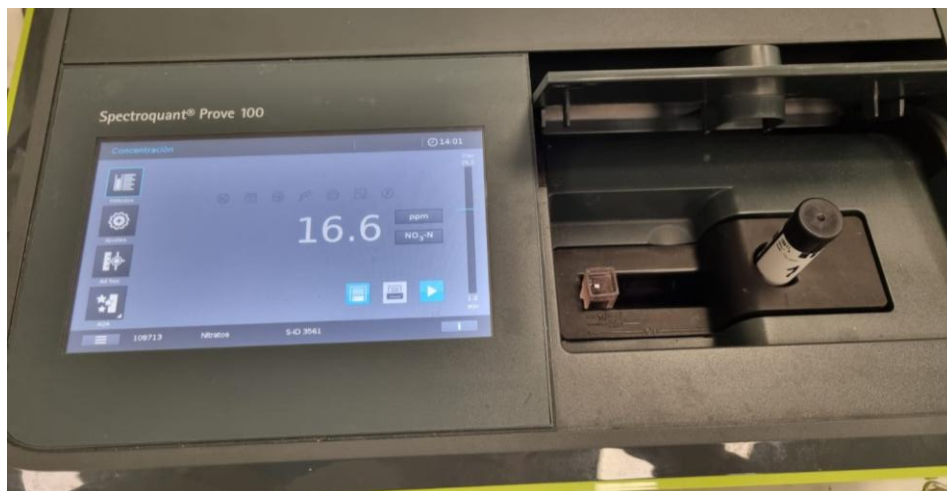
La segunda etapa consistió en el análisis de la presencia sales inorgánicas, que es esencial para evaluar su calidad, su grado de mineralización, y su idoneidad para procesos posteriores como la potabilización. Estas sales influyen directamente en la conductividad eléctrica y en la corrosión en los sistemas de tratamiento. Además, ciertas sales, como los nitratos o el amonio, actúan como indicadores clave de contaminación agrícola o urbana. Se llevó a cabo

una determinación de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) en dos fases. La primera, la identificación cualitativa, en la que se tomaron 2-3 ml de agua de muestra en un tubo de ensayo, a la que se añadieron unas gotas de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$  0,2 M), para comprobar si se formaba un precipitado blanco de cloruro de plata ( $\text{AgCl}$ ) que confirmaba la presencia de cloruros en el agua. Una vez confirmada la presencia de cloruros, se procedió a la cuantificación por valoración, introduciendo en un matraz Erlenmeyer 25 ml de muestra, junto con 2 gotas de indicador de cromato potásico ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$  al 1%). A continuación, se valoró gota a gota con  $\text{AgNO}_3$  0,02 M desde una bureta hasta observar un precipitado de color rojo (Ilustración 17), correspondiente a la formación de  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ , indicando el punto final en el que se anotó el volumen de reactivo gastado, para calcular la concentración de cloruros en el agua, parámetro que es fundamental en la determinación del grado de salinidad y posible sabor del agua potable.



*Ilustración 17 - Ejemplo valoración con  $\text{AgNO}_3$  (Elaboración propia)*

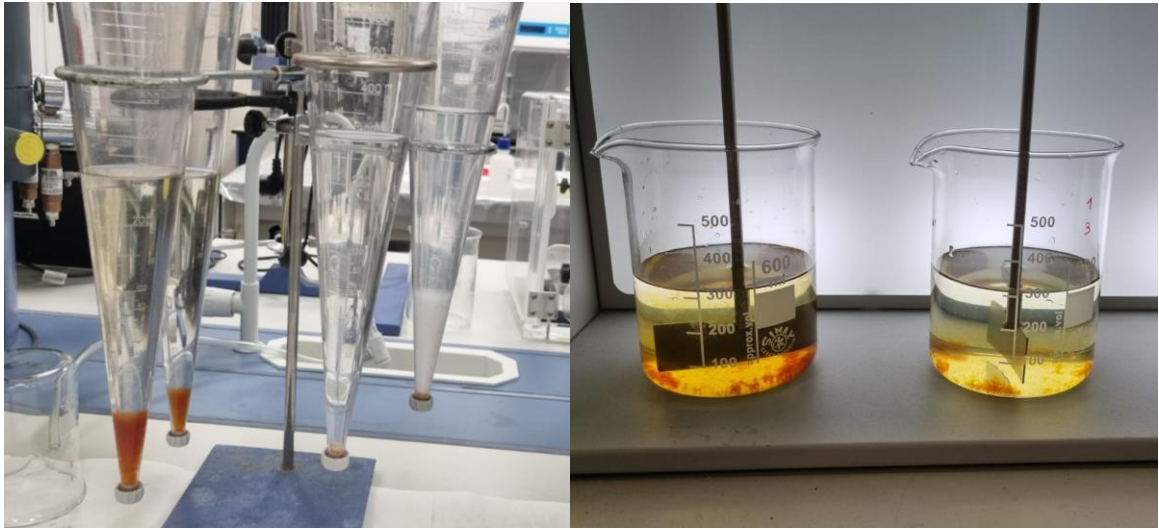
Finalmente, se utilizó el análisis espectrofotométrico con el equipo Spectroquant NOVA 60 Merck (Ilustración 18), para la medición de los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), los fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) y los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), siguiendo los procedimientos y volúmenes indicados en el Anexo II.



*Ilustración 18 - Ejemplo de análisis espectrofotométrico, de amonio en este caso (Elaboración propia)*

Por otro lado, se llevaron a cabo procedimientos específicos de análisis de agua residual, con el objetivo de caracterizar su carga contaminante antes y después de los procesos de tratamiento. Entre los parámetros evaluados se incluyeron los sólidos en suspensión sedimentables, determinados mediante decantación en cono Imhoff, lo que permitió estimar la fracción de sólidos que puede eliminarse por sedimentación simple. El procedimiento se llevó a cabo según las instrucciones del Anexo III (1 litro, 1 hora) [24].

Adicionalmente, se aplicó el ensayo de coagulación-floculación Jar-Test como técnica de pretratamiento para mejorar el proceso de tratamiento del agua residual, mostrado en la Ilustración 19. Este método consistió en la adición de coagulantes (sulfato de aluminio o cloruro férrico) en diferentes dosis, seguido de agitación controlada y posterior reposo, para favorecer la formación y sedimentación de flóculos. La eficacia del tratamiento se evaluó mediante la medición de la turbidez del sobrenadante y la observación del volumen de flóculos formados. El detalle completo de los procedimientos, tiempos y volúmenes está indicado en el Anexo III.



*Ilustración 19 - Ejemplo de ensayo Jar - Test (Elaboración propia)*

En el ensayo final se realizó todo el proceso en el laboratorio con el fin de conseguir una completa y detallada caracterización de la muestra de agua clarificada, así como una prueba con un extracto real de la industria. La Ilustración 20 muestra el equipo completo utilizado en este ensayo.



*Ilustración 20 - Equipo completo para el ensayo de agua clarificada, 21 de mayo de 2025 (Elaboración propia).*

## **Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos durante los ensayos experimentales realizados con la instalación de filtración por membrana cerámica. El objetivo principal es evaluar la eficacia del sistema frente a distintos tipos de agua, determinando la evolución de diversos parámetros antes y después del proceso de filtración.

Como se ha explicado en capítulos anteriores, se han incluido muestras de diferente naturaleza; aguas de captación, agua tratada por coagulación-floculación y agua procedente del escurrido de fangos; con el fin de representar escenarios operativos representativos de la industria, comenzando con muestras menos exigentes para concluir con el ensayo de un agua procedente de una planta real.

La comparación entre los valores iniciales y finales permite valorar el comportamiento de la membrana y la capacidad real de retención de contaminantes, así como su viabilidad como etapa avanzada de tratamiento. Los resultados se interpretan en función de la naturaleza de cada muestra, teniendo en cuenta tanto la procedencia como los requerimientos para cada una de ellas.

## 5.1 PRIMER ANÁLISIS CON AGUAS DE CAPTACIÓN

<i>Análisis 1: aguas captación</i>						
	<i>Medidas previas al filtrado</i>					<i>Análisis post-filtrado</i>
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>Media</i>	
<i>Conductividad [μS/cm]</i>	765,4	768	767,9	774	767,1	1287
<i>PH</i>	6,6	5,43	6,216	6,08	6,082	6,78
<i>O2 %</i>	97	78	98,9	94	91,3	98,6
<i>Cloruros [ml]</i>	7	5,2	5,4	4,8	5,87	4,5
<i>NO3- [mg/L]</i>	4,5	0,4	1,4	4,2	2,1	2
<i>NH4+ [mg/L]</i>	18,4	2,02	1,49	1,09	7,30	27,7

<b>PO4 3- [mg/L]</b>	34,7	7,3	37,2	High	26,4	57,5
<b>SO4 2- [mg/L]</b>	90	500	108	121	232,67	326

Tabla 1 - Resultados del primer análisis con aguas de captación, 11 de febrero de 2025

En el primer análisis de la muestra de agua de captación, se realizaron distintas medidas con el agua sin filtrar, por lo que, para todos los parámetros, se considerará la media de las mismas. La conductividad aumentó notablemente desde una media de 767,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 1287  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que no concuerda con un paso por membrana de ultrafiltración, lo que se detectó y se concluyó que fue debido a la falta de calibración del electrodo, lo que se tuvo en cuenta para posteriores análisis. El pH mostró un ligero aumento, pasando de 6,08 a 6,78, lo cual es coherente y podría deberse a la eliminación de partículas ácidas o a la influencia de aireación durante el ensayo. En cuanto al oxígeno disuelto, se produjo un leve incremento, pasando del 91,3 % al 98,6 %, lo que puede estar relacionado con la aireación que adquiere el fluido durante el proceso de filtración.

Por otro lado, los cloruros se redujeron de 198,54 mg/L a 141,81 mg/L (cálculo detallado posteriormente), y los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) también disminuyeron levemente, lo que indica una retención parcial ciertas partículas coloidales en el proceso de filtración. En contraste, los valores de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), los fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) y los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) aumentaron, lo que no tiene sentido tras la filtración, por lo que se debió a errores experimentales como contaminación cruzada o fallos durante el análisis.

Cálculo de la concentración de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ):

$$\text{Concentración} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] = \frac{\text{Molaridad} * \text{Volumen de cloruros} * \text{Masa molar}}{\text{Volumen de agua problema}} * 1000$$

Antes del filtrado (7ml de cloruros):

$$\text{Concentración} = \frac{0,02 * 0,007 * 35,453}{0,025} * 1000 = 198,54 \left[ \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right]$$

Tras el filtrado (5ml de cloruros):

$$\text{Concentración} = \frac{0,02 * 0,005 * 35,453}{0,025} * 1000 = 141,81 \left[ \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right]$$

## 5.2 SEGUNDO ANÁLISIS CON AGUAS DE CAPTACIÓN

<i>Análisis 2: agua captación</i>		
	<i>Análisis pre-filtrado</i>	<i>Análisis post-filtrado</i>
<i>Conductividad [<math>\mu\text{S/cm}</math>]</i>	766	704
<i>Cloruros [ml]</i>	6,5	4,5
<i>NO<sub>3</sub>- [mg/L]</i>	4,5	2
<i>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> [mg/L]</i>	0,83	0,79
<i>PO<sub>4</sub> 3- [mg/L]</i>	63,1	51,7
<i>SO<sub>4</sub> 2- [mg/L]</i>	90	32,6

*Tabla 2 - Resultados del segundo análisis con aguas de captación, 26 de marzo de 2025*

El segundo análisis del agua de captación, repetido esencialmente por la detección de errores e incoherencias en el primer ensayo, mostró una mejora de los datos obtenidos. En primer lugar, la conductividad eléctrica descendió de 766  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 704  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , esta vez tras la pertinente calibración, explicada anteriormente. Esta bajada ya concuerda con un proceso de filtración, tras la retención durante el proceso de sales disueltas y de partículas con carga iónica.

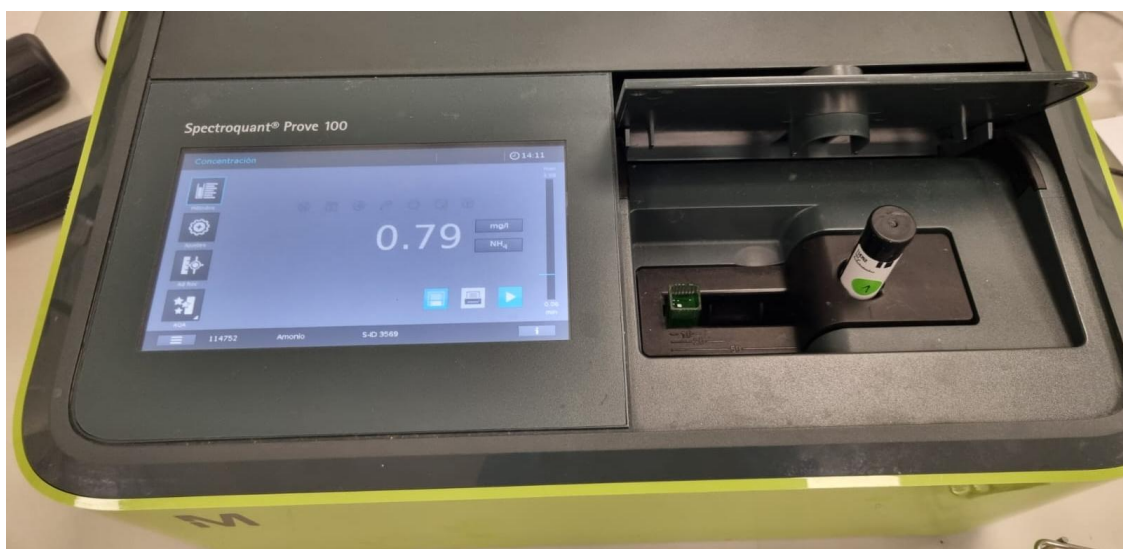
Por otro lado, en este segundo ensayo se produjo el esperado descenso en la concentración de las sales inorgánicas en el agua. Mientras el amonio (ejemplo de medición mediante análisis espectrofotométrico en la Ilustración 21) y los nitratos sufrieron un leve descenso, la bajada en las concentraciones de cloruros (detallada posteriormente), nitratos y sulfatos fue muy considerable, especialmente en el caso de los sulfatos.

Cálculo de la concentración de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ): Antes del filtrado (6,5ml de cloruros):

$$\text{Concentración} = \frac{0,02 * 0,0065 * 35,453}{0,025} * 1000 = 184,36 \left[ \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right]$$

Tras el filtrado (4,5ml de cloruros):

$$\text{Concentración} = \frac{0,02 * 0,0045 * 35,453}{0,025} * 1000 = 127,63 \left[ \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right]$$



*Ilustración 21 - Ejemplo de análisis espectrofotométrico de amonio en una muestra (Elaboración propia)*

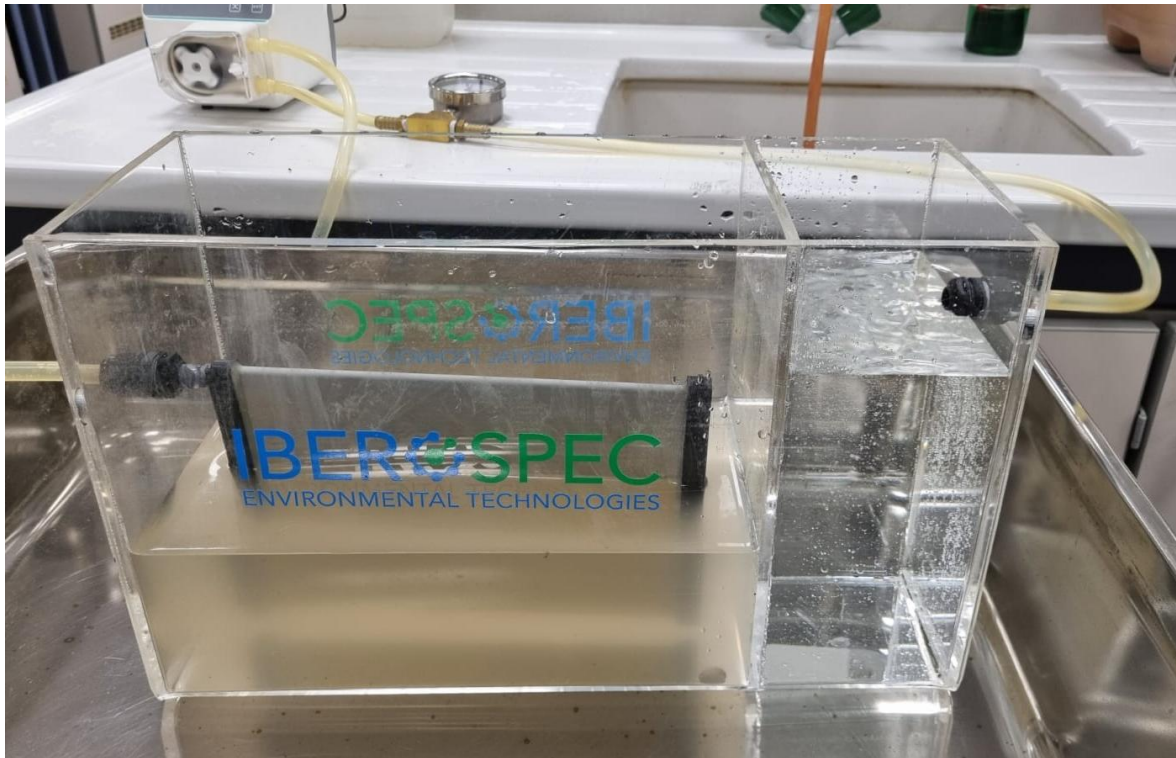
### 5.3 PRIMER ANÁLISIS CON AGUA JAR-TEST

<i>Análisis 1 agua Jar-Test</i>						
		<i>Medidas previas al filtrado</i>				<i>Análisis post-filtrado</i>
		1	2	3	Media	
	Turbidez inicial [NTU]	75	67,6	73	71,87	0,82
Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 6ml	Volumen flóculos sedimentados [ml]	28	24	25	25,67	22
	Volumen clarificado [ml]	272	276	275	274,33	278
	Turbidez [NTU]	12,34	16,5	10,67	13,17	9,62
Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 12ml	Volumen flóculos sedimentados [ml]	0	0	0	0	0
	Volumen clarificado [ml]	300	300	300	300	300
	Turbidez [NTU]	80	32,1	70	60,7	12,01
FeCl <sub>3</sub> , 3ml	Volumen flóculos sedimentados [ml]	5	4,5	7	5,50	4
	Volumen clarificado [ml]	295	295,5	293	294,50	296
	Turbidez [NTU]	10,95	5,09	13,04	9,693	0,82
FeCl <sub>3</sub> , 6ml	Volumen flóculos sedimentados [ml]	11	12	14	12,33	9
	Volumen clarificado [ml]	289	288	286	287,67	291
	Turbidez [NTU]	13,18	5,09	6,14	8,14	0,98

*Tabla 3- Resultados del primer ensayo Jar-Test, 7 de marzo de 2025*

En la siguiente etapa de ensayos se procedió al análisis Jar-Test de la muestra disponible para ello. El propósito, además de evaluar la eficacia de distintos volúmenes de coagulantes, fue comprobar la eficacia en la reducción de la turbidez del agua y valorar cómo influye la filtración con membrana para un posterior tratamiento de coagulación. De nuevo, se considerará la media de las tres mediciones del fluido previo al filtrado.

La turbidez inicial media del agua fue de 71,87 NTU, y tras la filtración final se redujo drásticamente a 0,82 NTU, lo que indica una alta eficacia global de la instalación en reducción de la turbidez, como se aprecia en la Ilustración 22.



*Ilustración 22 - Imagen del ensayo del 7 de marzo de 2025, con apreciable reducción de la turbidez tras la filtración (Elaboración propia)*

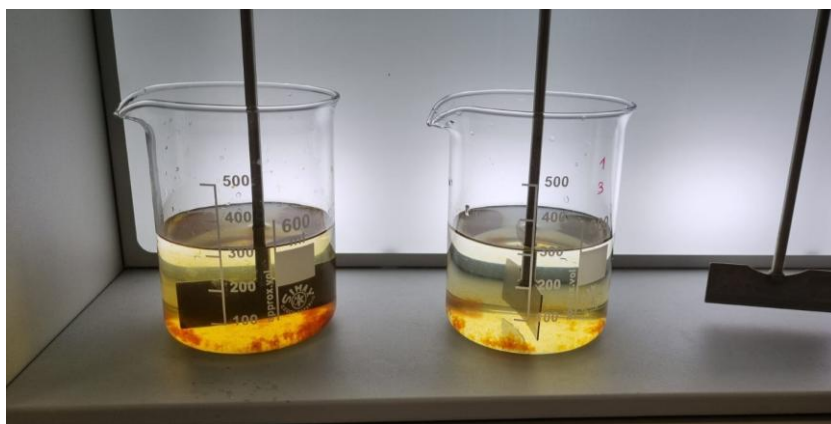
En relación con la utilización de sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) como floculante, se comprobó que, para una muestra de 300 ml, la dosis efectiva del mismo es 6 ml, que consiguió la formación de flóculos tanto en la muestra anterior como en la posterior al filtrado, y reducción de la turbidez en el clarificado. Por otro lado, con 12 ml no se obtuvieron flóculos sedimentados, como se aprecia en la Ilustración 23, concluyendo que es un volumen inadecuado para este ensayo, a pesar de conseguir una reducción elevada de la turbidez.

Observando ahora los resultados obtenidos con cloruro de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ) como floculante, el escenario fue distinto, ya que, en este caso ambos volúmenes arrojaron resultados similares. Si bien se consiguió un impresionante valor de turbidez (menor que 1 NTU) tras

la coagulación del agua filtrada en ambos casos, el volumen de flóculos sedimentados fue aproximadamente el doble al usar 6 ml de cloruro de hierro, visible en la Ilustración 23, por lo que se eligió este valor en posteriores ensayos. Por otro lado, la reducción del volumen de flóculos formados fue similar en ambos casos, alrededor del 30%.



*Ilustración 23 - Imagen de los volúmenes de flóculos formados en el análisis del permeado, 7 de marzo de 2025, (Elaboración propia)*



*Ilustración 24 - Proceso de agitación durante el ensayo Jar-Test, 7 de marzo de 2025, (Elaboración propia)*

#### 5.4 SEGUNDO ANÁLISIS CON AGUA JAR-TEST

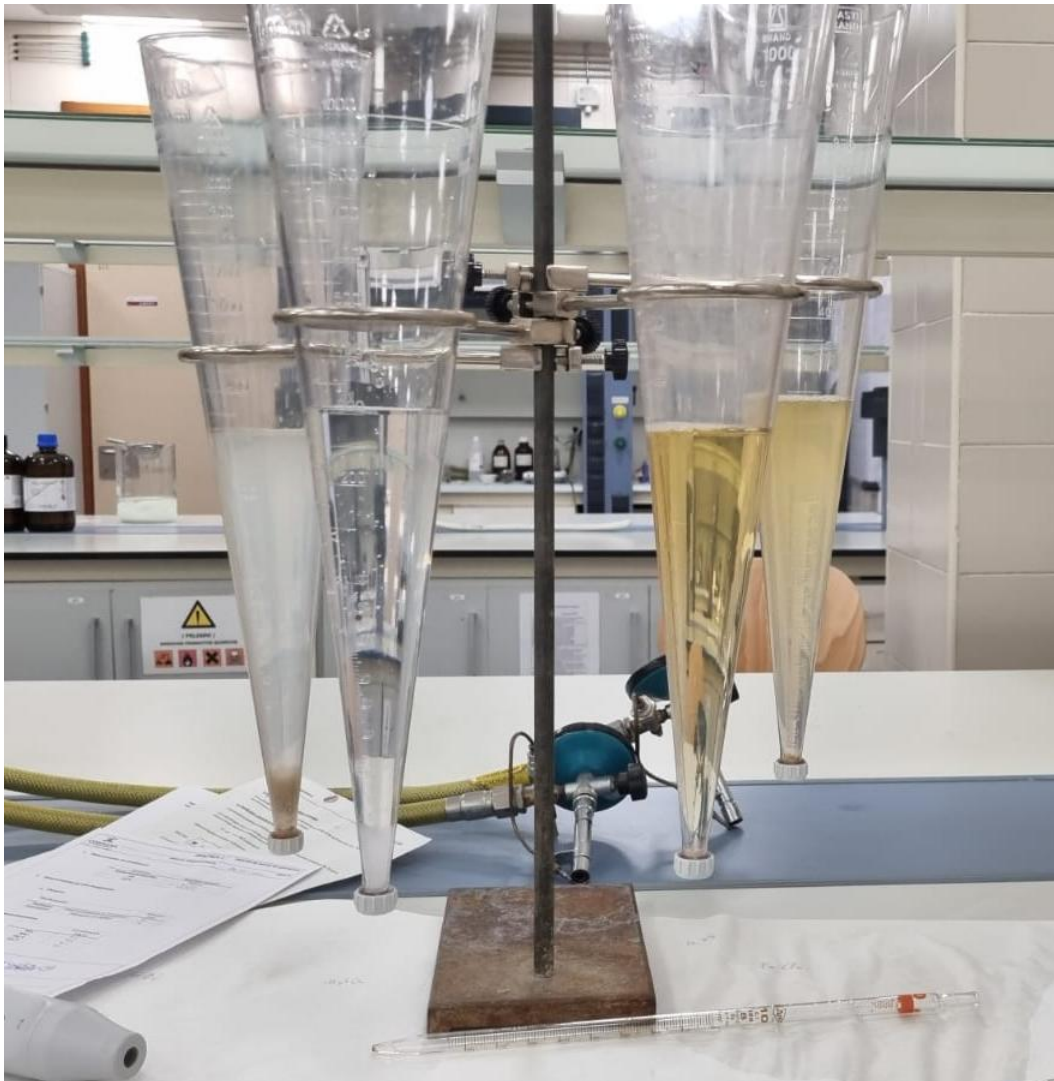
<i>Análisis 2: agua Jar-Test</i>			
		<i>Medidas previas al filtrado</i>	<i>Análisis post-filtrado</i>
	Turbidez inicial [NTU]	75	0,27
Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 6ml	Volumen flóculos sedimentados [ml]	4,5	2
	Volumen clarificado [ml]	295,5	298
	Turbidez [NTU]	60,4	1,47
FeCl <sub>3</sub> , 6ml	Volumen flóculos sedimentados [ml]	-	-
	Volumen clarificado [ml]	-	-
	Turbidez [NTU]	71,7	11,3
		<i>Análisis pre-filtrado</i>	<i>Análisis post-filtrado</i>
	<i>Conductividad [μS/cm]</i>	869	529
	<i>PH</i>	6,29	6,85
	<i>O<sub>2</sub> %</i>	34	55

*Tabla 4 - Resultados del segundo ensayo Jar-Test, 10 de abril de 2025*

Tras el primer ensayo se procedió a analizar de nuevo la muestra Jar-Test, con la finalidad de añadir parámetros ya comentados anteriormente, pero que aún no habían sido aplicados a este tipo de agua, que son la conductividad, el pH y el oxígeno disuelto. Además, tuvo como finalidad rehacer y confirmar las medidas del primer ensayo, confirmando así las conclusiones obtenidas tras él.

En primer lugar, se volvió a comprobar el gran rendimiento que tiene el sistema en cuanto a reducción de la turbidez en este tipo de muestra, pasando de un valor de 75 NTU en la toma previa al filtrado, a uno de 0,27 en el permeado, demostrando la alta eficacia del sistema en la eliminación de partículas en suspensión y coloides. Este comportamiento confirma la idoneidad de la membrana como etapa avanzada de tratamiento de agua, contribuyendo significativamente a mejorar la calidad final del efluente.

Seguidamente, en cuanto al apartado de floculación, se realizó el proceso aplicando 6 mililitros de floculante en ambos casos, sulfato de aluminio y cloruro férrico, cuyo resultado se aprecia en la Ilustración 25. Con respecto al primero, se repitió la disminución de del volumen de flóculos sedimentados, con un descenso del 62,5 %, mostrando de nuevo la efectividad de la membrana reteniendo partículas en suspensión. Sin embargo, no se consiguieron flóculos sedimentados al emplear los 6 ml de  $\text{FeCl}_3$ , por lo que se decidió aplicar el otro volumen propuesto, 3 ml, en el próximo ensayo. Vuelve a ser destacable el descenso de la turbidez en el clarificado obtenido con ambos floculantes.

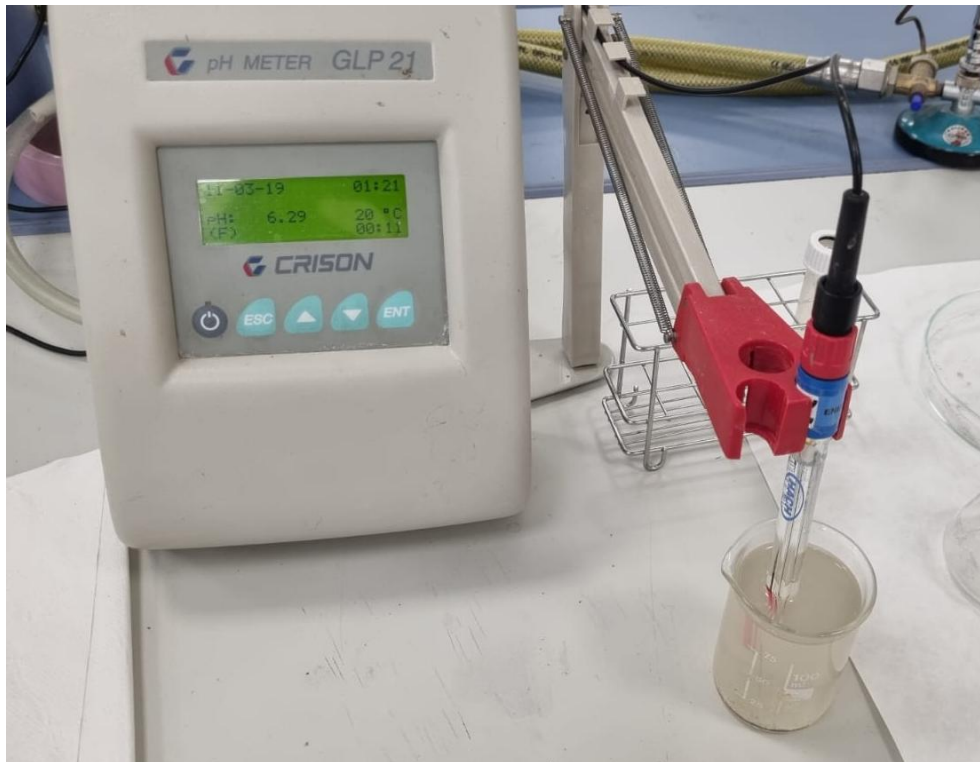


*Ilustración 25 - Imagen de los volúmenes de flóculos formados en el análisis del agua bruta y del permeado, 10 de abril de 2025, (Elaboración propia)*

Finalmente, en esta ocasión también se analizaron los parámetros vistos en las primeras prácticas, ahora en el agua Jar-Test. De nuevo se calibraron cuidadosamente los electrodos de los tres ensayos para asegurar la veracidad de los resultados obtenidos.

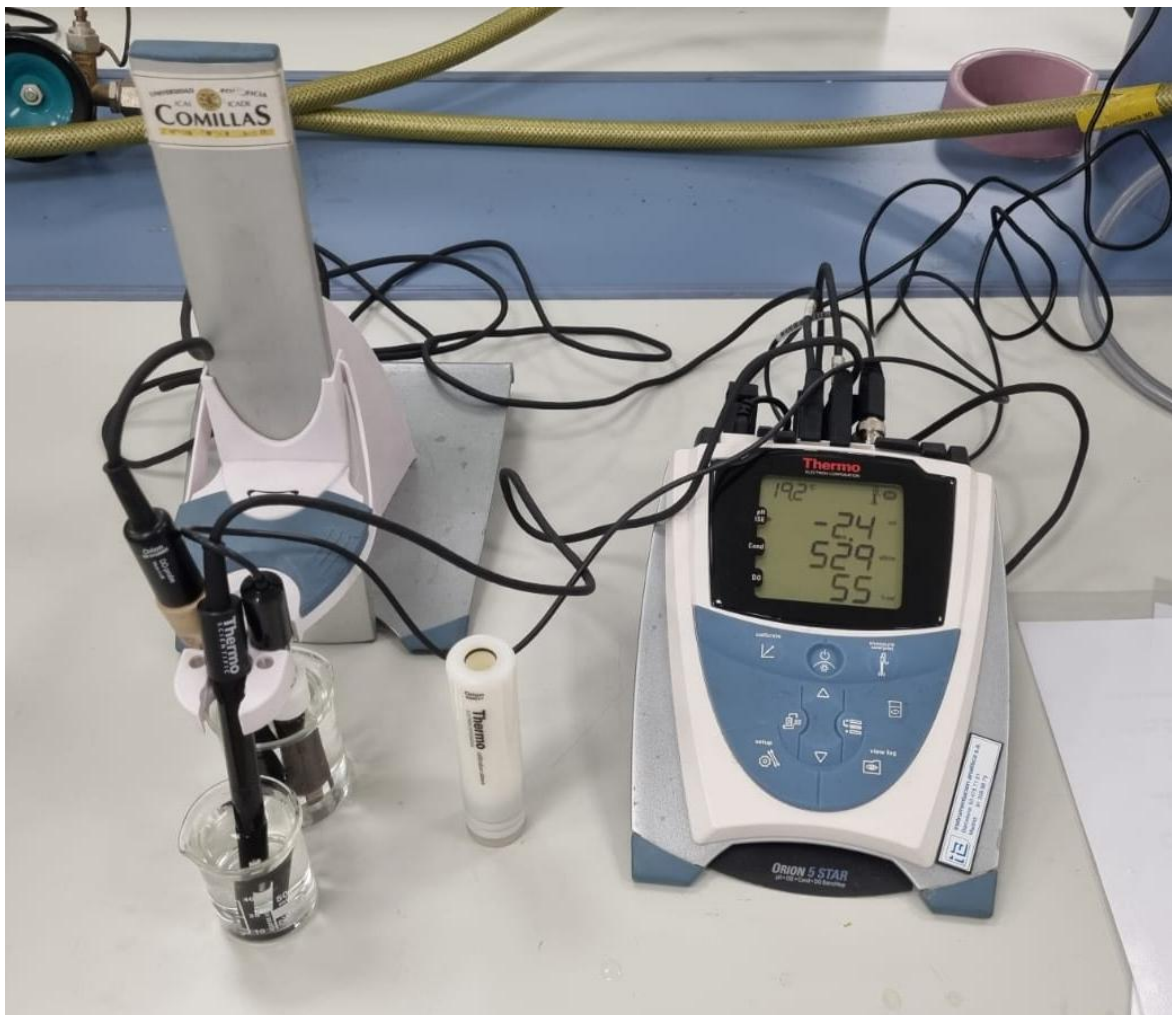
En este nuevo ensayo, el pH volvió a aumentar ligeramente. Es coherente que no tenga grandes variaciones al filtrar el agua, incluso su leve incremento al ser posible la filtración

de partículas que acidifican el agua. La Ilustración 26, que aparece a continuación, muestra la comentada medición de pH, es este caso de la toma de agua previa al filtrado.



*Ilustración 26 - Medida de pH de la muestra previa al filtrado, 10 de abril de 2025, (Elaboración propia)*

Por otro lado, la conductividad volvió a mostrar un importante descenso, de casi el 40%, mostrando esto el funcionamiento de la membrana en retención de sales disueltas. Adicionalmente, aumentó el oxígeno disuelto, indicando la retención de materia orgánica por parte del filtro, así como la aireación producida durante el proceso. La medida de estos parámetros en la muestra posterior a la filtración se aprecia en la Ilustración 27. Cabe destacar que el pH en este caso no es correcto, ya que este electrodo no se calibró al estar disponible el equipo de medición visible en la Ilustración 26.



*Ilustración 27 - Medida de conductividad y oxígeno disuelto de la muestra posterior al filtrado, 10 de abril de 2025, (Elaboración propia)*

## 5.5 ANÁLISIS FINAL CON AGUA DE CLARIFICADO DE FANGOS

<i>Análisis muestra Clarificado</i>			
		<i>Medidas previas al filtrado</i>	<i>Análisis post-filtrado</i>
	Turbidez inicial [NTU]	96,6	21,9
Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 6ml	Volumen flóculos sedimentados [ml]	72	58
	Volumen clarificado [ml]	228	262
	Turbidez [NTU]	71,8	1,47
FeCl <sub>3</sub> , 3ml	Volumen flóculos sedimentados [ml]	12	8
	Volumen clarificado [ml]	290	292
	Turbidez [NTU]	71,7	11,3
		<i>Análisis pre-filtrado</i>	<i>Análisis post-filtrado</i>
	<i>Conductividad [μS/cm]</i>	720	648
	<i>PH</i>	6,63	6,49
	<i>O<sub>2</sub> %</i>	19	60

*Tabla 5 - Resultados del ensayo final, 21 de mayo de 2025*

Este ensayo final representa un escenario exigente para el sistema de filtración, dado que el agua proveniente del clarificado de fangos empleada contiene altas concentraciones de sólidos en suspensión, materia orgánica residual y turbidez elevada. Además, simula el uso que tendría esta instalación en un contexto industrial real, pudiendo ser empleada en una planta de depuración, en la fase posterior a la separación mecánica del fluido y del fango.

En este contexto, se volvieron a aplicar los floculantes mencionados (sulfato de aluminio y cloruro férrico) y para obtener una evaluación final del rendimiento del sistema de filtración.

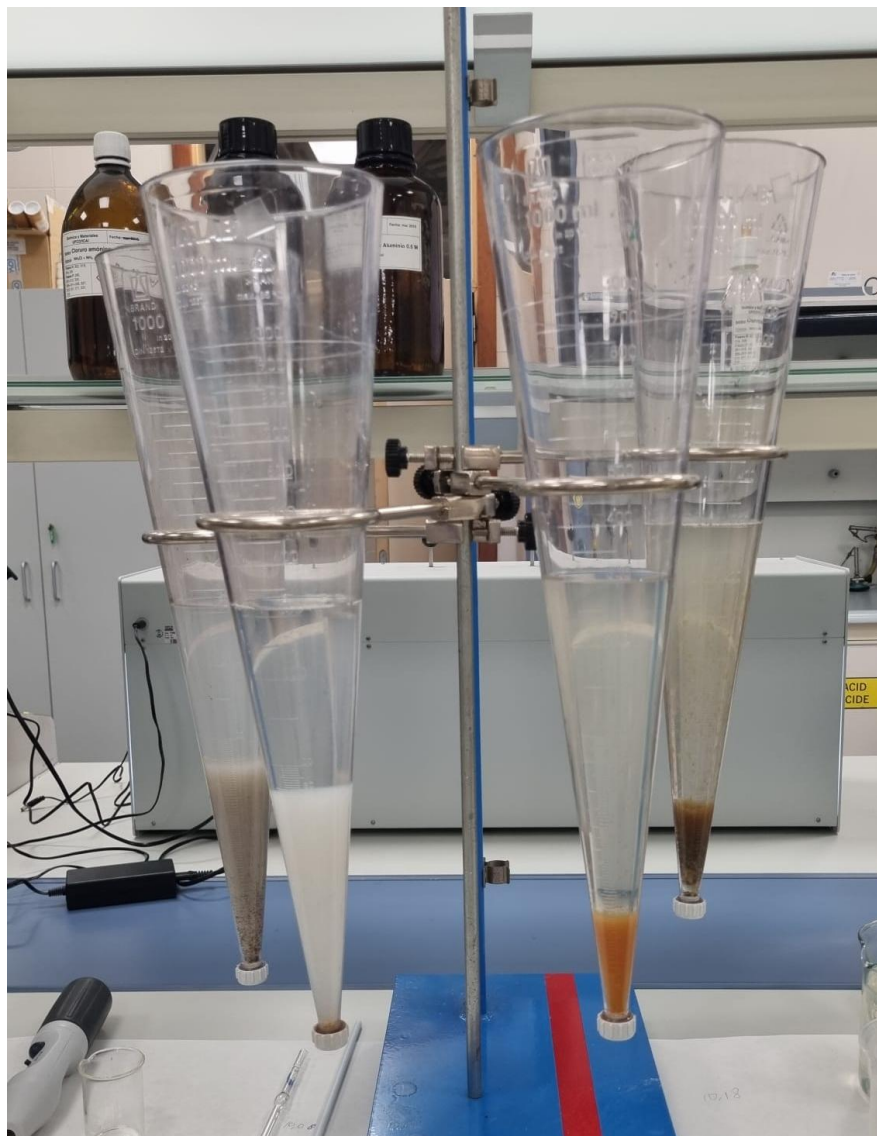
Comenzando de nuevo con la turbidez, inicialmente era de 96,6 NTU, valor muy elevado y visible directamente en la Ilustración 28, que muestra el proceso de filtrado y la diferencia de turbidez. Tras el paso por el sistema, esta descendió a 21,9 NTU, lo que representa una reducción del 77%. Aunque no alcanzó los valores tan bajos obtenidos en muestras menos cargadas, igualmente supone una mejora significativa de la calidad del efluente, que sería interesante reensayar para analizar la efectividad de un segundo paso por la membrana.



*Ilustración 28 - Proceso de filtrado muestra de clarificado, 21 de mayo de 2025, (Elaboración propia)*

Por otro lado, se repitieron los procesos de floculación explicados previamente (Ilustración 29). En el caso del sulfato de aluminio, continuando con un volumen de 6 ml, mostró de nuevo una turbidez del clarificado de 1,47 NTU, en contraposición con la inicial, de 71,8 NTU, y un volumen de floculos sedimentados de 72 ml en el agua bruta y 52 ml en el

permeado, lo que indicó una excelente eficiencia del coagulante. Por otro lado, el cloruro férrico, utilizando 3 ml tras la conclusión de la anterior práctica, obtuvo una turbidez de 11,3 NTU, representando un descenso considerable desde 71,7 NTU, pero siendo a la vez un valor mucho más alto que el conseguido con sulfato de aluminio. Además, el volumen de flóculos conseguido fue mucho menor en el caso del cloruro férrico, por lo que se concluyó que el floculante idóneo a utilizar es el sulfato de aluminio, utilizando 6 mililitros.



*Ilustración 29 - Imagen de los volúmenes de flóculos formados en el análisis del agua bruta y del permeado, 21 de mayo de 2025, (Elaboración propia)*

Finalmente, se analizaron los parámetros relativos a la calidad del agua mencionados, mostrando esta medición en la Ilustración 30. La conductividad disminuyó de nuevo de 720  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 648  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , confirmando de nuevo las conclusiones ya mencionadas de retención de sales y partículas iónicas, aunque en proporción ligeramente menor en esta ocasión.

Por otro lado, el pH descendió de 6,63 a 6,49, una variación leve que difiere con los aumentos moderados registrados anteriormente, debido seguramente a la naturaleza de elevada contaminación de esta muestra. Como se ha mencionado, es normal que el pH se mantenga en el proceso de filtración, por los que ligeros aumentos y disminuciones están dentro de lo esperado.

Finalmente, el oxígeno disuelto, que aumentó considerablemente de 19% a 60% de saturación. Esta mejora, más significativa en este caso, está relacionada, como ya se ha explicado, con la aireación durante el ensayo de filtración, la mejora de la claridad del agua, que favorece la transferencia gaseosa y la eliminación de compuestos orgánicos que consumían oxígeno, mucho mayor en este ensayo, lo que explica un mayor incremento del oxígeno disuelto, que es un indicador muy positivo, ya que el oxígeno disuelto es clave para la calidad ecológica del agua y su posible reutilización.



*Ilustración 30 - Medida de conductividad, pH y oxígeno disuelto de la muestra posterior al filtrado, 21 de mayo de 2025, (Elaboración propia)*

## **Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

### ***6.1 CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO***

El conjunto de ensayos realizados ha permitido demostrar la eficacia y limitaciones de la instalación de filtración por membrana bajo diferentes condiciones de operación y con muestras de distinta complejidad. En términos generales, los resultados han confirmado que el sistema es capaz de reducir de manera significativa parámetros clave como la turbidez, la conductividad y la presencia de partículas en suspensión, logrando un agua de calidad muy superior a la de entrada. No obstante, también se han identificado ciertas variaciones y anomalías, atribuibles tanto a la calibración de los equipos como a fenómenos propios de la naturaleza del agua tratada, lo cual ha servido para ajustar el procedimiento experimental y afinar las conclusiones.

En los primeros ensayos con aguas de captación, se observó que el sistema presentaba una capacidad notable para mejorar de forma sustancial la calidad del agua. En términos de turbidez, los valores iniciales, comprendidos entre 70 y 75 NTU, se redujeron de manera drástica hasta situarse por debajo de 1 NTU en el permeado, alcanzando así parámetros característicos de un agua prácticamente clarificada. Este comportamiento confirma la capacidad del sistema para retener eficazmente partículas en suspensión y coloidales. Paralelamente, se registraron descensos significativos en la conductividad eléctrica, lo que evidencia la retención parcial de sales disueltas y partículas con carga iónica, un aspecto especialmente relevante en el marco de tratamientos destinados a mejorar la salubridad del agua. De igual modo, la concentración de sales inorgánicas como cloruros, nitratos y sulfatos disminuyó de forma notable, especialmente una vez corregidos los errores iniciales de calibración de los electrodos y mejorado el procedimiento de análisis. Estos descensos reflejan la eficacia de la membrana no solo frente a partículas de mayor tamaño, sino también frente a compuestos iónicos presentes en las muestras.

Por otro lado, cuando se procedió a ensayar la muestra Jar-Test, los resultados fueron igualmente satisfactorios. En este caso, la filtración posterior a la coagulación permitió alcanzar niveles de turbidez aún más bajos, llegando a conseguir 0,27 NTU, con reducciones cercanas al 99% respecto a los valores iniciales. Esto demuestra la gran sinergia entre la aplicación de coagulantes y la filtración por membrana, ya que la formación y posterior retención de flóculos optimiza la eliminación de materia en suspensión y favorece la clarificación del agua. En paralelo, se constató de nuevo la disminución en conductividad y sales, así como un ligero incremento del oxígeno disuelto, atribuible a la aireación generada en el proceso y a la reducción de la carga orgánica.

Prestando especial atención al ensayo final, que se realizó con agua procedente del clarificado de fangos para representar un escenario de máxima exigencia gracias a su elevada carga de sólidos, materia orgánica residual y turbidez inicial. Este caso constituye la prueba más cercana a la aplicación industrial real en una estación depuradora, donde el sistema estaría destinado a actuar como etapa avanzada tras la separación mecánica de fangos. Los resultados obtenidos son muy significativos: la turbidez inicial de 96,6 NTU descendió hasta 21,9 NTU, lo que representa una reducción del 77%. Esta reducción es visible en la Ilustración 31, que muestra el resultado del permeado de este ensayo final. Aunque este valor no alcanza los excelentes datos de los ensayos previos con aguas menos cargadas, evidencia una mejora muy sustancial en la calidad del permeado, apuntando al gran funcionamiento del sistema. Además, se sugiere que un segundo paso por membrana podría incrementar aún más la eficacia, aspecto que abre una línea clara de optimización futura.



*Ilustración 31 - Imagen del ensayo final, comparando el permeado (izquierda) y la muestra sin filtrar (derecha), (Elaboración propia)*

En cuanto a la coagulación-floculación Jar-Test, se confirmó la idoneidad del sulfato de aluminio frente al cloruro férrico. Con 6 ml de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  se logró reducir la turbidez de 71,8 NTU a apenas 1,47 NTU en el clarificado, acompañado de la obtención de un volumen apreciable de flóculos sedimentados, lo que ratifica su idoneidad como coagulante en este tipo de sistemas. En contraste, el cloruro férrico, incluso optimizando la dosis a 3 ml, alcanzó reducciones menos notables, con valores finales de turbidez superiores y menor formación de flóculos.

Por otro lado, los parámetros fisicoquímicos también respaldan la eficacia del sistema. La conductividad descendió de 720  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 648  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , confirmando la retención parcial de sales y partículas iónicas. El pH, en este caso, mostró una leve disminución de 6,63 a 6,49, dentro del rango de variaciones esperadas. Finalmente, el oxígeno disuelto experimentó un aumento muy relevante, pasando del 19% al 60% de saturación, lo que refleja no solo la aireación inducida por el proceso de filtración, sino también la eliminación de materia

orgánica que consumía oxígeno. Este incremento constituye un indicador positivo de la calidad ecológica del agua y de su potencial reutilización.

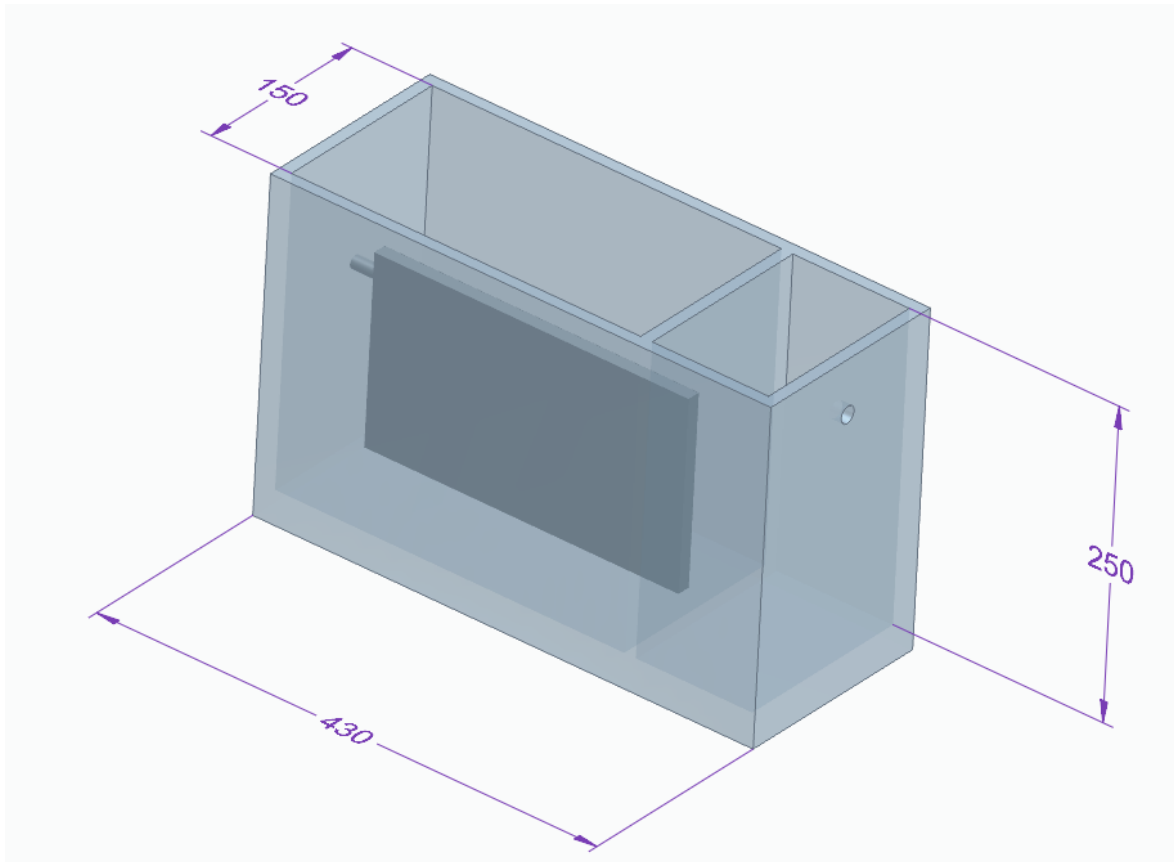
En conjunto, los ensayos permitieron concluir que el sistema de filtración de estudio en este proyecto constituye una alternativa sólida y eficiente como tratamiento avanzado tanto en escenarios de potabilización como en depuración. Su capacidad de reducción de turbidez hasta valores inferiores a 1 NTU en aguas tratadas con coagulantes, así como su desempeño en aguas con altas cargas contaminantes, lo convierten en una herramienta útil en procesos avanzados de tratamiento. Si bien los resultados sugieren margen de mejora, que se abordará en el siguiente punto mediante una propuesta de diseño optimizado, la evidencia obtenida en el ensayo final avala su viabilidad real para aplicaciones industriales y medioambientales.

## **6.2 DISEÑO Y PROPUESTA DE MEJORA DE LA INSTALACIÓN**

Como se ha comentado anteriormente en esta memoria, durante los procesos de ensayo se detectaron diversos problemas operativos, algunos de ellos tanto en relación con la propia instalación como con el procedimiento necesario para utilizarla, incluyendo limpieza o velocidad de operación. Las cuestiones que resolver son las siguientes:

- Añadir un sistema de desagüe eficaz que permita el vaciado completo del compartimento de agua. Esto facilitará la limpieza de la instalación, evitando así tiempos de operación añadidos o posible contaminación cruzada tanto del permeado como del material del laboratorio.
- Resolver el poco caudal de filtrado obtenido al usar muestras de agua con alto nivel de contaminación y sólidos en suspensión, que obstruyen parcialmente la membrana. Esto, al mismo tiempo, aumentaría la velocidad de los ensayos, especialmente con este tipo de aguas.
- Derivado del anterior, resolver el problema visible en los tubos de comunicación que, con la presión de la bomba y el poco caudal de filtrado, se producía vacío y se dificultaba en gran medida el flujo del permeado.
- Permitir una segunda etapa de filtración, aumentando así la calidad del permeado para poder destinarlo a más aplicaciones.
- Resolver la reducción de presión que aparece cuando el nivel del agua a filtrar desciende por debajo de la altura de la membrana, lo que limita el funcionamiento por succión e interrumpe el proceso de filtración.

Para desarrollar un nuevo diseño que aborde estas cuestiones, se ha partido del actual, modelándolo en el programa Solid Edge, para ampliarlo, mejorarlo y aplicarle las soluciones necesarias. La Ilustración 32 muestra el modelado del prototipo actual, en el que se aprecian los compartimentos del agua bruta y el permeado, la membrana de filtración y las aberturas necesarias para conectar los conductos de la bomba.



*Ilustración 32 - Modelado de la instalación de filtración original, cotas en milímetros. (Elaboración propia)*

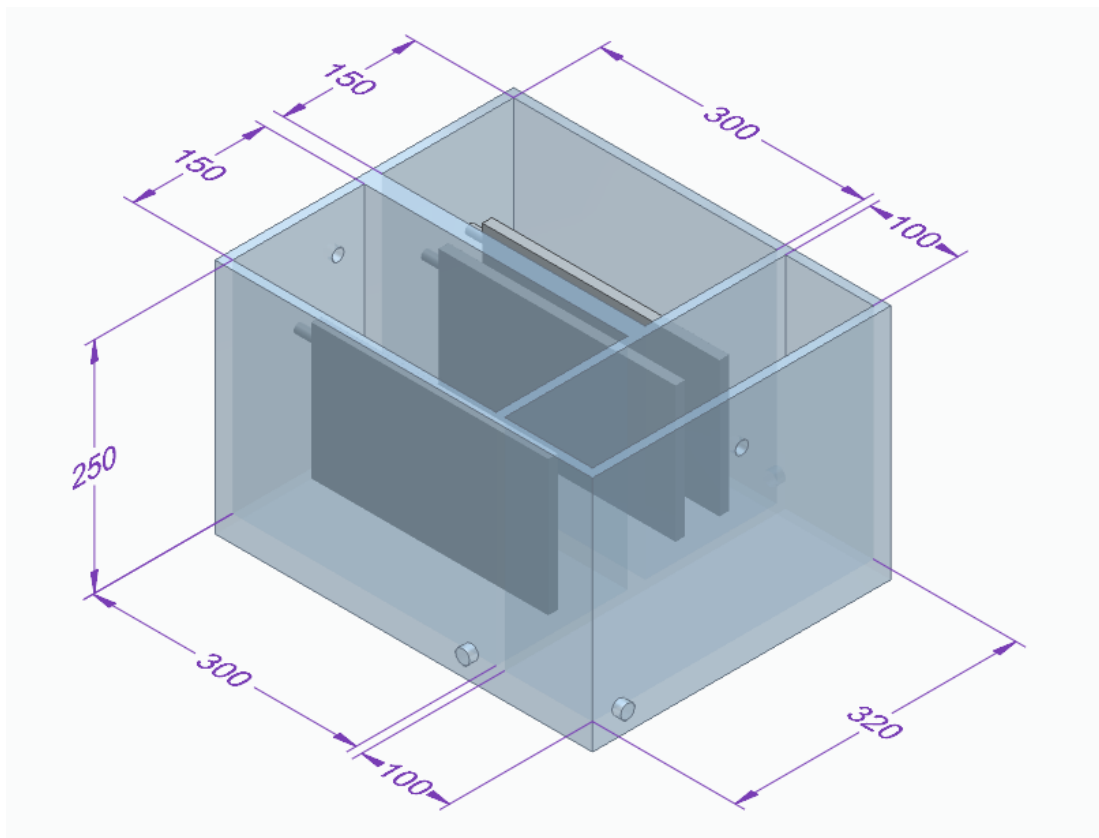
Partiendo de este diseño inicial, se han realizado las siguientes modificaciones para optimizar al máximo tanto la capacidad del sistema de filtrado como el proceso a seguir durante los ensayos.

En primer lugar, se ha añadido un nuevo compartimento, igual que el original, de 11,25 litros (150 x 300 x 250 mm), en el que se han incluido dos nuevas membranas, contando con tres en total. Esto permitirá realizar una doble filtración, especialmente necesaria en muestras con alta carga contaminante. El proceso consistirá en colocar inicialmente el agua bruta en este nuevo espacio con dos membranas, con sus salidas conectadas entre sí, y de ahí a la misma bomba. Esto duplicará el caudal de salida del primer filtrado, ya que se añadirá otra bomba peristáltica que ejerza suficiente presión de succión para filtrar de forma efectiva con las dos membranas. De este modo, aumentará la velocidad del proceso, especialmente baja

cuando se tratan muestras con cantidad elevada de sólidos en suspensión, y será más complicado que se obstruya el conducto de conexión entre las membranas y la bomba, al contar con el doble de caudal en circulación.

El permeado de este primer filtrado irá a un segundo compartimento, con una única membrana y conectado a la bomba original, idéntico al actual sistema. En él que comenzaría una segunda filtración, si fuera necesaria, siguiendo el esquema ya trabajado, y vertiendo el permeado final en el tercer y último compartimento, de volumen doble al original destinado al agua filtrada. En caso de no considerarse necesaria esta segunda filtración, se recogerá directamente el permeado de la primera etapa en el descrito segundo compartimento.

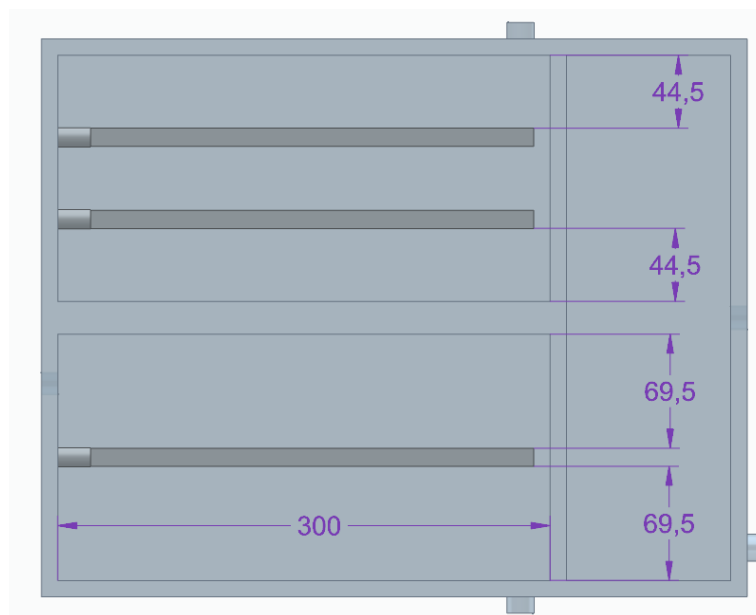
La ilustración 33 muestra el nuevo sistema descrito:



*Ilustración 33 - Modelado de la instalación de filtración mejorada, cotas en milímetros. (Elaboración propia)*

Adicionalmente, se han añadido tapones en la zona inferior de los tres compartimentos del diseño mejorado, con la finalidad tanto de extraer de forma efectiva los permeados y los volúmenes de agua sobrantes tras los ensayos, así como de facilitar y optimizar el proceso de limpieza de la instalación tanto antes como después de su utilización.

Finalmente, se añadirán al conjunto de la instalación bloques de acero, con el fin de introducirlos en los compartimentos en caso de ser necesario aumentar el nivel del agua para conseguir cubrir totalmente la membrana y facilitar así el flujo por la misma. Se contará con dos medidas distintas para cada uno de los dos compartimentos. Para el primero, en el que se encontrarán las dos membranas, se necesitarán dos bloques de 200 mm de alto, 200 mm de largo y 35 - 40 mm de ancho. En el caso del segundo, que contará con una única membrana, requerirá de dos bloques de 200 mm de alto, 200 mm de largo y 50 - 55 mm de ancho. La Ilustración 34 muestra la vista en planta de la nueva instalación, así como el espacio donde se introducirán estos bloques, que se añadirán durante los ensayos en función de la necesidad, siendo especialmente necesarios los del segundo compartimento, en el que se irá vertiendo el primer permeado y será muy conveniente aumentar la altura del mismo para poner en marcha cuanto antes la segunda fase de filtrado.



*Ilustración 34 - Modelado de la instalación en planta, cotas en milímetros. (Elaboración propia)*

En definitiva, el nuevo diseño propuesto, formado por la estructura de metacrilato con tres cavidades independientes, integrando tres membranas de filtración, dos en paralelo con una tercera en serie, y operado mediante dos bombas peristálticas, supone una mejora significativa respecto al sistema inicial.

Esta configuración permitirá incrementar notablemente la eficiencia del proceso, especialmente en ensayos con muestras de alta carga contaminante, al mejorar el caudal de filtración y aumentar la velocidad de ejecución. Además, el diseño contempla una segunda etapa de filtrado, lo que contribuirá a obtener un permeado de mayor calidad, ampliando así sus posibles aplicaciones. Por último, la incorporación de un sistema de drenaje eficiente y una mayor accesibilidad estructural facilitará las labores de limpieza, montaje y operación, optimizando los tiempos de trabajo y reduciendo el riesgo de contaminación cruzada. Este rediseño, por tanto, resuelve de forma integral las limitaciones observadas durante los ensayos y sienta las bases para una futura implementación de esta nueva instalación en los siguientes proyectos de investigación, con perspectivas de analizar completamente su funcionamiento para la implementación de las membranas de la compañía Cembrane en sistemas a mayor escala y de aplicaciones industriales.

## Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ONU-Habitat, «Comprender las dimensiones del problema del agua.,» 22 Marzo 2021, <https://onu-habitat.org/index.php/comprender-las-dimensiones-delproblema-del-agua>.
- [2] Confederación Hidrográfica del Segura, «SITUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ESPAÑA: EFECTOS,» *Ministerio de Medio Ambiente*, <https://www.chsegura.es/es/cuenca/planificacion/plan-hidrologico-nacional/evaluacion-ambiental-estrategica/>.
- [3] Gobierno de España, «ESCORRENTÍA TOTAL ANUAL PERIODO 1980/81 – 2005/06,» *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*, [https://sig.mapama.gob.es/Docs/PDFServicios/RECHID\\_EscTotal\\_1980\\_2005.pdf](https://sig.mapama.gob.es/Docs/PDFServicios/RECHID_EscTotal_1980_2005.pdf).
- [4] Cedex, «Inventario de recursos hídricos de España,» 2020, <https://www.cedex.es/centros-laboratorios/centro-de-estudios-hidrograficos-ceh/proyectos/inventario-de-recursos-hidricos>.
- [5] A. Tudela y A. Delgado, «Acuíferos al límite: España daña gravemente sus reservas subterráneas de agua,» *Datista- Medioambiente*, 9 Octubre 2022, <https://especiales.datadista.com/medioambiente/acuiferos-sobrexplotados-contaminados-espana/>.
- [6] A. Iglesias, T. Estrela y F. Gallart, «IMPACTOS SOBRE LOS RECURSOS,» *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*, <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio->

- climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/07\_recursos\_hidricos\_2\_tcm30-178498.pdf.
- [7] O. d. I. N. Unidas, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 25 Septiembre 2015, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- [8] IBEROSPEC Environmental Technologies, «Membranas cerámicas de ultrafiltración Cembrane para el tratamiento de agua potable y agua residua,» 10 Marzo 2022, <https://iberospec.com/noticias/membranas-ceramicas-de-ultrafiltracion-cembrane-para-el-tratamiento-de-agua-potable-y-agua-residual/>.
- [9] Tecnica de Fluidos, «BOMBAS PERISTÁLTICAS COMPACTAS HF-LABS1/HF-LABS3 DE HYGIAFLEX,» <https://www.tecnicafluidos.es/bombas-peristalticas-compactas-hf-labs1hf-labs3-de-hygiaflex-p-350-es>.
- [10] Cembrane, «DATASHEET Product: SiCPM-6860-All-In-One Reinforced module,» Junio 2021, <https://cembraneiran.com/wp-content/uploads/2023/07/SiCPM-6860-Datasheet.pdf>.
- [11] Cembrane, «Technical Brochure – SiCBlox™ FX Cembrane a/s,» Noviembre 2023, [https://cembrane.com/wp-content/uploads/2023/11/Technicalbrochure\\_SiCBloxFX1.9.pdf](https://cembrane.com/wp-content/uploads/2023/11/Technicalbrochure_SiCBloxFX1.9.pdf).
- [12] Cembrane, «Clean Water For Life,» <https://cembrane.com/>.
- [13] PitchBook, «Cembrane Overview,» <https://pitchbook.com/profiles/company/413721-82#overview>.
- [14] Datanyze, «Cembrane Profile and History,» <https://www.datanyze.com/companies/cembrane/372031966>.

- [15] Fortune Business Insights, «Membranes Market Size, Share & Industry Analysis, By Material,» *Water & Sludge Treatment*, 28 Julio 2025, <https://www.fortunebusinessinsights.com/membranes-market-102982>.
- [16] Laboratorios Omega, «¿Qué es el agua regenerada y qué usos tiene?,» <https://www.laboratoriosomega.es/que-es-el-agua-regenerada/>.
- [17] C. Alonso, «La 'guerra del agua' en la España de la sequía: el 80% se destina a la agricultura con más del 40% de los recursos hídricos en tensión,» *El Mundo*, 16 marzo 2024, <https://www.elmundo.es/economia/2024/03/16/65f499afe4d4d806168b4581.html>.
- [18] D. Nuevo, «Filtros verdes para aguas residuales,» *TECPA*, 7 marzo 2022, <https://www.tecpa.es/filtro-verde-depuracion-aguas-residuales/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20un%20filtro%20verde,%2C%20f%C3%B3sforo%2C%20y%20microorganismos%20pat%C3%B3genos..>
- [19] MITA Water Technologies, «Filtración terciaria de aguas residuales,» <https://www.mitawatertechnologies.com/es/tecnologias/filtracion-terciaria-de-aguas-residuales/>.
- [20] Diputación de Badajoz, «Conoce una Estación de tratamiento de agua potable (ETAP),» *PROMEDIO*, <https://promedio.dip-badajoz.es/documentos/154303.pdf>.
- [21] M. Rodríguez, «Aguas regeneradas en España: claves del Real Decreto 1085/2024,» *Nilsson*, 22 mayo 2025, [https://nilssonlaboratorios.com/aguas-regeneradas-en-espana-claves-del-real-decreto-1085-2024?utm\\_source=chatgpt.com](https://nilssonlaboratorios.com/aguas-regeneradas-en-espana-claves-del-real-decreto-1085-2024?utm_source=chatgpt.com).
- [22] «Real Decreto 1085/2024,» *Boletín Oficial del Estado*, 22 octubre 2024, <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2024-21701>.

- [23] Universitat Politècnica de Catalunya, «Kit Químico,» <https://upc-shop.com/es/producte/kit-quimico-bata-blanca-guantes-quimicos-gafas/>.
- [24] Universidad Pontificia de Comillas - ICAI, «Prácticas de Laboratorio,» *Ingeniería Medioambiental*, Enero 2025.

## ANEXO I: TABLAS DE REQUERIMIENTOS DEL AGUA REGENERADA

Tabla I-1. Valor máximo admisible para uso urbano

Clase de calidad/Uso urbano	<i>E. coli</i> (UFC/100 mL)	Turbidez (UNT)	SS (mg/L)	Nematodos intestinales (huevo/10L)	Bacteriófagos (UFP/100mL)	<i>Legionella</i> spp. (UFC/L)	Contaminantes
Calidad U. A+. – Riego de jardines privados. – Descarga de aparatos sanitarios.	Ausencia	5	10	1	100 cuando existe riesgo de aerosolización	Ver observaciones	Ver observaciones
Calidad U. A. – Estanques y caudales circulantes ornamentales accesibles al público.	10	5	10	1	100 cuando existe riesgo de aerosolización	Ver observaciones	Ver observaciones
Calidad U. B. – Baldeo de calles. – Riego de zonas verdes urbanas (parques y similares). – Sistemas contra incendios. – Lavado industrial de vehículos.	100	–	Conforme DARU	–	–	Ver observaciones	Ver observaciones
Calidad U. C. – Estanques y caudales circulantes ornamentales no accesibles al público.	1.000	–	Conforme DARU	–	–	–	Ver observaciones

Tabla I-2. Clases de calidad de las aguas regeneradas para uso agrícola y método de riego permitido

Clase de calidad mínima de las aguas regeneradas	Método de riego	Categoría de cultivo
Calidad A. A.	Todos los métodos de riego.	– Cultivos de alimentos que se consumen crudos en los que la parte comestible está en contacto directo con las aguas regeneradas. – Cultivos de tubérculos que se consumen crudos.
Calidad A. B.	Todos los métodos de riego.	– Cultivos de alimentos que se consumen crudos cuando la parte comestible se produce por encima del nivel del suelo y no está en contacto directo con las aguas regeneradas. – Cultivos de alimentos transformados.
Calidad A. C.	Riego por goteo u otro método de riego que evite el contacto directo con la parte comestible del cultivo.	– Cultivos no alimenticios, incluidos los cultivos utilizados para alimentar a animales productores de carne o leche. – Cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana. – Cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones.
Calidad A. D.	Todos los métodos de riego.	– Cultivos destinados a la industria no alimentaria, producción de energía y de semillas.

Tabla I-3. Valor máximo admisible para uso agrícola

Clase	<i>E. coli</i> (UFC/100 mL)	Turbidez (UNT)	SS (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Nematodos intestinales (huevo/L)	<i>Legionella</i> spp. (UFC/L)	<i>T. saginata</i> y <i>T. solium</i> (huevo/L)	Contaminantes
Calidad A. A.	10	5	10	10	1 para el riego de pastos o forraje	< 1.000 cuando existe riesgo de aerosolización	–	Ver observaciones
Calidad A. B.	100	–	Conforme DARU	Conforme DARU	1 para el riego de pastos o forraje	< 1.000 cuando existe riesgo de aerosolización	1 para pastos de animales productores de carne	Ver observaciones
Calidad A. C.	1.000	–	Conforme DARU	Conforme DARU	1 para el riego de pastos o forraje	< 1.000 cuando existe riesgo de aerosolización	1 para pastos de animales productores de carne	Ver observaciones
Calidad A. D.	10.000	–	Conforme DARU	Conforme DARU	1 para el riego de pastos o forraje	< 1.000 cuando existe riesgo de aerosolización	–	Ver observaciones

Tabla I-4.1. Valor máximo admisible para uso industrial, excepto en la empresa alimentaria

Uso industrial, excepto en la empresa alimentaria	<i>E. coli</i> (UFC/100 mL)	Turbidez (UNT)	SS (mg/L)	<i>Legionella spp.</i> (UFC/L)	Contaminantes
Calidad I. A+. – Torres de refrigeración y condensadores evaporativos en agua de aporte a la torre.	Ausencia	5	10	Ver observaciones	Ver observaciones
Calidad I. C. – Aguas de proceso: aquellas que están en contacto directo en algún momento con materias primas, materiales, productos intermedios o productos finales de un proceso industrial. – Aguas de limpieza: aguas destinadas a la limpieza de equipos, objetos, materiales, tuberías y superficies en áreas industriales, excepto en la empresa alimentaria. – Otros usos industriales.	1.000	–	Conforme DARU	Ver observaciones	Ver observaciones

b) Requisitos de calidad de las aguas regeneradas para el uso en la empresa alimentaria.

Tabla I-4.2. Valor máximo admisible para uso en la empresa alimentaria

Uso en la empresa alimentaria	<i>E. coli</i> (UFC/100 mL)	Turbidez (UNT)	SS (mg/L)	<i>Legionella spp.</i> (UFC/L)	Contaminantes
Calidad Ia. A+. Aguas de limpieza de materias primas y de superficies, materiales y objetos destinados al contacto con los alimentos.	La calidad Ia. A+ en la empresa alimentaria deberá cumplir con lo establecido en el artículo 65 del Real Decreto 3/2023.				
Calidad Ia. A. – Aguas de limpieza: las destinadas a ese fin, distintas de las utilizadas en la limpieza de las superficies, materiales y objetos que puedan estar en contacto con los alimentos, y que no supongan una fuente de contaminación para los alimentos.	10	5	10	Ver observaciones	Ver observaciones
Calidad Ia. B o Ia. C. – Aguas de proceso: las utilizadas durante el proceso de fabricación de los alimentos, con fines de refrigeración, o producción de vapor o agua caliente, en circuito cerrado, y que no entran en contacto con los alimentos.	100 ó 1.000	–	Conforme DARU	Ver observaciones	Ver observaciones

## ANEXO II: P1 - AGUAS CAPTACIÓN [24]

*Ingeniería Medioambiental*  
*Práctica I*

*ANÁLISIS AGUAS DE CAPTACIÓN*

### **1. Medida de la conductividad**

Esta medida es orientativa de la cantidad de sales disueltas que se encuentran en el agua

#### Procedimiento

- Se emplea un electrodo selectivo de conductividad
- Calibrar dicho electrodo con la disolución patrón de 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Tomar un pequeño volumen de agua problema y poner en el vaso de reactivos de 50 mL.
- Introducir el electrodo selectivo en el agua y agitar. La medida de la conductividad aparecerá directamente. Anotar el resultado numérico y las unidades.

RESULTADO:

### **2. Medida del pH**

#### Procedimiento

- Calibrar el pH-metro con las disoluciones patrón de pH 4 y pH 7
- Con el mismo agua y el mismo vaso de la conductividad, medir el pH del agua problema

RESULTADO:

### **3. Medida del Oxígeno disuelto**

#### Procedimiento

- Calibrar el electrodo con el accesorio proporcionado (humedecer la esponja del interior)
- Rellenar el frasco Winkler hasta el borde
- Introducir el electrodo en el agua y agitar. La medida de la cantidad de oxígeno disuelto aparecerá directamente. Anotar el porcentaje de saturación.

RESULTADO:

#### **4. Determinación de sales inorgánicas en el agua**

Se va a proceder a la identificación y valoración de cloruros y al análisis de las siguientes sales:  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Para ello se van a utilizar las siguientes técnicas y equipos:

##### **4.1. Identificación y valoración de cloruros:**

Primeramente se identificará la presencia de cloruros en el agua problema:

En un tubo de ensayo, poner 2 o 3 ml de agua problema y a continuación añadir unas gotas de  $\text{AgNO}_3$  (0.2M). Si existen cloruros en el agua, aparecerá un precipitado blanco de  $\text{AgCl}$ .



Indicar en el resultado la presencia o no de cloruros.

RESULTADO:

Si el ensayo es positivo se procederá a la valoración de la cantidad de cloruro presente de la siguiente forma:

Colocar en un Erlenmeyer de 100 mL:

- 25 mL de agua problema (medidos con pipeta)
- 2 gotas de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  al 1% (indicador)

Valorar añadiendo  $\text{AgNO}_3$  [0.02 M] desde la bureta, gota a gota. La reacción es la formación del  $\text{AgCl}$ . Cuando la cantidad de cloruros presente en el agua se agota, la  $\text{Ag}^+$  que añadimos comienza a reaccionar con el cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) dando lugar a un precipitado de color rojo que nos indica el final de la valoración.

Anotar el volumen de  $\text{AgNO}_3$  0,02M consumido en la valoración:



Calcular la concentración de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) presente en el agua: Expresarlo en mg/L:

RESULTADO:

**Ingeniería Medioambiental**

**Práctica I**

**ANÁLISIS AGUAS DE CAPTACIÓN**

**4.2. Medida espectrofotométrica de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$**

Mediante espectrofotocolorimetría utilizando el equipo Spectroquant NOVA 60 de MERCK

- En todas estas mediciones las cubetas deben estar limpias y secas por el exterior.
- Si es necesario, limpiarlas con un pañuelo de papel.

• **Medida de los  $\text{NO}_3^-$ :**

- Tomar 4 ml de la solución  $\text{NO}_3^-$ -1 (con la jeringa) y ponerlos en un tubo de ensayo con tapa.
- Añadir 0.5 ml de agua problema (medida con pipeta incluida en tu puesto de trabajo)
- **¡NO MEZCLAR!**
- Añadir 0.5 ml del reactivo  $\text{NO}_3^-$ -2 (con pipeta)
- **¡MEZCLAR CON CUIDADO EL TUBO SE CALIENTA!**
- Dejar en reposo 10 minutos
- Medir a 340 nm

RESULTADO:

• **Medida de los  $\text{NH}_4^+$ :**

- Tomar 5 ml de agua problema y ponerlos en un tubo de ensayo (con pipeta de tu puesto de trabajo).
- Añadir 0.6 ml del reactivo  $\text{NH}_4^-$ -1 (medida con pipeta del puesto de ensayo  $\text{NH}_4^+$ )
- **MEZCLAR**
- Añadir 1 microcuchara del reactivo  $\text{NH}_4^-$ -2
- **MEZCLAR**
- Dejar en reposo durante 5 minutos
- Añadir 4 gotas del reactivo  $\text{NH}_4^-$ -3
- **MEZCLAR**
- Dejar en reposo 5 minutos
- Medir a 690 nm

RESULTADO:

• **Medida del  $\text{PO}_4^{3-}$ :**

- Tomar 5 ml de agua problema y ponerla en un tubo de ensayo (con pipeta de tu puesto de trabajo).
- Añadir 1.2 ml del reactivo  $\text{PO}_4^-$ -1 (medida con jeringa)
- **MEZCLAR**
- Medir a 400 nm.

RESULTADO:

• **Medida del  $\text{SO}_4^{2-}$ :**

- Tomar 2 ml de agua problema y ponerla en una cubeta de reacción (con pipeta de tu puesto de trabajo).
- Añadir una dosis del reactivo  $\text{SO}_4^{2-}$ -1K con la microcuchara.
- **Agitar vigorosamente la cubeta**, firmemente cerrada, hasta que el reactivo se haya disuelto completamente.
- **Dejar en reposo 2 minutos**
- Medir a 525 nm.

RESULTADO:

## **ANEXO III: PRÁCTICA 2 – ANÁLISIS DE AGUAS RESIDUALES [24]**

### **3.2.- Sólidos Sedimentables y no Sedimentables**

La cantidad de sólidos sedimentables del agua residual nos dará una idea de la proporción de materia en suspensión que será retirada del agua en los decantadores primarios (por acción de la gravedad) y de aquella que deberá ser sometida a un proceso de coagulación-floculación, ya sea químico o biológico (tratamiento secundario).

#### **Procedimiento**

**3.2.1.** La determinación de los **sólidos sedimentables (SS<sub>s</sub>)** se puede llevar a cabo de 2 formas:

a) *Procedimiento Volumétrico*

- Poner 1L de muestra homogénea en un cono Imhoff
- Dejar que decante durante 45 minutos
- Pasar la varilla de vidrio por las paredes y dejar otros 15 minutos
- Medir el volumen ocupado por los sólidos decantados (SEDIMENTABLES) en ml/L

#### 4. Ensayo Jar-test de Coagulación-Floculación

Este ensayo se lleva a cabo para evaluar el mejor tratamiento del agua para reducir su contenido en sólidos en suspensión, materias coloidales y otras materias no sedimentables, mediante coagulación y posterior decantación por gravedad. Para comparar qué reactivos químicos o que concentración de los mismos consiguen reducir más los sólidos en suspensión del agua, se realiza una medida de la turbidez del agua antes y después de la adición de dichos reactivos.

##### Procedimiento

1. Se mide la **turbidez inicial** del agua problema
2. Se preparan 4 disoluciones en vasos de precipitados de 600 mL altos, según la tabla siguiente:

Para poner el volumen exacto de disolución de  $\text{Cl}_3\text{Fe}$  y  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  emplear una pipeta de 5 mL y 10 mL graduada.

Disolución	Añadir		
1	300 ml Agua Problema Jar-test (medida con probeta)	10 gotas Tampón $\text{NH}^+/\text{NH}_3$	6,0 ml $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ [0,5 M]
2			12,0 ml $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ [0,5 M]
3			3,0 ml $\text{Cl}_3\text{Fe}$ [0,05 M]
4			6,0 ml $\text{Cl}_3\text{Fe}$ [0,05 M]
Tiempo transcurrido hasta tomar la medida (minutos)			

3. Colocar cada uno de los vasos en el equipo de agitación. Agitar cada uno de los vasos rápidamente a 300 r.p.m durante 20 segundos. Se observa la **FORMACIÓN DE MICROFLÓCULOS**. Agitar lentamente a 30 r.p.m durante 2 minutos. Se observa el **CRECIMIENTO DE LOS FLÓCULOS**.
4. Trasvasar el contenido de cada vaso a un cono Inhoff de 1000 mL. Dejar en reposo durante 15 minutos aproximadamente.
5. **Medir la turbidez** de cada disolución tomando con una pipeta de plástico el sobrenadante de la parte superior de las probetas, colocado en una cubeta de turbidez. Llenar la cubeta hasta las  $\frac{3}{4}$  partes aproximadamente. Limpiar bien la cubeta por fuera antes de introducirla en el turbidímetro. **El Turbidímetro debe estar correctamente calibrado (realizado por el profesor)**.
6. **Anotar el volumen** que ocupan los flóculos sedimentados y el volumen del agua clarificada, así como el tiempo transcurrido desde que la muestra se puso en reposo (de manera aproximada).