



**Centro Universitario de la Defensa  
en la Escuela Naval Militar**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*Estudio experimental de una planta piloto de depuración de  
aguas basada en adsorción para el tratamiento de aguas en buques  
de la Armada*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Jaime Montero Fernández

**DIRECTORES:** D. Santiago Urréjola Mandriñán  
Dña. Susana Gouveia

**CURSO ACADÉMICO:** 2022-2023

**Universida<sub>de</sub>Vigo**



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio experimental de una planta piloto de depuración de  
aguas basada en adsorción para el tratamiento de aguas en buques  
de la Armada*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>d</sub>eVigo

---

## **RESUMEN**

El cumplimiento de la normativa medioambiental en sus diferentes vertientes, convenio MARPOL, normativa del MINISDEF y normativa de Armada, nos obliga a un exhaustivo tratamiento de las aguas residuales previo a su devolución al medio marino.

La adsorción es un proceso en el que se retiene una especie química en la superficie de un material sólido o de un líquido llamado adsorbente. Esta retención se produce debido a las fuerzas de atracción intermoleculares entre las moléculas del adsorbato y las del adsorbente. La adsorción es ampliamente utilizada en aplicaciones industriales como la eliminación de contaminantes y la separación de mezclas.

El objetivo de este TFG es construir una planta experimental con la que probar el método de adsorción mencionado para el tratamiento de disoluciones contaminadas. El desarrollo del experimento se realizará con adsorbentes de bajo costo y de fácil adquisición. Una vez garantizado el funcionamiento de la planta y la bondad del proceso, se tratará de extrapolar los resultados de cara a la implementación en el tratamiento de aguas residuales en buques de la Armada.

Se analizarán las plantas de tratamiento presentes en buques en la actualidad y se propondrá la mejor forma para integrar la planta desarrollada en un proceso real

## **PALABRAS CLAVE**

Aguas residuales, tratamiento, adsorción, contaminante, cinética de adsorción



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quisiera agradecer a mi tutor Santiago Urréjola su disponibilidad y ayuda a lo largo del desarrollo de este trabajo. Quiero destacar mi agradecimiento a todas las personas con que he compartido tantas horas de laboratorio. Con vuestra compañía todas las largas tardes de trabajo se hacían mucho más amenas e incluso divertidas creando un ambiente de trabajo inmejorable. Así como también quiero agradecer la información recibida por personal de Detegasa.

Por supuesto, también agradezco a mi novia y a mis amigos estar siempre a mi lado, tanto en los buenos como en los malos momentos.

Por último, le doy la gracias a mis padres, puesto que, de no ser por ellos, no habría llegado hasta donde estoy. De todo corazón muchas gracias.

## CONTENIDO

Contenido .....	2
Índice de Figuras .....	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos .....	8
1.1 Justificación de la necesidad .....	8
1.1.1 Convenio MARPOL .....	8
1.1.2 Normativa del Ministerio de Defensa .....	10
1.1.3 Normativa de Armada.....	10
1.2 Antecedentes .....	11
1.3 Objetivo.....	11
1.4 Tipos de aguas residuales en un buque de la Armada.....	12
1.5 Tipos de contaminantes de las aguas residuales .....	15
1.5.1 Contaminantes más comunes en aguas residuales en buques de la Armada .....	17
2 Estado del arte .....	18
2.1 Tipos de tratamientos de aguas residuales .....	18
2.2 Métodos de tratamiento de aguas residuales. Aplicación en buques .....	19
2.2.1 Plantas Biológicas.....	19
2.2.2 Plantas Físico - Químicas .....	21
2.2.3 Comparativa entre medios aplicados en buques y planta piloto. Pros y contras .....	22
2.3 Tratamientos de aguas residuales en buques de la Armada .....	23
2.3.1 Fragatas F100.....	23
2.3.2 LHD J;Carlos I.....	24
2.3.3 BAM .....	25
2.3.4 Fragatas F110.....	25
2.3.5 Comparativa entre las plantas existentes en los buques de la Armada y la planta propuesta en el trabajo .....	26
2.4 Proceso de adsorción.....	27
2.4.1 Cinética de adsorción.....	29
2.4.2 Isoterma de adsorción .....	32
2.5 Tipos de adsorbentes .....	33
3 Desarrollo del TFG.....	36
3.1 Metodología .....	36
3.1.1 Flujo de trabajo .....	36
3.1.2 Propuesta de diseño del proceso / planta .....	38

3.1.3 Materiales utilizados en el diseño de la planta .....	39
3.1.4 Materiales utilizados en la realización del experimento.....	40
3.1.5 Contaminante y Material adsorbente a utilizar .....	41
3.1.6 Descripción del proceso.....	44
4 Resultados .....	66
4.1 Resultados de las pruebas de funcionamiento.....	66
4.1.1 Espirulina.....	66
4.1.2 Carbón Activado .....	68
4.1.3 Análisis y comparativa de resultados .....	70
4.1.4 Proceso, análisis y diagnóstico de la realización de los experimentos. ....	73
5 Conclusiones y líneas futuras .....	75
5.1 Conclusiones de los resultados obtenidos en base a los objetivos propuestos.....	75
5.2 Propuesta de aplicación en planta TAR de buques de la Armada. ....	76
5.3 Líneas futuras de trabajo. ....	77
6 Bibliografía.....	79
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas y/o Ambientales .....	84
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales .....	88
Anexo III: Datos experimentales espectrofotómetro .....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Planta TAR biológica (Fuente Detegasa) .....	19
Figura 2-2 Planta TAR físico - química (Fuente Detegasa) .....	22
Figura 2-3 Proceso de adsorción .....	28
Figura 2-4 Cinética de adsorción I .....	29
Figura 2-5 Cinética de adsorción II .....	30
Figura 2-6 Cinética de adsorción III .....	30
Figura 2-7 Cinética de adsorción IV .....	31
Figura 2-8 Cinética de adsorción V .....	31
Figura 2-9 Cinética de adsorción VI .....	31
Figura 3-1 Flujo de trabajo .....	37
Figura 3-2 Diseño de la planta .....	38
Figura 3-3 Resultado del montaje de la planta .....	40
Figura 3-4 Negro de eriocromo T .....	41
Figura 3-5 Longitud de onda .....	45
Figura 3-6 Absorbancia de muestras .....	46
Figura 3-7 Recta de calibración para contaminante "negro de eriocromo T" .....	47
Figura 3-8 Esferas de inmovilizado de espirulina .....	48
Figura 3-9 Alturas previstas para experimento con planta piloto .....	48
Figura 3-10 Gráfica resultados espirulina para $H_1 = 8$ cm. Experimento n°1 .....	51
Figura 3-11 Gráfica resultados espirulina $H = 8$ cm. (Repetición experimento) .....	52
Figura 3-12 Datos absorbancia descartando valores fuera de desv. est. para espirulina y $H = 8$ cm. (Repetición experimento) .....	53
Figura 3-13 Gráfica de variación de concentración descartando valores fuera de desv. est. espirulina $H = 8$ cm. (Repetición experimento) .....	54
Figura 3-14 Torre espirulina para $H = 16$ cm. ....	54
Figura 3-15 Gráfica resultados muestras espirulina y $H = 16$ cm. ....	55
Figura 3-16 Gráfica resultado absorbancia datos descartando valores fuera de desv. est. espirulina y $H = 16$ cm. ....	56
Figura 3-17 Variación de concentración espirulina y $H = 16$ cm .....	57
Figura 3-18 Vaso de precipitados con espirulina y disolución contaminada .....	57
Figura 3-19 Obtención de la disolución clarificada tras el paso por el filtro. Espirulina .....	58
Figura 3-20 Carbón activado .....	58
Figura 3-21 Datos medición muestras carbón activado y $H = 8$ cm. ....	59
Figura 3-22 Absorbancia muestras fuera desv. est. carbón Activado y $H = 8$ cm. ....	60



Figura 3-23 Variación de concentración carbón activado y H = 8 cm.....	61
Figura 3-24 Torre carbón activado y H = 16 cm.....	61
Figura 3-25 Datos medición muestras carbón activado y H = 16 cm .....	62
Figura 3-26 Absorbancia muestras fuera desv. est. carbón Activado y H = 16cm .....	63
Figura 3-27 Variación de concentración carbón activado y H = 16 cm.....	64
Figura 3-28 Vaso de precipitados con carbón activado y disolución contaminada .....	64
Figura 3-29 Vaso de precipitados con carbón activado y proceso de filtrado.....	64
Figura 4-1 Comparativa espirulina para H <sub>1</sub> = 8 cm. y H <sub>2</sub> = 16 cm. ....	67
Figura 4-2 Comparativa de concentración vaso precipitados vs planta. Espirulina.....	68
Figura 4-3 Gráfica comparativa alturas carbón activado .....	69
Figura 4-4 Comparativa de concentración vaso precipitados vs planta. Carbón activado.....	70
Figura 4-5 Gráfica comparativa adsorbentes para H <sub>1</sub> = 8 cm. ....	71
Figura 4-6 Gráfica comparativa adsorbentes para H <sub>2</sub> = 16 cm .....	71
Figura 4-7 Gráficas comparativas de disminución de contaminantes para los distintos adsorbentes y las distintas alturas experimentadas.....	72
Figura 4-8 Comparativa de reducción de contaminante trabajo actual vs trabajos anteriores .....	73
Figura 5-1. Propuesta de aplicación de planta de adsorción integrada en una físico – química .....	77
Figura A3 1 Planta TAR F105 (I) Fuente Detegasa / Navantia .....	89
Figura A3 2 Planta TAR F105 (II) Fuente Detegasa / Navantia .....	89
Figura A3 3 Planta TAR J.Carlos I (I) Fuente Degasa / Navantia .....	90
Figura A3 4 Planta TAR J.Carlos I (I) Fuente Degasa / Navantia .....	90
Figura A3 5 Planta TAR J.Carlos I (III) Fuente Degasa / Navantia.....	90
Figura A3 6 Planta TAR BAM (I) Fuente Detegasa / Navantia.....	91
Figura A3 7 Planta TAR BAM (I) Fuente Detegasa / Navantia.....	91
Figura A3 8 Planta TAR F – 110 Fuente detegasa / Navantia .....	92
Figura A4 1 Ejemplo toma de datos espectrofotómetro. Espirulina y H = 8cm (I) .....	93
Figura A4 2 Ejemplo toma de datos espectrofotómetro. Espirulina y H = 8cm (II) .....	94
Figura A4 3 Ejemplo toma de datos espectrofotómetro. Espirulina y H = 8cm (III).....	95

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Relación Anexos convenio MARPOL [1] .....	9
Tabla 1-2 Aguas residuales negras y grises.....	13
Tabla 1-3 Tipos de contaminantes en aguas residuales [18] .....	16
Tabla 1-4 Contaminantes más habituales en aguas negras y grises en buques de la Armada [18].	17
Tabla 2-1 Clasificación de tratamientos para aguas residuales.....	18
Tabla 2-2 Características planta Delta FQ – 24. Fragata F105. [21].....	23
Tabla 2-3 Características de la planta FQ -125. LHD J. Carlos I [22].....	24
Tabla 2-4 Tipos más habituales de adsorbentes .....	35
Tabla 3-1 Materiales utilizados en el diseño de la planta piloto .....	39
Tabla 3-2 Materiales utilizados en el experimento.....	40
Tabla 3-3 Características del contaminante "negro de eriocromo T" .....	41
Tabla 3-4 Adsorbentes utilizados en planta piloto .....	43
Tabla 3-5 Concentración de las muestras .....	46
Tabla 3-6 Absorbancia / concentración "negro de eriocromo T" para obtención de la recta de calibración. ....	46
Tabla 3-7 Tabla de resultados de absorbancia de las muestras espirulina .....	50
Tabla 3-8 Tabla de resultados de concentración correspondientes a los valores de absorbancia obtenidos .....	50
Tabla 3-9 Resultados obtenidos espirulina para H = 8 cm. (Repetición experimento).....	52
Tabla 3-10 Tabla resultados espirulina H = 8 cm. (Repetición experimento).....	53
Tabla 3-11 Tabla de resultados absorción muestras espirulina y H <sub>2</sub> = 16 cm.....	55
Tabla 3-12 Resultados concentración espirulina y H = 16 cm. ....	56
Tabla 3-13 Datos reducción de concentración en vaso de precipitados. Espirulina. ....	58
Tabla 3-14 Resultado absorbancia muestras carbón activado y H = 8 cm.....	59
Tabla 3-15 Resultados concentración carbón activado y H = 8 cm .....	60
Tabla 3-16 Resultado absorbancia muestras carbón activado y H = 16 cm.....	62
Tabla 3-17 Resultados concentración carbón activado y H = 16 cm. ....	63
Tabla 3-18 Datos Concentración en vaso de precipitados carbón activado. ....	65
Tabla 4-1 Resultados espirulina para las dos alturas consideradas .....	66
Tabla 4-2 Tabla de resultados espirulina.....	67
Tabla 4-3 Resultados carbón activado para las dos alturas consideradas .....	68
Tabla 4-4 Tabla resultados carbón activado .....	69
Tabla 4-5 Comparativa resultados para H <sub>1</sub> = 8 cm .....	70
Tabla 4-6 Comparativa adsorbentes para H <sub>2</sub> = 16 cm .....	71

Tabla 4-7 Comparativa disminución de contaminantes para los distintos adsorbentes y alturas experimentadas .....	72
Tabla 4-8 Cambios y /o mejoras en experimentos a lo largo del proceso.....	72
Tabla 4-9 Análisis y diagnóstico de la realización de los experimentos.....	74
Tabla A1 1 Presupuesto estudio de contaminates .....	85
Tabla A1 2 Presupuesto estudio de adsorbentes.....	85
Tabla A1 3 Presupuesto diseño de la planta.....	85
Tabla A1 4 Presupuesto fabricación de la planta .....	86
Tabla A1 5 Presupuesto global.....	86

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Justificación de la necesidad

El tratamiento de las aguas residuales en un buque de la Armada es un tema de una gran importancia desde el punto de vista medioambiental, ya que una de las principales fuentes de contaminación son las aguas residuales. Su eliminación es un factor esencial en el cumplimiento de la reglamentación aplicable y en el compromiso de las FAS con la sostenibilidad, de cara a la consecución del llamado “Buque de Contaminación Cero”.

La reglamentación sobre la que se fundamenta nuestra necesidad se puede encajar en tres ámbitos fundamentales:

- a) *Internacional*: Convenio MARPOL [1]
- b) *Ministerio de Defensa* [2]
- c) *Armada* [3]

### 1.1.1 Convenio MARPOL

Aunque los buques de guerra no están obligados por el Convenio MARPOL, la Armada se ha fijado como objetivo interno la aplicación y el cumplimiento de su normativa.

El Convenio MARPOL fue creado en el año 1973, cuando se celebró la Conferencia Internacional sobre Contaminación Marítima y se originó el Convenio internacional para la prevención de la contaminación de los buques. Este convenio se modificó posteriormente, en el Protocolo de 1978. El conjunto de ambos es lo que se denomina habitualmente como Convenio MARPOL 73/78.

El Convenio MARPOL 73/78 tiene como principal objetivo el eliminar totalmente la contaminación del medio marino por hidrocarburos y otras sustancias perjudiciales, así como minimizar su vertido de forma accidental.

También se establece que se deberá dar a estos residuos el tratamiento adecuado en puerto, eliminando su poder contaminante y, cuando sea posible, proceder a su reciclado para su posterior reutilización.

MARPOL es el acrónimo de la expresión “Marine Pollution”, y en él se definen aquellos residuos generados durante el servicio, operaciones de mantenimiento y limpieza de los buques, incluidas las aguas residuales y los residuos distintos de la propia carga.

El convenio consta de una Introducción; el texto del Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques de 1973 y el Protocolo de 1978 relativo al Convenio 1973; Protocolo de 1997 que enmienda el Convenio de 1973 modificado por el Protocolo de 1978 y seis anexos que contienen reglas que abarcan las diversas fuentes de contaminación por los buques: [1]

ANEXO	DESCRIPCIÓN	CONTENIDO	REFERIDO A
I	Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos	9 capítulos 43 reglas.	Aguas de lastre contaminadas con petróleo y mezclas oleosas de las sentinas de la cámara de máquinas o de los equipos de depuración de combustibles y aceites de los motores de los buques.
II	Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel	8 capítulos 18 reglas.	Aguas de lastre y lavado de tanques, así como mezclas que contengan sustancias peligrosas.
III	Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por vía marítima en bultos	8 reglas	Restos de cualquier material del cargamento que se encuentren a bordo en bodegas de carga o tanques y que permanecen una vez completados los procedimientos de descarga y las operaciones de limpieza, incluidos los residuos resultantes de las operaciones de carga y descarga y los derrames.
IV	Reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques	5 capítulos 13 reglas	Se definen conceptos como «Aguas Sucias». Las aguas sucias son las procedentes de: desagües y otros residuos procedentes de cualquier tipo de inodoros y urinarios; desagües procedentes de lavabos, lavaderos y conductos de salida en locales de servicios médicos (enfermería, hospital, etc.); desagües procedentes de locales en los que se transporten animales vivos y otras aguas residuales cuando estén mezcladas con las de desagüe arriba indicadas.
V	Reglas para prevenir la contaminación por las basuras sólidas de los buques	9 reglas	Se entiende como basura sólida toda clase de restos de víveres, salvo el pescado fresco, así como los residuos resultantes de las faenas domésticas y trabajo rutinario del buque en condiciones normales de servicio. El mayor peligro lo constituye el plástico, que puede flotar durante años.
VI	Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques	3 capítulos 18 reglas.	Se establecen los límites de las emisiones de óxidos de azufre y de óxidos de nitrógeno de los escapes de los buques y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan el ozono.

**Tabla 1-1 Relación Anexos convenio MARPOL [1]**

El Convenio MARPOL obliga a los capitanes de buques que atraquen en los diferentes puertos a comunicar la cantidad y tipo de residuos transportados, así como a entregarlos en las instalaciones receptoras de cada puerto adecuadas a cada tipo de residuo.

El Convenio MARPOL también fomenta la aprobación de planes de recepción y manipulación de residuos por las entidades gestoras de los puertos y exige a las Autoridades Portuarias de los mismos que proporcionen instalaciones adecuadas para tal fin.

### *1.1.2 Normativa del Ministerio de Defensa*

El MINISDEF tiene, dentro de sus objetivos, cumplir con las normativas medio ambientales nacionales e internacionales y proteger el medio ambiente en todas sus operaciones y actividades. Para ello ha implementado medidas para minimizar su impacto ambiental, como la optimización de los consumos de energía y recursos, la gestión de residuos y la adopción de tecnologías respetuosas con el medio ambiente. Además, el Ministerio trabaja en colaboración con otras instituciones y organizaciones para preservar y restaurar el medio ambiente en las zonas afectadas por sus operaciones.

Cumple con diversas normativas y regulaciones medioambientales a nivel nacional e internacional, incluyendo:

*Ley de protección ambiental:* La Ley de protección ambiental de España establece los requisitos y las responsabilidades ambientales para todos los sectores, incluyendo el Ministerio de Defensa. [4]

*Directivas de la UE:* El Ministerio de Defensa de España debe cumplir con las directivas de la UE relacionadas con la gestión de residuos, la protección de la naturaleza y la conservación de la biodiversidad.

*Convenios internacionales:* El Ministerio de Defensa español cumple con los convenios internacionales relacionados con el medio ambiente, como la Convención sobre la diversidad biológica y la Convención de Ramsar sobre los humedales. [5]

*Normas internas:* El Ministerio de Defensa de España ha establecido normas internas para garantizar la protección ambiental y la sostenibilidad en sus operaciones, incluyendo la gestión de residuos, la conservación de la biodiversidad y la reducción de emisiones contaminantes:

1) Directiva 107/1997. [2]

2) Instrucción 56/2011 de la SEDEF [6] y su posterior modificación 59/2014. [7]

El MINISDEF de España trabaja en colaboración con otras agencias y organizaciones medioambientales para proteger el medio. También se esfuerza en promover un desarrollo sostenible para sensibilizar a sus empleados y personal militar sobre la importancia de la protección ambiental y promueve prácticas sostenibles en sus operaciones.

### *1.1.3 Normativa de Armada*

La política medioambiental de la Armada incluye la minimización de la contaminación marítima y la protección del medio ambiente en todas sus operaciones y actividades. Esto se logra a través de la implementación de medidas técnicas y operacionales, la formación y concienciación de las tripulaciones, la colaboración con otras agencias y el cumplimiento de regulaciones internacionales y nacionales de protección medio ambiental. [3]

La Armada enfoca su atención ambiental en objetivos específicos, uno de los cuales es el logro de un "buque sin contaminación". Este concepto implica buques contruidos con materiales amigables con el medio ambiente, que puedan ser reciclados al final de su vida útil y que no pongan en riesgo la seguridad y bienestar de la tripulación.

La Armada se esfuerza por cumplir con las normativas medio ambientales nacionales e internacionales aplicables a sus operaciones y actividades, también tiene entre sus prioridades proteger y conservar el medio ambiente marino y costero. Además, la Armada ha implementado medidas para minimizar su impacto ambiental, como la optimización de los consumos de energía y recursos, la gestión de residuos y la adopción de tecnologías respetuosas con el medio ambiente. [3]

La Armada se rige por las normativas medio ambientales españolas y por las normativas internacionales aplicables a su ámbito de operación, tales como la Convención Marpol (Convención Internacional para la Prevención de la Contaminación por Buques) [1], la Convención de Barcelona y sus protocolos y la Convención OSPAR (Convención para la Protección del Medio Ambiente del Norte Atlántico) [8]. La Armada también cumple con las regulaciones nacionales sobre protección del medio ambiente, como la Ley de Contaminación del Mar y la Ley de Protección Ambiental. [4]

## 1.2 Antecedentes

En este TFG se pretende continuar con la fase experimental de la planta piloto basada en el proceso de adsorción teniendo en cuenta los resultados de trabajos anteriores, tanto en el diseño de la misma como en la disposición de las esferas de adsorbente en el interior de la torre. Es por ello, que con este TFG se continúa con la investigación efectuada en los trabajos que a continuación se relacionan:

*TN Paz Armada* => Selección de residuos orgánicos como adsorbentes de bajo coste para la eliminación de contaminantes en aguas [9]

*AN Maza Fernández* => Construcción de un sistema de adsorción a escala en el laboratorio para la depuración de aguas de buques con residuos MARPOL [10]

A lo largo de este TFG se han considerado las lecciones aprendidas en dichos trabajos, tomándolas, en muchas ocasiones, como punto de partida para los desarrollos realizados. De este modo ha sido posible optimizar el tiempo empleado para poder demostrar el correcto funcionamiento de la planta piloto y su implementación en los buques de la Armada.

## 1.3 Objetivo

El presente trabajo consiste en la realización y documentación del estudio experimental de una planta piloto de depuración de aguas basada en el método de adsorción. Para ello, se ha partido de un diseño elaborado en un trabajo previo [10]. Se disponen los siguientes objetivos:

1. Evaluación de la eficacia de la planta. Se empleará agua contaminada con colorante para poder demostrar la efectividad del proceso de adsorción.
2. Empleo de adsorbentes de bajo coste para la depuración de las aguas. Depurando el agua con dos alturas distintas de adsorbentes en la columna de la planta piloto.
3. Demostrar la bondad del diseño de la planta comparando los resultados obtenidos en la misma con los obtenidos empleando la conjunción de adsorbente y adsorbato fuera de ella.
4. Implementación de mejoras al diseño de la planta de cara a obtener resultados más propicios.
5. Realizar una propuesta de aplicación de la planta piloto en una planta de tratamiento de aguas en un buque de la Armada.

## 1.4 Tipos de aguas residuales en un buque de la Armada

Las aguas cuando son contaminadas por diferentes motivos se convierten en lo que denominamos aguas residuales. Son aguas cuya calidad está afectada negativamente por la influencia de productos químicos antropogénicos. Se trata de aguas que no tienen valor inmediato para el fin para el que se utilizó, ni para el propósito para el que se produjeron.

Las aguas residuales en los buques tienen distintos orígenes y el tratamiento de cada tipo debe ser diferente, ya que su concentración y tipo de contaminantes también difieren.

Para diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales se debe seguir un proceso que no se centre en un contaminante determinado, sino que tenga una definición de parámetros generales y pueda ser aplicable a cualquier tipo de contaminante.

Los buques de la Armada generan diferentes tipos de residuos que influyen de distinta manera sobre el medio marino. Es fundamental su análisis y tratar cada tipo con los procesos más adecuados.

Dentro del epígrafe de las aguas residuales encontramos dos tipos en función de su origen y que son las que, en los buques, se tratan en las plantas de tratamiento de aguas residuales. [Fuente Detegasa<sup>1</sup>]

TIPO	DESCRIPCIÓN
Negras [11]	<p>En un buque de guerra, las aguas negras se refieren a las aguas residuales generadas por la tripulación y las operaciones a bordo, incluyendo los desechos humanos y las aguas residuales generadas por la cocina y otros sistemas que contienen materia orgánica y desechos tóxicos.</p> <p>Son aguas residuales que contienen materia fecal, restos de alimentos y pequeñas cantidades de basura. Se originan en los inodoros y poseen una alta concentración de partículas sólidas en suspensión, materia orgánica, nitrógeno y diferentes tipos de patógenos.</p> <p>Los patógenos y contaminantes que contienen pueden ser perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente marino, por lo que deben ser tratadas adecuadamente antes de ser descargadas en el mar.</p> <p>En general no se tratan para volver a ser usadas debido a su gran cantidad de contaminantes.</p> <p>El tratamiento de aguas negras en un buque de guerra puede incluir procesos como la sedimentación, la filtración y la oxidación para eliminar patógenos y otros contaminantes.</p>
Grises [12]	<p>Las aguas grises son las aguas residuales que provienen de la ducha, el fregadero y el lavabo, que han sido tratadas en parte y han perdido parte de su carga de materia orgánica, pero aún contienen niveles significativos de materia inorgánica y bacterias. Estas aguas grises pueden ser reutilizadas para fines no potables, pero todavía requieren un tratamiento adicional antes de ser descargadas al ambiente.</p> <p>Las aguas grises deben ser tratadas antes de ser descargadas en el mar para cumplir con los requisitos ambientales y proteger la salud humana y el medio ambiente marino.</p> <p>Las aguas residuales pueden ser reutilizadas debido a que tienen una cantidad reducida de contaminantes que pueden causar enfermedades. Una de las posibles aplicaciones es su uso como agua de cisterna, ya que no necesitan ser de alta calidad.</p> <p>El tratamiento de aguas grises en un buque incluye varios pasos para reducir su contenido de materia orgánica, materia inorgánica y bacterias antes de su descarga al ambiente. Algunos de los procesos comúnmente utilizados en el tratamiento de aguas grises en un buque incluyen:</p>

<sup>1</sup> Información recabada en entrevista con el responsable de Plantas TAR de la empresa Detegasa.



TIPO	DESCRIPCIÓN
Grises	<p><i>Decantación:</i> las partículas más pesadas se separan por sedimentación.</p> <p><i>Filtración:</i> se utiliza para retirar partículas y materia orgánica en suspensión.</p> <p><i>Tratamiento químico:</i> se añaden productos químicos para desinfectar y neutralizar las aguas grises.</p> <p><i>Tratamiento biológico:</i> se utiliza para acelerar la degradación de la materia orgánica por medio de bacterias y microorganismos.</p> <p>El objetivo del tratamiento de aguas grises en un buque es reducir su impacto en el medio ambiente y cumplir con las normativas medio ambientales aplicables.</p>

**Tabla 1-2 Aguas residuales negras y grises**

El contenido de este trabajo se centrará exclusivamente en las aguas grises y negras, ya que, como se ha desarrollado a lo largo del epígrafe, se tratan conjuntamente en la planta de tratamiento de aguas residuales.

Existen también otros dos tipos de aguas residuales presentes en los buques y que se excluirán de este estudio, como son las de sentina y las de lastre. Estos dos tipos son gestionados de distinta forma, quedando, por lo tanto, fuera del alcance de este trabajo.

Las aguas que no son tratadas en las plantas de aguas residuales, y por lo tanto, fuera del alcance de este trabajo, son las siguientes:

#### ***Aguas de Lastre:***

Para mantener el equilibrio de un buque es necesario utilizar el sistema de lastre. Este consiste en bombear agua a tanques especialmente diseñados para almacenarla y distribuidos en todo el buque. Suele hacerse en puerto o cerca de él, lo que resulta en agua turbia, llena de sedimentos y microorganismos, al ser recogida. Si los tanques ofrecen condiciones favorables para estos microorganismos, pueden sobrevivir durante los viajes del buque y ser descargados al mar junto con el agua de lastre al deslazar el buque. [*Fuente Detegasa*<sup>2</sup>] [13]

Esto ha provocado numerosos casos de traslado de especies invasoras a otros ecosistemas, lo que conduce a daños económicos y ambientales muy significativos en los países receptores. Por este motivo, el tratamiento de aguas de lastre ha cobrado una gran importancia en los últimos años para la OMI.

Las aguas de lastre son las aguas que se utiliza para equilibrar el peso y la estabilidad de un barco o buque durante su navegación. Se llenan los compartimentos vacíos con agua antes de zarpar y se descargan al llegar a puerto, para evitar su transporte y su posible impacto en el medio ambiente. La calidad y el tratamiento de aguas de lastre están regulados por leyes y normativas internacionales para proteger los ecosistemas marinos y costeros.

Es importante que el tratamiento de aguas de lastre cumpla con los estándares y regulaciones medio ambientales y que se realice de manera segura y eficaz para minimizar su impacto en el medio ambiente.

El tratamiento de las aguas de lastre en los buques de superficie de la Armada se realiza, en general, mediante una primera etapa de filtrado de partículas y organismos superiores, junto con una posterior desinfección mediante diferentes procesos, normalmente lámparas UV (ultravioletas).

---

<sup>2</sup> Información recabada en entrevista con el responsable de Plantas TAR de la empresa Detegasa.

En el sector naval existen varios procesos para depurar el agua de lastre de los barcos, los más comunes son:

Filtración: el agua de lastre se filtra a través de una malla fina para retener las partículas sólidas y reducir la turbidez.

Desinfección: finalmente, el agua tratada se desinfecta mediante la adición de cloro u otros agentes desinfectantes para matar gérmenes y microorganismos restantes. Además del cloro, existen otros procesos de desinfección que se utilizan en el tratamiento de agua de lastre en el sector naval, tales como:

*Ozono*: es un método efectivo para la desinfección y oxidación de los contaminantes orgánicos.

*Ultravioleta (UV)*: se utiliza para matar microorganismos y virus presentes en el agua.

*Sistemas de ozonización y UV combinados*: este proceso combina la oxidación por ozono y la radiación UV para una desinfección más efectiva.

Es importante destacar que cada barco puede requerir un tratamiento específico en función de la calidad del agua de lastre y las normativas locales e internacionales de descarga.

### ***Aguas de sentina:***

Se refieren a un agregado de agua y aceite, el cual puede provenir de equipos y tuberías. En este tipo de aguas podrían estar presentes, además, otras sustancias como metales pesados, pinturas e hidrocarburos. La eliminación del agua de sentina puede verse comprometida ante la presencia de productos de limpieza, debido a que estos actúan como emulsionante y proporcionan estabilidad a la mezcla de agua y aceite. La OMI decreta que solo podrán descargarse al mar si su contenido de aceite residual es menor a 15 ppm, lo cual no puede lograrse de forma económicamente viable con técnicas de separación convencionales. [*Fuente Detegasa*<sup>3</sup>] [14]

Este tipo de aguas se acumulan en la sentina del buque. Se trata de un espacio ubicado en la cámara de máquinas del buque, donde es probable que existan residuos tales como productos químicos, bacterias y desechos orgánicos.

Atendiendo a la legislación de la OMI expuesta anteriormente, es necesario que se lleven a cabo tratamientos para la descontaminación de las aguas de sentina. Generalmente, en los buques se llevan a cabo procesos que implican la combinación de tratamientos físicos, químicos y biológicos. En los buques de guerra los tratamientos más habituales para las aguas de sentina incluyen:

Decantación: separación de partículas sólidas del líquido por sedimentación.

Filtración: eliminación de partículas sólidas mediante el uso de filtros.

Tratamiento con productos químicos: adición de productos químicos para mejorar la clarificación y desinfección del agua.

Tratamiento biológico: utilización de microorganismos para degradar los contaminantes orgánicos en el agua.

Ultravioleta: desinfección mediante luz UV.

---

<sup>3</sup> Información recabada en entrevista con el responsable de Plantas TAR de la empresa Detegasa.

El objetivo final del tratamiento de aguas de sentina es producir agua tratada que cumpla con los límites de descarga establecidos por las normativas marítimas internacionales, como la Convención Marpol [1], para proteger el medio ambiente marino.

El modo de operación de la Armada para el tratamiento de este tipo de aguas consiste en el bombeo de éstas a un sistema de tratamiento específico, donde se produce una defecación entre el agua y los restos de aceite.

El tratamiento de las aguas de sentina en un buque de la Armada se realiza de la siguiente manera:

En una primera etapa tenemos un filtro coalescente (de diferentes materiales en función del suministrador), el cual aglutina todas las gotas de hidrocarburo no emulsionado en gotas más grandes, favoreciendo su flotación. Es un tipo de separador de sentinas por gravedad. Si tras esta primera etapa nos encontramos con concentraciones de contaminante de menos de 15 ppm, entonces se produce su descarga al mar. El hidrocarburo flotado en esta primera etapa es enviado al tanque de mezclas oleosas.

Si la concentración después de esta primera etapa es mayor de 15 ppm pasamos a una segunda etapa donde las aguas de sentina pasan por otro filtro fabricado con diferentes materiales, con el objetivo de retener el hidrocarburo emulsionado. Si en este momento la concentración es menor de 15 ppm, se procede a su descarga al mar, de lo contrario se devuelve a la sentina para reiniciar el proceso.

El tanque almacén de mezclas oleosas, a donde van a parar los restos de hidrocarburos y aceites, se vacía al llegar a puerto en instalaciones concebidas específicamente para esta tarea.

## 1.5 Tipos de contaminantes de las aguas residuales

Existen distintos agentes contaminantes que están presentes en las aguas residuales y poseen distinta naturaleza. Pueden ser bacterias, metales pesados, productos tóxicos, parásitos y otros. [15]

Los distintos tipos de aguas residuales *epígrafe 1.4*, se caracterizan por tener sustancias específicas, que contaminan dichas aguas. Es por ello, que se requiere tener conocimiento de qué agentes contaminantes se encuentran en el agua para poder elegir la forma de tratamiento óptima de ésta. [16]

El agua contaminada se puede definir como aquella que posee sustancias nocivas para la salud o como cualquier agua que no cumpla con la legislación ambiental. Se deben emplear métodos analíticos en el agua para determinar si existe la presencia de sustancias contaminantes, las cuales no son visibles a escala macroscópica. [17]

Es de gran importancia tener conocimientos de los posibles contaminantes que pueden estar presentes en el agua. Solo así, se puede garantizar que el proceso de tratamiento del agua que se vaya a realizar es el idóneo para atacar a los agentes contaminantes presentes en los distintos tipos de aguas.

Existen tres grandes “familias” en las que agrupar a los contaminantes: físicos, químicos y biológicos, las cuales están recogidas en la *Tabla 1-3 Tipos de contaminantes en aguas residuales*. Además de los contaminantes explicados en dicha tabla, cabe destacar que pueden existir partículas gaseosas disueltas en el agua. Sin embargo, estas partículas no suelen ser sometidas a tratamientos concretos, puesto que normalmente acaban vaporizándose. [18]

En resumen, la gran diversidad de contaminantes presentes en el agua tiene consecuencias de distintos tipos. Es de vital importancia saber qué tipos de contaminante se encuentran en el agua a tratar. Esto es debido a que se tendrá que adoptar una disposición pertinente del sistema de depuración. Hay que tener en cuenta que las aguas contaminadas con agentes físicos, químicos y biológicos poseen sus respectivos tratamientos específicos. [15].

Los contaminantes físicos en aguas residuales incluyen sólidos en suspensión, materia en floculación, grasas y aceites, líquidos, materiales radiactivos, productos tóxicos y productos químicos peligrosos.

Los contaminantes químicos en aguas residuales incluyen productos químicos industriales, productos agrícolas, productos químicos domésticos, productos químicos de limpieza, productos farmacéuticos, metales pesados, productos radiactivos y otros productos tóxicos. [17]

Los contaminantes biológicos en aguas residuales incluyen bacterias, virus, hongos, parásitos, protozoos, algas y otros microorganismos. Estos contaminantes pueden causar enfermedades y otros problemas de salud si no se eliminan adecuadamente antes de su descarga o reutilización. [18]

CLASIFICACIÓN		CONTAMINANTE	ORIGEN DEL CONTAMINANTE	CONSECUENCIAS
Físicos		Residuos sólidos	Erosión, arrastre por la lluvia	Contaminación visual
		Radioactivos	Residuos nucleares en la mar	Toxicidad
		Térmica	Cambios de temperatura	Disminuye solubilidad del oxígeno y hace aparecer microorganismos
Biológicos		Bacterias	Surgen de la evolución de células, suelen aparecer en los residuos humanos	Transmisión de diferentes enfermedades: (salmonelosis, gastroenteritis, diarrea, tenia, enfermedades respiratorias...) Estos contaminantes hacen que el agua no sea apta para el consumo humano
		Protozoos		
		Helmintos		
		Virus		
Químicos	Orgánicos	Carbohidratos	Residuos humanos y fotosíntesis	Eutrofización
		Grasas y aceites	Cocina o limpieza de tanques y maquinaria	Efecto tóxico de algunos componentes que pueden acumularse en la cadena alimenticia y perjudicar a los microorganismos que intervienen en la depuración del agua
		Proteínas	Residuos humanos	Malos olores, disminuyen posibilidad de usos posteriores del agua
		Hidrocarburos	Actividad humana	Contaminación de la atmósfera y el mar, enfermedades
		Detergentes y jabones	Actividades de limpieza, lavabos y duchas	Impiden la eliminación de grasas y aceites, pueden ser tóxicos para la vida marina
		Sales inorgánicas	Residuos humanos	Eutrofización.
Químicos	Inorgánicos	Ácidos y bases	Compuestos químicos	Alteración del pH
		Metales pesados	Corrosión de tuberías.	Toxicidad sobre los microorganismos que actúan en los procesos de depuración de las aguas. Acumulación en cadenas alimenticias

Tabla 1-3 Tipos de contaminantes en aguas residuales [18]

En el caso que nos concierne en el ámbito de este trabajo sobre las aguas residuales de los buques de la Armada, se prestará mayor atención a los contaminantes químicos y biológicos, por ser estos los de mayor presencia en las aguas negras y grises. Los contaminantes físicos no dejan de ser menos importantes, pero tal y como se ha comentado, en general, quedan fuera de los tratamientos en las plantas de aguas residuales. [18]

### *1.5.1 Contaminantes más comunes en aguas residuales en buques de la Armada*

Tras desarrollar de una manera genérica los tipos de contaminantes presentes en las aguas residuales se centrará nuestro estudio en los más comunes en los buques de la Armada, haciendo especial hincapié en los de las *aguas negras y grises*, *epígrafe 1.4* ya que como se ha mencionado en epígrafes anteriores, son éstas las tratadas por las plantas de tratamiento de aguas residuales, objeto del ámbito del presente trabajo. [18]

CLASIFICACIÓN		CONTAMINANTE	ORIGEN DEL CONTAMINANTE	CONSECUENCIAS
<b>Biológicos</b>		Bacterias	Residuos humanos	Transmisión de diferentes enfermedades: (salmonelosis, gastroenteritis, diarrea, tenia, enfermedades respiratorias...) Estos contaminantes hacen que el agua no sea apta para el consumo humano.
		Protozoos		
		Helmintos		
		Virus		
<b>Químicos</b>	<b>Orgánicos</b>	Carbohidratos	Residuos humanos	Eutrofización
		Grasas y aceites	Cocina	Efecto tóxico de algunos componentes. Pueden acumularse en la cadena alimenticia y perjudicar a los microorganismos que intervienen en la depuración del agua
		Proteínas	Residuos humanos	Malos olores, disminuyen posibilidad de usos posteriores del agua
		Detergentes y jabones	Tareas de limpieza, lavabos y duchas	Impiden la eliminación de grasas y aceites, pueden ser tóxicos para la vida marina.
		Sales inorgánicas	Residuos humanos	Eutrofización.
		Metales pesados	Corrosión de tuberías.	Toxicidad sobre los microorganismos que actúan en los procesos de depuración de las aguas Acumulación en la cadena alimenticia.

**Tabla 1-4 Contaminantes más habituales en aguas negras y grises en buques de la Armada [18].**

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Tipos de tratamientos de aguas residuales

Los procesos de tratamientos para las aguas residuales se pueden clasificar en cuatro grandes etapas, pensadas para eliminar la gran variedad de contaminantes presentes en el agua: [Fuente Detegasa<sup>4</sup>]

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN Y UTILIZACIÓN
Pretratamientos	Básicamente son filtros. Se utilizan para la eliminación de sólidos gruesos y finos, normalmente hasta 1 mm de grosor.
Tratamientos Primarios	Se utilizan para la eliminación de partículas en suspensión, normalmente por procesos físico - químicos. Los procesos más comunes se basan en la decantación o en la flotación, ayudados de sustancias químicas coagulantes o floculantes.
Tratamientos secundarios	En este grupo se encuadran los tratamientos biológicos, cuyo objetivo principal es la eliminación de materia orgánica.
Tratamientos terciarios	Son los llamados tratamientos de afino. Su objetivo es la eliminación de nutrientes o contaminantes más específicos, que no se han podido eliminar en los tratamientos anteriores. En este grupo podríamos encajar los procesos de adsorción, ya que actuando por si solos, tal y como se explicitará en el desarrollo del trabajo, son procesos con utilidad limitada, mientras que puede ser un potente proceso complementario dentro de otros procesos como tratamiento de afino.

Tabla 2-1 Clasificación de tratamientos para aguas residuales.

<sup>4</sup> Información recabada en entrevista con el responsable de Plantas TAR de la empresa Detegasa

La realidad nos muestra que no hay un solo proceso que elimine el 100% de los contaminantes presentes en un agua residual, por lo que, en la gran mayoría de los casos, se hace necesario la combinación de dos o más procesos.

## 2.2 Métodos de tratamiento de aguas residuales. Aplicación en buques

Las plantas de tratamiento para aguas residuales, centrándonos en su aplicación en buques, se pueden dividir en dos grupos fundamentales: Plantas Biológicas y Plantas Físico - Químicas. [19]

A continuación, se desarrollarán las principales características de su funcionamiento, con el objeto de poder establecer una comparativa entre estas y la planta propuesta motivo del presente trabajo.

### 2.2.1 Plantas Biológicas

Las plantas biológicas se basan en procesos biológicos realizados por microorganismos y las podemos encuadrar dentro de los tratamientos llamados secundarios. Se clasifican en dos grandes tipos: [Fuente Detegasa<sup>5</sup>]



Figura 2-1 Planta TAR biológica (Fuente Detegasa)

#### Plantas Biológicas convencionales (fangos activos):

La base fundamental de este tipo de plantas es un reactor biológico aerobio (presencia de oxígeno). Podemos asimilar un reactor a un tanque con agua residual que dispone de un soplante de aireación, que proporciona el oxígeno necesario para la supervivencia de las bacterias deseadas en el proceso de degradación de la materia orgánica. El proceso de funcionamiento es el siguiente:

1º) El agua residual presente en el reactor posee bacterias que están presentes como parte de la propia agua. Estas bacterias respiran oxígeno y “se comen” la materia orgánica y algunos otros contaminantes, también presentes en el agua.

Debe existir un equilibrio entre las mencionadas bacterias y el contaminante, ya que, de lo contrario, el proceso biológico de depuración no alcanza la eficacia deseada. A medida que se va desarrollando la comunidad de microorganismos en el reactor, se van agrupando en flóculos. Un flóculo es un agregado o precipitado de partículas en suspensión en un líquido que se han unido y se han vuelto más densos y pesados. Este proceso se llama floculación y puede ocurrir naturalmente o puede ser inducido por adición de un coagulante y/o floculante. La floculación es un proceso importante en la purificación de agua y tratamiento de aguas residuales, ya que permite la separación de partículas en suspensión y mejora la claridad del agua.

---

<sup>5</sup> Información recabada en entrevista con el responsable de Plantas de tratamiento de aguas de la empresa Detegasa

2º) La segunda parte del proceso tiene lugar en un segundo tanque, llamado decantador, en cuyo fondo sedimentan los lodos por gravedad. En este punto se produce una recirculación parcial de los lodos al reactor biológico, para mantener el equilibrio entre cantidad de bacterias y alimento (contaminantes). Cuando el lodo acumulado en el fondo del decantador es excesivo, se produce la llamada purga de lodos en la cual el material decantado, dependiendo de la situación del buque, pasa a un tanque de lodos o se descarga directamente al mar (a más de 12 millas de la costa está permitido su descarga).

3º) En la tercera parte del proceso, el agua clarificada de la parte superior pasa a un tercer tanque llamado tanque de desinfección. Dicha desinfección puede hacerse por varios métodos: Cloración (hipoclorito), ultravioleta o incluso ozonización son tres de los métodos más utilizados en la desinfección.

Tras estos tres pasos las aguas son vertidas al mar.

<b>PROS</b>	Proceso sencillo
	Mantenimiento sencillo y económico
	Inversión inicial asequible
	Genera menos lodos que un proceso físico - químico
<b>CONTRAS</b>	Necesita tiempo de arranque y adaptación biológica, no es efectiva desde el minuto uno, punto este de vital importancia en un buque militar
	Suelen necesitar más espacio que otros tratamientos.
	Tiene mayor consumo energético, debido al soplante que debe mantener el nivel de oxígeno

*Biorreactores de membrana (MBR, Biorreactor de membrana):*

El proceso de funcionamiento es muy similar al de las plantas convencionales, únicamente se sustituye la decantación y la desinfección por un sistema de membranas, que filtran los microorganismos y algunos contaminantes presentes en el agua. [20]

Las plantas MBR utilizan membranas de lámina plana, de fibra hueca, etc. Las membranas más utilizadas en el sector naval trabajan sumergidas en el biorreactor y eliminan de manera eficiente los sólidos suspendidos y los contaminantes. Las membranas MBR reemplazan las secciones de sedimentación y desinfección, y además trabajan a mayores concentraciones de sólidos en el reactor, por lo que ocupan menos espacio que las depuradoras biológicas de fangos activos.

Los biorreactores de membrana sumergida suelen ofrecer un efluente de mayor calidad en comparación con los procesos biológicos convencionales.

Este tipo de tecnología es una excelente opción para buques con una tripulación elevada (buques trasatlánticos), debido a su compacta configuración incluso con elevados caudales, y también cuando se requiera una excelente calidad del efluente en zonas especialmente sensibles.

<b>PROS</b>	Necesita menos espacio que la planta convencional, ya que no posee ni decantación ni desinfección, y trabaja a alta carga.
	Suele tener una mayor eficacia que la convencional (es un filtro).
	Se obtienen mejores resultados



<b>CONTRAS</b>	Es más cara que las convencionales
	El mantenimiento y la operación son más complejos.
	Requiere limpiezas químicas relativamente frecuentes y sustituir las membranas cada cierto número de años.
	Al igual que la convencional, necesita tiempo de arranque, no es efectiva desde el minuto uno, punto este de vital importancia en un buque militar

### *2.2.2 Plantas Físico - Químicas*

Las plantas físico – químicas pueden encuadrarse dentro de los procesos de tratamiento llamados primarios. Los procesos de funcionamiento más comunes en el sector naval se describen a continuación: [Fuente Detegasa<sup>6</sup>]

#### *1º) Coagulación – Flocculación:*

Se añade un producto químico al agua residual (Cloruro férrico, Policloruro de Aluminio, etc.) que hace que coagulen y flocculen las partículas del agua (se forman agregados).

Este producto químico acelera la coagulación y la decantación de los microorganismos.

#### *2º) Decantación:*

El agua residual pasa posteriormente a un decantador donde estos flóculos decantan por gravedad, quedando así el agua clarificada en la zona superior. Este decantador está compuesto por una serie de lamelas. Estas lamelas son láminas paralelas que simplemente aumentan la superficie específica de decantación dentro del decantador para que las bacterias tengan más superficie para decantar, de forma que se mejora la sedimentación en un volumen más compacto.

#### *3º) Flotación:*

En algunas ocasiones, para separar el fango del agua clarificada, se utiliza la flotación en lugar de la decantación. Para favorecer la flotación de los flóculos se utiliza un compresor a alta presión, que disuelve aire en el agua residual y genera microburbujas al liberarse la presión, que ayudan a la flotación de los flóculos. Finalmente, unos rascadores de superficie arrastran el fango flotado a una tolva, para su envío al tanque de fangos o vertido al mar.

#### *4º) Desinfección:*

El agua clarificada, tanto por procesos de decantación, como por flotación, pasa por un proceso de desinfección. Estos procesos de desinfección pueden consistir en una lámpara UV, ozonización, una combinación de ambos, o la adición de químicos desinfectantes como el hipoclorito de sodio. En el sector naval se suele optar por esta última opción, al ser más sencilla. Para ello, el agua clarificada en el proceso anterior pasa a un tanque de desinfección, donde se añade el hipoclorito para eliminar las bacterias, se agita el agua y finalmente se añade otro químico para neutralizar el hipoclorito y evitar su vertido al mar.

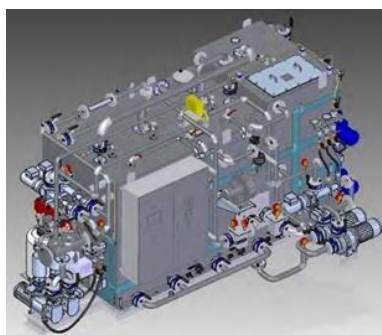
Este tipo de plantas tiene un rendimiento máximo desde el inicio, lo que las hace idóneas para su instalación en buques de guerra.

---

<sup>6</sup> Información recabada en entrevista con el responsable de Plantas de tratamiento de aguas de la empresa Detegasa

<b>PROS</b>	Rendimiento máximo desde el primer momento y se adaptan bien a cambios en el número de tripulantes Hecho fundamental en buques de guerra.
	Operación y mantenimiento relativamente sencillo.
	Suelen ser muy económicas.
	Ocupan poco espacio.
<b>CONTRAS</b>	Generan más lodos que las biológicas.
	Necesitan más productos químicos que las biológicas y sin ellos no pueden funcionar correctamente.

Resaltar que existen otros procesos biológicos y físico – químicos que no vamos a tratar en este trabajo por no ser tan comunes en su aplicación en buques.



**Figura 2-2 Planta TAR físico - química (Fuente Detegasa)**

### *2.2.3 Comparativa entre medios aplicados en buques y planta piloto. Pros y contras*

Tras la descripción de los principales métodos de tratamiento de aguas residuales en buques y analizando los pros y contras de cada una de ellas, trataremos de concluir la bondad del proceso de nuestra planta de adsorción de cara a la instalación en un buque de guerra. [Fuente Detegasa<sup>7</sup>]

Los procesos de adsorción están muy direccionados a la eliminación de contaminantes muy específicos. En la realidad, en un buque de guerra existen gran variedad de contaminantes, por lo que se tendrían que emplear muchos y distintos adsorbentes para poder realizar la eliminación de dicha variedad de contaminantes.

Se puede concluir que el proceso de adsorción no es un proceso global en sí mismo. Se podría considerar la adsorción como un tratamiento de afino encaminado a la eliminación de un determinado contaminante costoso y difícil de eliminar con métodos tradicionales, aplicando un adsorbente específico para ello. **Podría perfectamente complementar un proceso de desinfección.**

Es por ello, que se puede considerar la adsorción como un proceso terciario.

---

<sup>7</sup> Información recabada en entrevista con el responsable de Plantas de tratamiento de aguas de la empresa Detegasa

## 2.3 Tratamientos de aguas residuales en buques de la Armada

En este epígrafe se describen las plantas de tratamiento de aguas residuales en una representación de buques de la Armada.

### 2.3.1 Fragatas F100

Las fragatas clase F100 disponen para el tratamiento de aguas residuales, de la planta denominada “DELTA FQ-24” con siguientes características: [21]

TIPO		FQ - 24
Carga hidráulica	Máx l/d	24000 l/día
Caudal punta	l/h	2250 l/h
Flujo proceso	l/min	16,6 l/min
PRODUCTOS QUÍMICOS	CAPACIDAD TANQUE	CONSUMO
Dosificación ozono		25 g/día
Dosificación floculante	1	0,31 l/día (6ppm con agua a 1/1000)
Dosificación coagulante	25 l	3-13 l/día (100 – 500 ppm)

**Tabla 2-2 Características planta Delta FQ – 24. Fragata F105. [21]**

Es una unidad de tratamiento físico - químico con un funcionamiento seguro y fácil. La unidad está diseñada para procesar aguas negras y aguas grises procedentes de duchas y drenajes (residuos humanos).

La planta no está diseñada para tratar grasas por lo cual los residuos abundantes de comidas (por ejemplo, comidas enteras desechadas, grandes cantidades de leche, aceites o grasas) deberían ser tratados por otros medios. La planta podría absorber los residuos que pueden quedar en los platos, que normalmente no suponen una cantidad importante de grasa, aunque deben ser previamente tratados en un triturador para conseguir un grado de trituración inferior a 10 mm.

Los tanques, colector y de desinfección, están dimensionados para dar cabida a los flujos sobrantes durante periodos de demanda punta.

Utiliza el proceso físico - químico (no biológico) con el fin de sacar partido de los muchos beneficios de este procedimiento para aplicación a bordo de buques (mantenimiento, etc.)

Cada sistema se compone de un tanque colector y un tanque de desinfección. Dos bombas de proceso aspiran del tanque colector a través de filtros las aguas residuales en el tanque de desinfección. Estas dos bombas están dispuestas en un dúplex, normalmente funciona una de ellas alternándose manualmente y trabajarán juntas durante los periodos de flujo punta. Cada bomba procesará aguas residuales con una capacidad de 4,2 m<sup>3</sup> / h, (8,4 m<sup>3</sup> / h, cuando funcionan las dos bombas simultáneamente) y trabajarán ambas continuamente durante los periodos de flujo punta, si así se requiere.

### 2.3.2 LHD J; Carlos I

El LHD J.Carlos I dispone para el tratamiento de aguas residuales la planta denominada “DELTA FQ-125” con siguientes características: [22]

<b>TIPO</b>		<b>FQ - 125</b>
Carga hidráulica	Máx l/d	125000 l/día
Dimensiones	Alto	3120 mm
	Ancho	5605 mm
	Largo	6700 mm
Nivel de ruido	l/min	65dB
<b>PRODUCTOS QUÍMICOS</b>	<b>CAPACIDAD TANQUE</b>	<b>CONSUMO</b>
Dosificación ozono		25 g/día
Dosificación floculante	820 l	0,75 l/día (6ppm con agua a 1/1000)
Dosificación coagulante	100 l	12,5 - 62,5 l/día (100 – 500 ppm)

**Tabla 2-3 Características de la planta FQ -125. LHD J. Carlos I [22]**

Es una unidad de tratamiento físico - químico con un funcionamiento seguro y fácil. La unidad está diseñada para procesar aguas negras y aguas grises procedentes de duchas y drenajes (residuos humanos). La planta no está diseñada para tratar grasas por lo cual los residuos abundantes de comidas (por ejemplo, comidas enteras desechadas, grandes cantidades de leche, aceites o grasas) deberían ser tratados por otros medios.

La planta podría absorber los residuos que pueden quedar en los platos, que normalmente no suponen una cantidad importante de grasa, aunque deben ser previamente tratados en un triturador para conseguir un grado de trituración inferior a 10 mm.

Los tanques, colector y de desinfección están dimensionados para dar cabida a los flujos sobrantes durante periodos de demanda punta, además de que, en caso de emergencia, actúen como tanque almacén para las aguas negras generadas durante un día de navegación en la condición de ocupación total del buque (1443 personas)

El sistema utiliza el proceso físico - químico (no biológico) con el fin de sacar partido de los muchos beneficios de este procedimiento para aplicación a bordo de buques (mantenimiento, etc.)

Cada sistema se compone de un tanque colector y un tanque de desinfección. En este buque se utiliza un tanque colector sobredimensionado para recogida "central" de las aguas residuales, a través de tres bombas de vacío. Dos bombas de proceso aspiran del tanque colector a través de filtros las aguas residuales en el tanque de desinfección. Estas dos bombas están dispuestas en un dúplex, y normalmente funciona una de ellas alternándose manualmente y trabajarán juntas durante los periodos de flujo punta.

Cada bomba procesará aguas residuales con una capacidad de 25 m<sup>3</sup> / h, 50 m<sup>3</sup> / h, cuando funcionan las dos bombas simultáneamente y trabajarán ambas continuamente durante los periodos de flujo punta, si así se requiere.

### 2.3.3 BAM

Los Buques de Acción Marítima disponen, para el tratamiento de aguas residuales, de una planta tipo físico - químico denominada FQ-15, cuya disposición general puede verse en el anexo I. La filosofía y modo de funcionamiento es similar al desarrollado tanto para la fragata F-105 como para el LHD J.Carlos I, *epígrafes 2.3.1 y 2.3.2.*

### 2.3.4 Fragatas F110

Para los buques de la serie F110 la planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra en proceso de definición en el momento de la realización de este trabajo. [23].

La especificación técnica para el diseño y dimensionado de la misma es el siguiente:

Se dispondrá de una (1) planta de tratamiento de aguas residuales con la aprobación de la OMI y de conformidad con la regla MEPC.227 [24]

El sistema de agua contaminada constará de dos (2) bombas de agua contaminada, una de reserva para la otra, que aspirarán de los tanques de agua contaminada, a través de una tubería principal especializada, y descargarán por la borda.

El espacio donde esté instalada la STP (Seguage Treatment Plant) estará provisto de un sistema de detección de ácido sulfhídrico, con alarmas acústicas y luminosas, para detectar concentraciones de este gas que puedan poner en peligro al personal.

El Buque dispondrá de cuatro (4) bombas centrífugas de descarga de aguas grises, agrupadas de dos en dos, de forma que una actúe como reserva de la otra en cada grupo.

El Buque dispondrá de dos (2) bombas de trasiego de aguas grises de desplazamiento positivo, una de ellas como reserva. Cada bomba de transferencia de aguas grises tendrá una capacidad mínima de 1,26 m<sup>3</sup>/h a 3 bar. Las bombas de trasiego de aguas grises aspirarán del tanque de aguas grises de popa y descargarán en la STP para su tratamiento.

Según la Regla 11 del Anexo IV de MARPOL, [1] la STP descargará:

Aguas grises tratadas; directamente por la borda. Aguas grises no tratadas; por la borda (cuando esté permitido) o a la conexión de cubierta. Lodos acumulados; por la borda (cuando esté permitido) o a la conexión de cubierta.

La Misión Estándar del Buque será:

90 días de duración (60 días en el mar y 30 en puerto); dos misiones estándar al año; preparación de 4 días en la Base antes de la salida; 2 días de preparación antes de la llegada; 12 días de navegación entre puertos; 6 días en puerto; el 10,5% de la navegación será en puestos de combate.

El funcionamiento de la STP será satisfactorio incluso en el caso de que los fluidos a tratar contengan lejías o detergentes duros de limpieza sanitaria.

La STP estará diseñada para un bajo mantenimiento y no producirá malos olores en el compartimento donde esté instalada. La STP debe tener en cuenta que, debido al desplazamiento del buque y al del líquido contenido, el venteo del tanque de retención puede verse obstruido. Para ello, el diseño del venteo del STP, ya sea por medios mecánicos u otros medios, debe limitar esta posibilidad.

Aguas negras, capacidad de tratamiento aproximadamente 4420 litros/día

Aguas grises, capacidad de tratamiento aproximadamente 30250 litros/día

Disposición Módulo compacto

Se comenta con personal de Detegasa (empresa adjudicataria) y todo parece indicar que la propuesta de planta es, al igual que en los buques anteriores, una planta del tipo físico – químico, ya que cumple perfectamente con todos los requisitos de la especificación, ajustándose al presupuesto disponible para tal fin.

### *2.3.5 Comparativa entre las plantas existentes en los buques de la Armada y la planta propuesta en el trabajo*

Como se ha podido comprobar en los *epígrafes 2.3.1; 2.3.2; 2.3.3 y 2.3.4* lo habitual en los buques de la Armada son las plantas de tratamiento de tipo físico - químico. Este hecho tiene una base de razonamiento que es la que se expone a continuación: [*Fuente Detegasa*<sup>8</sup>]

En un buque de la Armada es fundamental que la planta/s de tratamiento de aguas residuales cumpla las siguientes especificaciones:

1º *Versatilidad y Flexibilidad* => es necesario que la planta se adecue a los cambios de dotación y que su rendimiento sea máximo desde el momento inicial. Este hecho es el principal requisito para la elección de un tipo u otro de planta.

2º *Sencillez de mantenimiento* => se necesitan plantas cuyo uso y mantenimiento sea lo más sencillo posible dentro del cumplimiento de su objetivo principal.

3º *Economía de adquisición y operación* => se buscan plantas que, dentro del principal cometido, que evidentemente es el tratamiento de las aguas residuales en los límites establecidos por las normas, estas sean lo más económicas posible, tanto en el concepto de adquisición como en el de operación.

Por todas las razones expuestas la opción más favorable, y por lo tanto la más utilizada en los buques de la Armada, es la de las plantas de tipo físico - químico, ya que cumplen perfectamente con las especificaciones mencionadas.

El caso que nos ocupa en la realización de este TFG es la propuesta de una planta, basada en el método de adsorción, para su instalación en buques de la Armada. Método éste con limitada utilidad por sí solo debido a varias consideraciones a tener en cuenta:

1º) Tal y como se ha descrito, es una condición indispensable en este tipo de buques, el disponer de un máximo rendimiento de la planta desde el momento inicial, hecho este difícil de obtener por el método señalado.

2º) Es necesario contar con la posibilidad de eliminar/reducir una gran variedad de contaminantes, lo que nos obligaría a disponer de una planta con gran variedad de adsorbentes.

En el *epígrafe 5* del trabajo relativo a las conclusiones y líneas futuras, se profundizará este punto en base a los resultados obtenidos y se propondrán las correspondientes posibilidades de actuación.

---

<sup>8</sup> Información recabada en entrevista con el responsable de Plantas de tratamiento de aguas de la empresa Detegasa

## 2.4 Proceso de adsorción

La adsorción es el proceso por el cual se produce la separación de contaminantes presentes en un agua residual, reteniéndose estos últimos en la superficie de un material denominado adsorbente. Existe una amplia variedad de adsorbentes, siendo los más comunes: carbón activado, sílica gel, zeolitas y alúmina, entre otros. Este fenómeno tiene lugar gracias a las fuerzas intermoleculares que se producen entre el contaminante a eliminar y la superficie del material adsorbente. El objetivo de este proceso es que los residuos del agua se adhieran a la superficie del adsorbente, introduciendo éste en el seno del fluido contaminado. Posteriormente, el material se separa de la disolución. El fenómeno de adsorción es un método eficaz para la eliminación de ciertos contaminantes, tales como metales pesados, cloro, colorantes y compuestos orgánicos, entre otros. [25]

Existen distintos materiales que se pueden emplear en el método de adsorción y que poseen características en común:

- *Superficie porosa*: los materiales adsorbentes presentan poros en su superficie, los cuales facilitan la adhesión y retención de los agentes contaminantes.
- *Química superficial*: hace referencia a las propiedades y reacciones que tienen lugar en la superficie de los adsorbentes. Esta propiedad influye en la capacidad de adsorción de los materiales adsorbentes.
- *Tamaño de partícula*: los adsorbentes deben tener un tamaño de partícula adecuado para poder capturar los contaminantes del agua residual.
- *Coste*: el punto de vista económico es también un aspecto vital a la hora de seleccionar el adsorbente que se vaya a emplear.
- *Toxicidad*: se debe evitar aquellos adsorbentes que sean nocivos para los seres vivos o los ecosistemas.
- *Reutilización*: es importante evaluar su eficacia y sostenibilidad a lo largo del tiempo.

El proceso de adsorción es un proceso físico en el que se retiene una especie química en la superficie de un material llamado adsorbente. Esta retención se produce debido a las fuerzas de atracción intermoleculares entre las moléculas del adsorbato y las del adsorbente. La adsorción es ampliamente utilizada en aplicaciones industriales como la purificación de gases y líquidos, la eliminación de contaminantes y la separación de mezclas.

La adsorción es una operación unitaria de transferencia de masa. Implica un proceso por el que los átomos o moléculas de una sustancia, que se encuentra en una fase determinada, son retenidos en la superficie de otra sustancia que se encuentra en una fase distinta (generalmente un sólido poroso) y como resultado de este proceso se forma una capa de líquido o gas en la superficie de la sustancia retenedora. Por eso se considera la adsorción como un fenómeno superficial. [26]

El sólido que adsorbe es el adsorbente y la sustancia que se concentra en la superficie se denomina adsorbato.

El proceso considerado es exotérmico, el calor es debido a la condensación del adsorbato más la energía generada en la unión adsorbente - adsorbato. La desorción es el proceso inverso de la adsorción y constituye un proceso endotérmico. [27]

La siguiente es una descripción general del proceso de adsorción:

- 1) *Mezcla de la solución o gas con el material adsorbente*: la solución contaminada se mezcla con el material adsorbente, que puede ser un sólido, líquido o gel.
- 2) *Adsorción del contaminante*: el contaminante se adhiere a la superficie del material adsorbente a través de fuerzas van der Waals, electrostáticas o de superficie.

- 3) *Retención del contaminante*: el contaminante se retiene en el material adsorbente hasta que se alcanza su capacidad máxima de adsorción.
- 4) *Regeneración del material adsorbente*: después de alcanzar su capacidad máxima, el material adsorbente se puede regenerar mediante calentamiento, cambio de presión, cambio de pH o mediante la aplicación de un producto químico específico.
- 5) *Separación del material adsorbente y la solución purificada*: finalmente, el material adsorbente se separa de la solución purificada y se puede reutilizar en una nueva operación de adsorción.

El proceso de adsorción se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la purificación de agua, el tratamiento de gases, la separación de compuestos y la eliminación de contaminantes tóxicos.

La acumulación por unidad de área es pequeña, por lo que se prefieren los sólidos altamente porosos con áreas internas muy grandes por unidad de volumen.

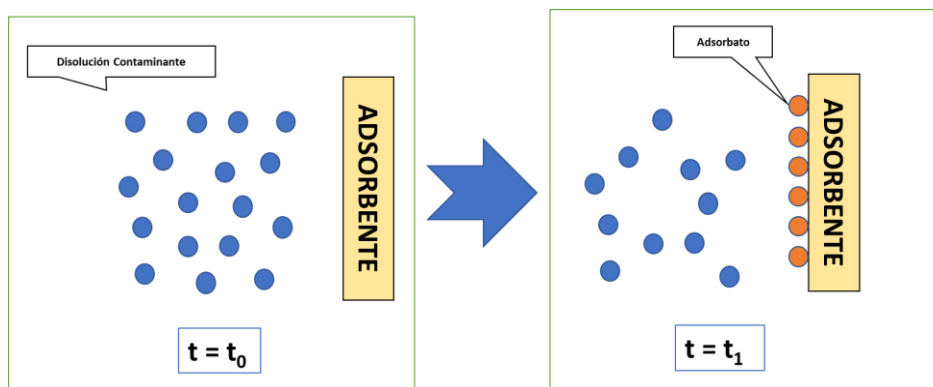


Figura 2-3 Proceso de adsorción

#### a) *Adsorción Física:*

Llamada también fisorción. Es un tipo de adsorción en el que las moléculas se adsorben a una superficie sólida debido a fuerzas físicas, como la Van der Waals. [28]

Las fuerzas de Van der Waals son interacciones débiles entre moléculas que no están ionizadas. Son un tipo de interacción intermolecular y se deben a fluctuaciones de la distribución electrónica en las moléculas, que crean momentos dipolares momentáneos.

Las fuerzas de Van der Waals son mucho más débiles que las fuerzas iónicas o covalentes, pero juegan un papel importante en la estabilidad de muchas moléculas y en la interacción de moléculas con superficies sólidas.

En la fisorción, las moléculas se unen a la superficie sólida a través de interacciones débiles, como las fuerzas de atracción entre moléculas. y los calores de adsorción son bajos.

La fisorción es reversible y las moléculas pueden desadsorberse fácilmente si se aumenta la temperatura o la presión.

La fisorción es importante en aplicaciones como la separación de gases, la purificación de líquidos y la remoción de contaminantes. También se utiliza en la producción de materiales porosos y en la investigación de la estructura de superficies sólidas.

Hay muchos modelos matemáticos que describen la fisorción, como la isoterma de Langmuir (se desarrollará posteriormente a lo largo del epígrafe), que describe la relación entre la concentración de las moléculas en el medio y la cantidad adsorbida en la superficie.



Es importante tener en cuenta que la fisisorción puede ser influenciada por muchos factores, como la temperatura, la presión y la composición de la superficie, por lo que puede ser necesario utilizar modelos más complejos en algunos casos

#### *b) Adsorción Química:*

Denominada también quimisorción. Es un tipo de adsorción en el que las moléculas se adsorben a una superficie sólida a través de enlaces químicos fuertes. A diferencia de la fisisorción, que se basa en fuerzas físicas débiles, la quimisorción produce una unión mucho más fuerte entre las moléculas y la superficie sólida. Esto significa que las moléculas adsorbidas son más difíciles de desadsorber y que la adsorción es mucho más selectiva, permitiendo la separación de moléculas específicas.

La quimisorción se utiliza en aplicaciones como la producción de catalizadores, la purificación de gases y líquidos, y la remoción de contaminantes. También se utiliza en la investigación de la estructura de superficies sólidas y en la producción de materiales con propiedades específicas. [28]

Hay muchos modelos matemáticos que describen la quimisorción, como la isoterma de Freundlich (se desarrollará posteriormente a lo largo del epígrafe), que describe la relación entre la concentración de las moléculas en el medio y la cantidad adsorbida en la superficie.

Es importante tener en cuenta que la quimisorción puede ser influenciada por muchos factores, como la composición de la superficie y la presencia de impurezas, por lo que puede ser necesario utilizar modelos más complejos en algunos casos.

### *2.4.1 Cinética de adsorción*

La cinética de adsorción puede definirse como el estudio del proceso en el que un material retiene un contaminante en una solución y el tiempo que tarda en efectuarse dicha operación. Existen tres etapas fundamentales en la cinética de adsorción: rapidez inicial, tasa de alcance de la máxima capacidad y tasa de retención constante. Se tratan de procesos que pueden ser modelados de forma matemática, con el objetivo de poder comprender mejor el proceso de adsorción, a la vez que se optimizan los diseños de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. [29]

Cuando la fase sólida (adsorbente) entra en contacto con la solución donde está presente el soluto a tratar, éste comienza a concentrarse sobre la superficie del sólido, con la subsecuente disminución de su concentración en la fase líquida, hasta que se alcanza equilibrio entre el líquido y la fase sólida. [30]

Si se representa en una gráfica la concentración de adsorbato en la disolución en función del tiempo, va a disminuir según transcurra éste hasta un valor que denominamos  $C_e$  (Concentración en el equilibrio). Esto es:

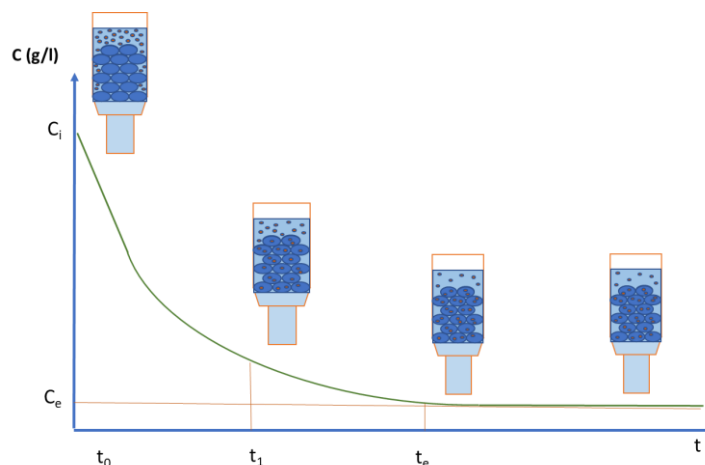


Figura 2-4 Cinética de adsorción I

Cuando se estudia el fenómeno de adsorción también se monitoriza lo que ocurre en el sólido:

Inicialmente, el sólido se encuentra completamente libre de moléculas de adsorbato, pero cuando se pone en contacto con la solución las moléculas de adsorbato van a migrar poco a poco hacia la superficie del adsorbente. Conforme transcurre el tiempo la cantidad de moléculas de adsorbato presentes en la superficie del sólido va a aumentar gradualmente hasta llegar a un valor constante. [30]

La cantidad de adsorbato por unidad de masa de adsorbente se denomina “capacidad de adsorción ( $q_t$ )”. Esta capacidad de adsorción se estima con un balance de materia.

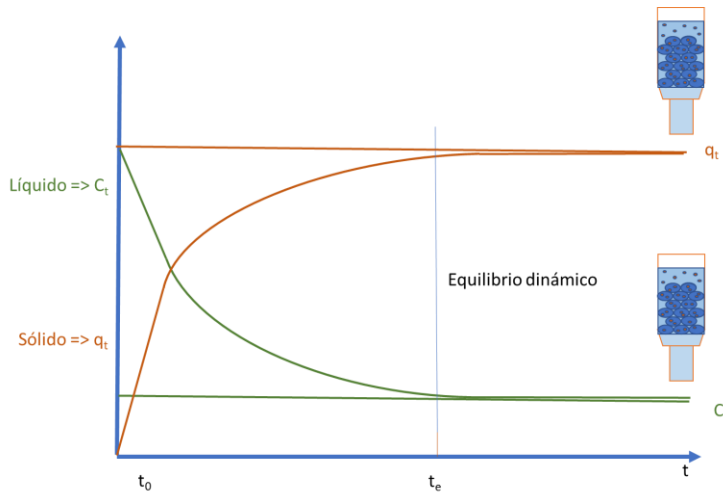


Figura 2-5 Cinética de adsorción II

Los datos de “ $q_e$ ” y “ $C_e$ ” son los utilizados para construir las isotermas.

Si se efectúa este proceso cinético para diferentes concentraciones iniciales, incrementando la concentración de adsorbato en la disolución, para cada uno de estos matraces vamos a obtener una cinética como la descrita y para cada uno vamos a obtener un dato de capacidad en el equilibrio y concentración en el equilibrio.

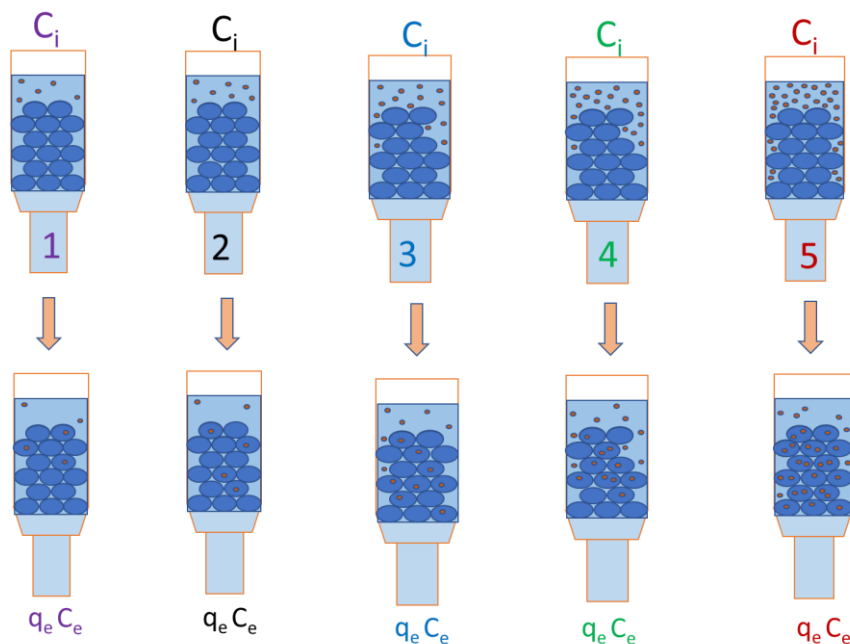


Figura 2-6 Cinética de adsorción III

Si se realiza la gráfica de capacidad de remoción con respecto al tiempo para cada uno de estos sistemas, obtenemos una familia de curvas en las cuales vamos a poder obtener para cada curva una “ $q_e$ ” y una “ $C_e$ ”

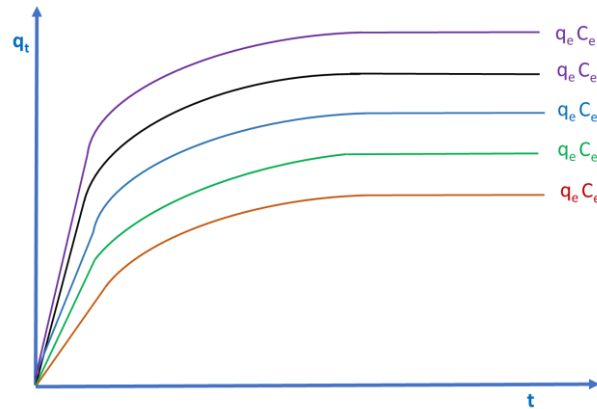


Figura 2-7 Cinética de adsorción IV

Es con esos puntos con los que se va a construir la isoterma de adsorción. Cada concentración en equilibrio con su respectiva capacidad en equilibrio que se obtuvo con cada una de las cinéticas a diferentes concentraciones iniciales, las situamos en unos ejes  $q_e / C_e$ , dando como resultado una gráfica de puntos como la que se muestra:

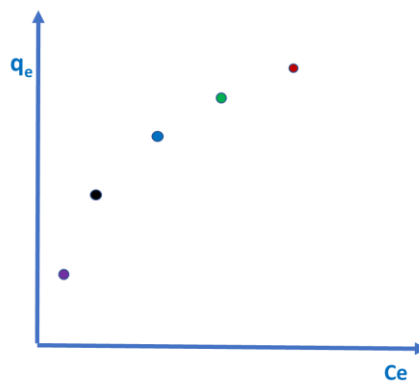


Figura 2-8 Cinética de adsorción V

Es precisamente con todos estos puntos con los que se construye la isoterma de adsorción. Cada concentración en equilibrio con su respectiva capacidad en equilibrio, que se obtuvo con cada una de las cinéticas a diferentes concentraciones iniciales están en esta gráfica, denominándose isoterma de adsorción.

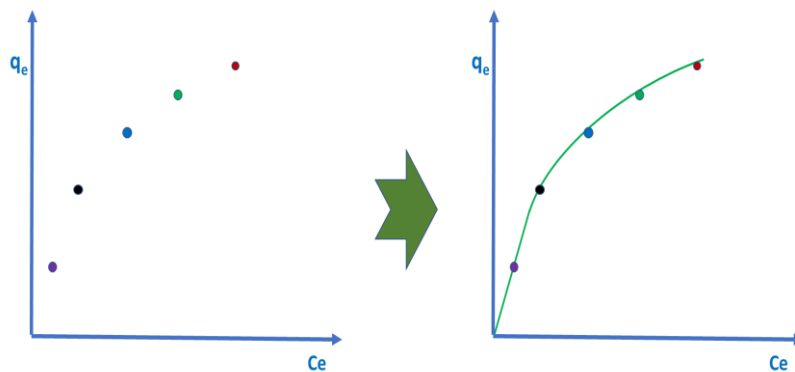


Figura 2-9 Cinética de adsorción VI

*Equilibrio de adsorción [29]*

La mejor forma de plantear la relación de equilibrio entre el adsorbente y el adsorbato es a través de la relación masa de adsorbato adsorbida por unidad de masa del adsorbente (a), en función de la concentración de equilibrio  $C_e$  a temperatura constante, por lo que la adsorción puede definirse como:

$a = \frac{V}{m} (C_i - C_e)$	a = masa de adsorbato adsorbida por unidad de masa de adsorbente (g/kg)
	V = volumen inicial de la solución (L)
	m = masa de adsorbente (kg)
	$C_i$ = concentración inicial de disolución (g/L)
	$C_e$ = concentración de equilibrio de disolución (g/L)

**2.4.2 Isoterma de adsorción**

Con todo lo expuesto anteriormente, se puede definir una isoterma de adsorción como la expresión de la variación de la adsorción con la concentración a temperatura constante. [31]

Las isotermas se utilizan para caracterizar las propiedades de adsorción de un material y para predecir su comportamiento en diferentes condiciones.

Hay varios tipos de isotermas, incluyendo isotermas lineales, de Langmuir y de Freundlich. Cada tipo de isoterma describe una relación diferente entre la cantidad de material adsorbido y la presión o concentración del gas o líquido, lo que permite inferir diferentes características del proceso de adsorción.

Isoterma de Langmuir

La isoterma de Langmuir es un modelo matemático que describe la adsorción de moléculas en una superficie sólida. Se basa en la hipótesis de que la adsorción se lleva a cabo a través de puestos de adsorción específicos, y que la probabilidad de que una molécula se adsorba a un puesto depende de la concentración de moléculas en el medio y la energía necesaria para ocupar el puesto. [28]

La isoterma de Langmuir se representa matemáticamente como una curva que relaciona la concentración de las moléculas en el medio con la cantidad adsorbida en la superficie. La forma de la curva y la posición a la que se corta el eje de concentración dependen de la energía necesaria para ocupar los puestos de adsorción y la cantidad de puestos disponibles.

La isoterma de Langmuir es útil para predecir la adsorción de moléculas en materiales como los catalizadores y los materiales porosos, y se utiliza en aplicaciones como la separación de gases y la remoción de contaminantes. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el modelo no siempre es aplicable a todos los casos de adsorción y puede ser necesario utilizar modelos más complejos en algunos casos. [31]

$q_e = \frac{q_m * b * C_e}{1 + b * C_e}$	<b><math>q_m</math></b> = El valor máximo al que tiende $q_e$ . Representa la concentración del adsorbato sobre el adsorbente cuando se completa una capa monomolecular en la superficie del mismo.
	<b><math>C_e</math></b> = concentración de la sustancia en la solución.
	<b>b</b> = parámetro de la ecuación.

### Isoterma de Freundlich

La isoterma de Freundlich es un modelo matemático que describe la relación entre la concentración de una sustancia en una solución y la cantidad de esa sustancia adsorbida en una superficie sólida. Se utiliza principalmente para describir la quimisorción. [31]

La isoterma de Freundlich se representa por la siguiente ecuación:

$q_e = k \cdot C_e^n$	$q_e$ = la cantidad de sustancia adsorbida.
	$C_e$ = concentración de la sustancia en la solución.
	$k$ = constante específica de la superficie.
	$n$ = parámetro que describe la intensidad de la adsorción.

La isoterma de Freundlich se usa comúnmente para describir la adsorción en superficies heterogéneas, es decir, superficies con poros de diferentes tamaños y formas. Es importante tener en cuenta que la isoterma de Freundlich solo se aplica a un rango limitado de concentraciones y que puede no ser válida para concentraciones muy altas, o muy bajas.

En general, la isoterma de Freundlich es una herramienta útil para describir y predecir la adsorción en superficies sólidas y se utiliza ampliamente en aplicaciones como la purificación de gases y líquidos, la producción de catalizadores y la remoción de contaminantes. [28]

### Otras isotermas de adsorción

Además de las isotermas planteadas existen muchas más isotermas, las cuales emplean tres o más parámetros en sus ecuaciones matemáticas. Estas ecuaciones derivan de las ecuaciones de Langmuir y de Freundlich [31] [28]

## 2.5 Tipos de adsorbentes

Los adsorbentes son materiales que tienen una superficie grande y porosa y que son capaces de retener moléculas y átomos en su superficie. Son materiales naturales o sintéticos de estructura amorfa y microcristalina. Los utilizados en gran escala son el carbón activo, la alúmina activa, la zeolita, el gel de sílice, la tierra de Fuller, otras arcillas, etc... [32]

Se han desarrollado muchos adsorbentes para una amplia gama de separaciones. Por norma, los adsorbentes tienen forma esférica, pequeños gránulos cuyos tamaños comprenden de 0.1 mm a 12 mm. Una partícula de adsorbente tiene una estructura muy porosa, con numerosos poros muy finos, cuyo volumen alcanza hasta el 50 % del volumen total de la partícula.

Existen varios adsorbentes comerciales y algunos de los principales se describen a continuación (los más utilizados). Se caracterizan por grandes áreas superficiales de los poros, las cuales van desde 100 m<sup>2</sup> /g hasta más de 2000 m<sup>2</sup> /g. [33]

TIPO	DESCRIPCIÓN
<i>Carbón activado</i>	<p>El carbón activado es un material altamente poroso que se produce a partir de materiales orgánicos carbonosos (como madera, cáscaras de coco, turba, etc.) que se someten a un proceso de activación con dióxido de carbono o vapor a alta temperatura y bajo presión.</p> <p>Este proceso descompone los componentes orgánicos y aumenta la porosidad del carbón, lo que lo convierte en un material altamente eficiente para la adsorción de impurezas y contaminantes.</p> <p>El carbón activado se utiliza comúnmente en la purificación de agua y aire, la eliminación de gases tóxicos y el tratamiento de líquidos. También se utiliza en la industria farmacéutica, alimentaria y en la producción de productos químicos.</p> <p>Tiene áreas superficiales de 300 a 1200 m<sup>2</sup> /g con un promedio de diámetro de poro de 10 a 60 Å.</p> <p>Las sustancias orgánicas generalmente adsorben carbón activado.</p>
<i>Gel de sílice</i>	<p>El gel de sílice es un material altamente poroso compuesto principalmente de silicato de sodio y silicato de aluminio. Se produce a partir de la reacción entre sílices y ácidos alcalinos. La porosidad y la superficie elevada que poseen los convierten en materiales eficientes para la adsorción y separación de moléculas y compuestos.</p> <p>Se fabrica tratando con ácido una solución de silicato de sodio y luego secándola. Tiene un área superficial de 600 a 800 m<sup>2</sup> /g y un promedio de diámetro de poro de 20 a 50 Å. La porosidad y la superficie elevada de los gélicos de sílices los convierten en materiales eficientes para la adsorción y separación de moléculas y compuestos.</p> <p>Se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la purificación de líquidos, la separación de compuestos en la industria química, la deshidratación de gases y la eliminación de impurezas en la industria farmacéutica. También se utiliza como desecante y en la fabricación de productos electrónicos y catalizadores.</p>
<i>Alúmina activada</i>	<p>La alúmina activada es un material poroso formado a partir de la alúmina (un tipo de aluminio hidratado) que se somete a un proceso de activación para aumentar su porosidad. Este proceso puede incluir la exposición a altas temperaturas o la impregnación con soluciones alcalinas.</p> <p>Para preparar este material se activa el óxido de aluminio hidratado calentándolo para extraer el agua. Las áreas superficiales fluctúan entre 200 y 500 m<sup>2</sup> /g con un promedio de diámetro de poro de 20 a 140 Å.</p> <p>La alúmina activada es un material altamente eficiente para la adsorción de impurezas y contaminantes, y se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la purificación de agua y aire, la eliminación de gases tóxicos y el tratamiento de líquidos. También se utiliza en la industria farmacéutica, alimentaria y en la producción de productos químicos. Se usa ante todo para secar gases y líquidos.</p>
<i>Polímeros o resinas sintéticas</i>	<p>Las resinas sintéticas son materiales poliméricos producidos artificialmente a partir de monómeros sintéticos. Estos monómeros se unen mediante procesos de polimerización para formar polímeros de gran tamaño y estructura definida.</p> <p>Las resinas sintéticas pueden ser termoestables o termoplásticas, y su composición y propiedades pueden ser diseñadas y modificadas para satisfacer requisitos específicos en una amplia variedad de aplicaciones. Se utilizan en la fabricación de productos como materiales de construcción, productos electrónicos, revestimientos y adhesivos. También se utilizan en la purificación y separación de compuestos, como en la fabricación de resinas de intercambio iónico y en la eliminación de impurezas y contaminantes.</p>

<b>TIPO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<i>Zeolitas</i>	<p>Las zeolitas son aluminosilicatos microporosos que se utilizan como adsorbentes para la purificación de agua y gases y la eliminación de compuestos tóxicos.</p> <p>Se encuentran naturalmente en la naturaleza y también se pueden producir sintéticamente.</p> <p>El tamaño uniforme del poro es diferente al de otros tipos de adsorbentes. Las diversas zeolitas tienen tamaños de poro que van de cerca de 3 a 10 Å.</p> <p>Las zeolitas tienen una alta superficie específica y porosidad, lo que las convierte en materiales altamente eficientes para la adsorción de moléculas y compuestos. Se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la purificación de líquidos, la separación de compuestos en la industria química, la deshidratación de gases y la eliminación de impurezas en la industria farmacéutica.</p> <p>También se utilizan en la fabricación de productos electrónicos y como catalizadores.</p>
<i>Polímeros o resinas sintéticas</i>	<p>Las resinas sintéticas son materiales poliméricos producidos artificialmente a partir de monómeros sintéticos. Estos monómeros se unen mediante procesos de polimerización para formar polímeros de gran tamaño y estructura definida.</p> <p>Las resinas sintéticas pueden ser termoestables o termoplásticas, y su composición y propiedades pueden ser diseñadas y modificadas para satisfacer requisitos específicos en una amplia variedad de aplicaciones. Se utilizan en la fabricación de productos como materiales de construcción, productos electrónicos, revestimientos y adhesivos. También se utilizan en la purificación y separación de compuestos, como en la fabricación de resinas de intercambio iónico y en la eliminación de impurezas y contaminantes.</p>

**Tabla 2-4 Tipos más habituales de adsorbentes**

Estos son solo algunos ejemplos de los tipos de adsorbentes disponibles. La elección del adsorbente adecuado depende de las características del compuesto a ser adsorbido y de las condiciones del proceso.

El adsorbente que más se suele usar en las máquinas de adsorción es el gel de sílice como la sustancia más común y también carbón activo, alúmina y zeolitas, pero en menor medida.

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Metodología

En este apartado se expone la metodología del trabajo realizado, comenzando por el flujo general de trabajo, la descripción de los materiales necesarios para la ejecución del mismo, el diseño de la planta y finalizando con el desarrollo experimental. En el desarrollo del trabajo se ha hecho una revisión bibliográfica y entrevistas con personal de la empresa Detegasa.

#### 3.1.1 Flujo de trabajo

Se establece un flujo de trabajo que nos permitirá, partiendo de unas especificaciones básicas y un esquema inicial de diseño de la planta basado en trabajos anteriores, [10] realizar una lógica de actuaciones encaminadas a la consecución de los objetivos marcados en el *epígrafe 1.3*.

Para el desarrollo del TFG se parte de una especificación que permita centrar los objetivos de los experimentos y tomar las decisiones pertinentes. Se establecen los siguientes puntos de especificación:

- 1º Planta piloto basada en proceso de adsorción.
- 2º Análisis y comparativa de resultados con trabajos anteriores [9] [10].
- 3º Adecuación a su utilización en buques de la Armada.

El diagrama de flujo de trabajo, partiendo de las especificaciones de diseño y finalizando con las líneas de trabajo futuras, para la consecución de los objetivos marcados es el que se muestra a continuación:



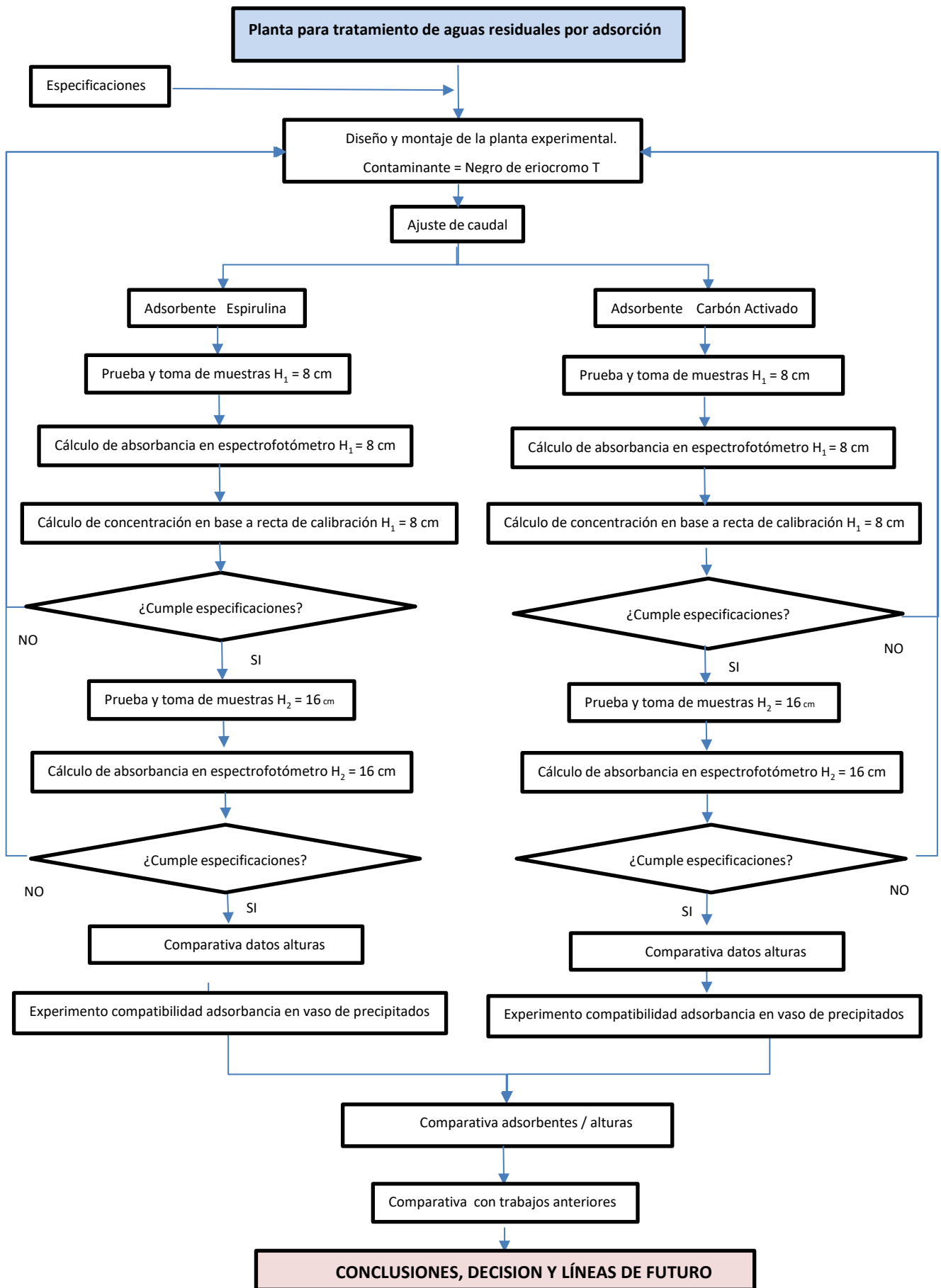


Figura 3-1 Flujo de trabajo

### 3.1.2 Propuesta de diseño del proceso / planta

Se propone un diseño basado en experiencias anteriores, aprovechando las lecciones aprendidas en los mismos, de cara a la consecución de un diseño de la planta lo más eficiente posible. La base de trabajo es la desarrollada en el trabajo del AN Maza Fernández [10].

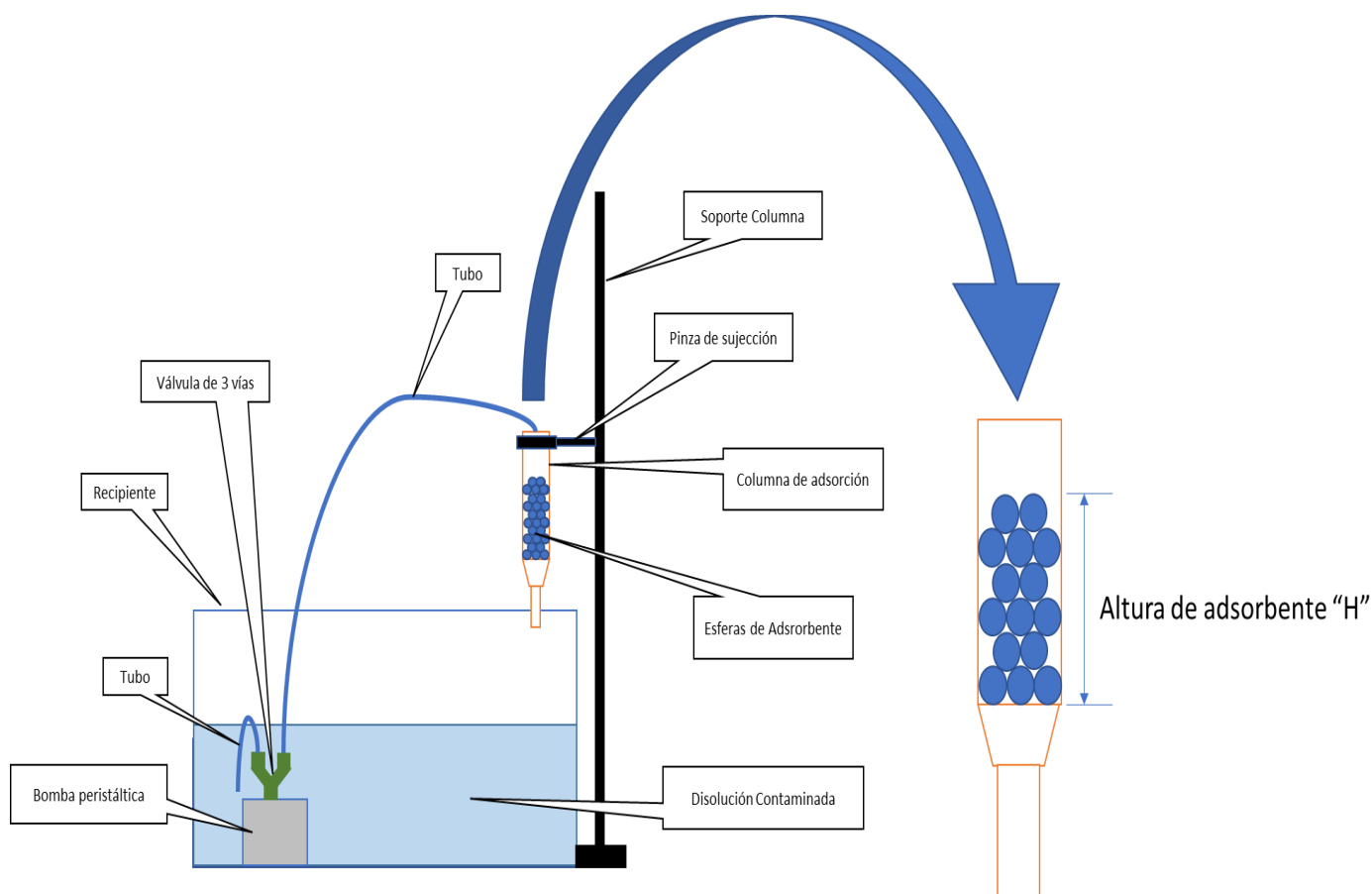


Figura 3-2 Diseño de la planta

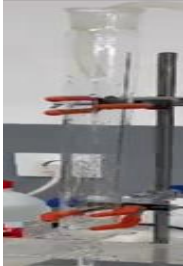





Se propone una planta como la mostrada en el esquema, con el siguiente flujo de funcionamiento:

Se parte de un recipiente en el que se encuentra la disolución contaminada a una concentración determinada, en nuestro caso el contaminante será “Negro de eriocromo T”, tal y como se señala en el [epígrafe 3.1.5](#). Con una bomba peristáltica, y a través de tubo flexible, llevamos la disolución elevándola hasta la torre de adsorción, donde se encuentra el adsorbente en las proporciones señaladas.

Se pone en marcha el sistema, lo que hace que se produzca la circulación de disolución contaminada, haciendo que ésta pase por el adsorbente estando en contacto con el mismo y retornando al recipiente original.

Se toman muestras de la disolución en intervalos de tiempo previamente establecidos, analizando los resultados y comprobando si disminuye la concentración del contaminante en la disolución, para de esta forma analizar la bondad del proceso.

### 3.1.3 Materiales utilizados en el diseño de la planta

DESCRIPCIÓN	USO	IMAGEN
Columna de adsorción	Se utiliza como recipiente para el material adsorbente, en su interior depositaremos las esferas de adsorbente por el que haremos pasar la disolución. Como columna de adsorción utilizaremos un matraz de 40 cm, de altura y 3,9 cm. de diámetro.	
Bomba periestáltica	Se utiliza para impulsar la disolución desde el recipiente y a través del tubo hasta la torre de adsorción. Puede trabajar a una altura máxima de 120 cm con un caudal máximo de 600 l/h.	
Válvula de tres vías	Se utiliza para controlar el caudal de disolución que circula por el circuito, de manera que se consiga un flujo continuo en el mismo.	
Tubo flexible	Se utiliza para transportar la disolución desde la bomba hasta la columna de adsorción.	
Recipiente	Se utiliza para depositar la disolución contaminada. En su interior está situada la bomba.	
Soportes y sujeciones	Se utilizan para sujetar tanto la columna de adsorción como el tubo por el que circula la disolución.	

**Tabla 3-1 Materiales utilizados en el diseño de la planta piloto**

El resultado del montaje de la planta experimental expuesta en el *epígrafe 3.1.2*, utilizando los materiales descritos en el *epígrafe 3.1.3* es el que se muestra:



Figura 3-3 Resultado del montaje de la planta

3.1.4 Materiales utilizados en la realización del experimento

DESCRIPCIÓN	USO	IMAGEN
Espectrofotómetro PerkinElmer Lambda XLS	Se utiliza para obtener los datos de concentración de contaminante en la disolución en base a datos de absorbancia obtenidos de las distintas muestras de dicha disolución.	
Matraces	Empleados para la medición exacta de cantidades (500ml o 1l) de distintas disoluciones, así como de agua desionizada.	
Tubos de ensayo	Se utilizan para la toma de muestras de la disolución y posterior análisis de concentración en el espectrofotómetro.	
Agitador magnético	Empleado para mezclar los componentes de una disolución.	

Tabla 3-2 Materiales utilizados en el experimento

### 3.1.5 Contaminante y Material adsorbente a utilizar

Para la realización del experimento se propone la utilización del colorante “negro de eriocromo T” tal y como se muestra en la siguiente figura:

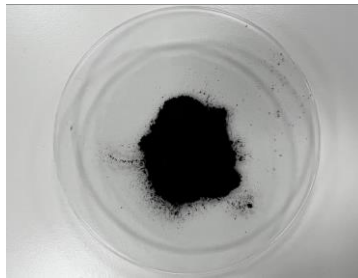


Figura 3-4 Negro de eriocromo T

El negro de eriocromo, que vamos a emplear como contaminante disuelto en agua destilada posee las siguientes características químicas [34]

<b>Fórmula molecular</b>	$C_{20}H_{12}N_3O_7SNa$
<b>Masa Molar</b>	461,38 g/mol
<b>Densidad</b>	900 kg/m <sup>3</sup>

Tabla 3-3 Características del contaminante "negro de eriocromo T"

El negro de eriocromo T es un colorante azoico:

Los colorantes azoicos son colorantes sintéticos utilizados en una gran variedad de productos, tales como textiles, papel, alimentos y cosméticos. Estos colorantes se caracterizan por su brillo y estabilidad a la luz y a la temperatura, lo que los hace ideales para su uso en productos que requieren colores intensos y duraderos.

Algunos colorantes azoicos pueden ser tóxicos y pueden liberar compuestos potencialmente dañinos para la salud y el medio ambiente. Por ejemplo, algunos colorantes azoicos se han relacionado con efectos adversos en la salud tales como, alergias, irritaciones de piel y problemas hormonales. Además, algunos colorantes azoicos pueden liberar aminas aromáticas:

Las aminas aromáticas son compuestos químicos que contienen un grupo amina ( $-NH_2$ ) unido a un anillo aromático, un grupo de compuestos carbonados altamente reactivos y estructuralmente similares a los aminoácidos. Algunas aminas aromáticas pueden ser tóxicas y se consideran contaminantes ambientales, especialmente en aguas residuales y efluentes industriales.

El control y la eliminación de aminas aromáticas en las aguas residuales es importante para proteger la salud humana y el medio ambiente. Hay varios métodos disponibles para tratar y remover aminas aromáticas de las aguas residuales, incluyendo procesos biológicos, físicos y químicos.

Por todo lo expuesto, en algunos países se han establecido regulaciones para limitar o prohibir el uso de ciertos colorantes azoicos en productos alimentarios y textiles. Además, existen alternativas más seguras y sostenibles disponibles, como colorantes naturales o colorantes sintéticos más seguros.

Asimismo, el negro de eriocromo es un indicador metalcrómico o complexométrico que forma parte de las valoraciones complexométricas, por ejemplo, en el proceso de determinación de la dureza del agua. [35]

Un indicador metalcrómico es un compuesto químico que cambia de color cuando se encuentra en un medio con un pH diferente. Estos compuestos se utilizan comúnmente en la industria y en el laboratorio para determinar el pH de una solución.

Los indicadores metalcrómicos funcionan a través de la formación de iones en un medio con un pH determinado, lo que a su vez cambia la absorción de luz y el color del compuesto. Son fáciles de usar y ofrecen una forma rápida y económica de determinar el pH de una solución. Además, algunos indicadores metalcrómicos se pueden utilizar para determinar un rango amplio de pH, lo que los hace ideales para una variedad de aplicaciones. [35]

Un indicador complexométrico es un compuesto químico que se utiliza para determinar la concentración de un ion metálico en una solución. Estos indicadores funcionan al formar complejos estables con los iones metálicos, lo que a su vez cambia la absorción de luz y el color del compuesto.

Los indicadores complexométricos se utilizan comúnmente en la industria y en el laboratorio para determinar la concentración de iones metálicos como el hierro, el cobre y el cinc. Ofrecen una forma precisa y confiable de determinar la concentración de iones metálicos en una solución. Además, algunos indicadores complexométricos se pueden utilizar para determinar la concentración de una amplia variedad de iones metálicos. [35]

Destacar a modo de curiosidad que “Eriocromo” es un término metonímico ya que es una marca comercial de “Huntsman Petrochemical”


Se parte de una concentración inicial de 1,035 g/l.

Al hacer la disolución con la primera concentración, se observa que está excesivamente oscura, ya que se trata de un colorante muy potente y nuestra planta no iba a ser capaz de descontaminarla debido a la elevada concentración de colorante. Como el objetivo es demostrar que el método de adsorción funciona en el diseño de la planta piloto, se opta por diluir la concentración para una mejor comprensión de los resultados.

Se analizará la variación de contaminante a lo largo del tiempo (cinemática de adsorción) durante tres horas interaccionando con cada uno de los adsorbentes previstos.

En el estudio de nuestra planta piloto se propone la utilización de dos tipos de adsorbentes, decisión basada en que ya se utilizaron en trabajos anteriores [10, 9] y, por lo tanto, nos permitirá la comparativa de los resultados que se obtengan con los ya obtenidos en dichos trabajos.

Los mencionados adsorbentes son: *Espirulina* y *Carbón Activado*.

ADSORBENTE	DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS
<p>Espirulina platensis</p> 	<p>Las dos especies más estudiadas de espirulina son <i>Arthrospira máxima</i> y <i>Arthrospira platensis</i>, las cuales tienen diferencias en su composición y morfología.</p> <p>La espirulina (<i>Arthrospira platensis</i>) se utiliza como un adsorbente natural en la purificación de agua y la eliminación de compuestos tóxicos. La estructura de la espirulina, con su superficie porosa y su alto contenido de proteínas y lípidos, la hace ideal para la adsorción de compuestos tóxicos, como metales pesados y compuestos orgánicos. [36]</p>



ADSORBENTE	DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS
<p>Espirulina platensis</p> 	<p>Es biodegradable, no tóxica y fácil de cultivar, lo que la hace una opción atractiva para la purificación de agua en comparación con otros adsorbentes sintéticos.</p> <p>La espirulina platensis es una microalga del tipo cianobacteria que se caracteriza por una gran concentración en nutrientes.</p> <p>Se compone de ácidos grasos, vitaminas, minerales, carbohidratos, ácidos nucleicos, pigmentos y, sobre todo, de un altísimo porcentaje de proteínas. Por todo ello se considera una microalga con múltiples propiedades beneficiosas para la salud.</p> <p>El nombre espirulina viene derivado de la forma espiral de los filamentos que la componen.</p> <p>Es una cianobacteria microscópica azul-verdosa, donde el color azul procede de la ficocianina presente y el verde de la clorofila.</p> <p>La gran importancia que tiene la espirulina no sólo se debe a las propiedades beneficiosas comentadas, sino que, a mayores, de ella se obtienen aplicaciones muy interesantes a nivel industrial y medicinal.</p> <p>La espirulina tiene una gran capacidad de adsorber metales, y por lo tanto, se utiliza en el tratamiento de aguas residuales. Elimina nitrógeno, fósforo y otros metales pesados del agua, generando así biomasa con posibles utilidades en la industria.</p> <p>La propiedad de adsorber metales tiene una desventaja y es que implica que la presencia de éstos en el medio donde se cultive puede hacer que no sea apta para consumo. Hecho importante a tener en cuenta.</p>
<p>Carbón Activado</p> 	<p>El carbón activado es un material que se prepara en la industria para garantizar una elevada superficie interna y así poder adsorber sobre su superficie una gran cantidad de compuestos muy diversos. [37] [38]</p> <p>Es un adsorbente ampliamente utilizado debido a su gran superficie y alta porosidad. Estas características hacen que el carbono activado sea efectivo para la adsorción de compuestos tóxicos y compuestos orgánicos volátiles.</p> <p>Se puede producir a partir de diversos materiales de origen, como madera, turba, cáscaras de coco y residuos de la industria petroquímica. La activación química o térmica del material se realiza para aumentar su superficie y porosidad.</p> <p>Es biodegradable y no tóxico, lo que lo hace una opción atractiva para la purificación de agua y aire.</p> <p>La principal característica en las que se basan las aplicaciones del carbón activado es la elevada capacidad de eliminación de sustancias. Ésta se produce gracias a su alta superficie interna, al igual que su porosidad y distribución de tamaño de poros. Gracias a su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, es ideal para la retención de moléculas apolares y de alto volumen molecular, como, por ejemplo: hidrocarburos, fenoles y colorantes.</p> <p>Se encuentra en el mercado en forma granular o en forma de polvo, siendo este último el que presenta una mayor efectividad en los procesos de adsorción debido a su elevada área superficial.</p>

Tabla 3-4 Adsorbentes utilizados en planta piloto

Para el contaminante seleccionado se propone la realización del experimento con cada uno de los adsorbentes elegidos para, de este modo, obtener una matriz de datos que nos permita extraer el mayor número de conclusiones posibles.

Se realizará el experimento con dos alturas de adsorbente en la torre, como se verá con más profundidad en epígrafes posteriores, hecho este que nos permitirá extraer una relación entre la cantidad de adsorbente (superficie) y la bondad del proceso realizado.

### *3.1.6 Descripción del proceso*

En este apartado se realiza una descripción general del proceso, aplicándose éste al contaminante especificado y con cada uno de los adsorbentes propuestos.

Realizada la parte experimental se analizarán los datos obtenidos para la extracción de conclusiones y propuesta de líneas trabajo futuras.

#### *Montaje de la planta*

En un primer paso se realiza el montaje de la planta hasta llegar a una solución como la mostrada en el croquis adjunto en el *epígrafe 3.1.2*. Esta solución de diseño está basada en las lecciones aprendidas de trabajos anteriores [10], evitando de este modo la necesidad de diseños previos para la optimización del mismo.

El proceso de trabajo hasta la consecución del diseño final de la planta es el que se expone a continuación:

Una vez montados todos los elementos, el paso fundamental es la consecución de un caudal que nos permita un flujo de disolución en la torre sin que se produzcan reboses, pero que mantenga la torre siempre con un flujo de disolución en la zona del adsorbente.

1° Se monta el sistema con una primera bomba que nos proporciona un caudal máximo de 600 l/h. y se prueba con agua destilada. Se comprueba que aún en el mínimo de caudal se producen reboses.

2° Se decide adquirir una bomba de menor potencia y caudal regulable, la cual ofrece un caudal máximo de 300 l/h.

3° Aún con la nueva bomba se producían reboses, por lo que se decide emplear la válvula de tres vías con la bomba inicial. La válvula está conectada a la bomba y de ella salen dos tubos, uno primero de retorno al recipiente, y un segundo que conecta con la columna.

De esta manera se consigue un caudal de entrada en la columna adecuado al de salida de la misma a la vez que no forzamos el motor de la bomba, gracias a la regulación con el tubo de retorno.

#### *Realización de la recta de calibración del contaminante*

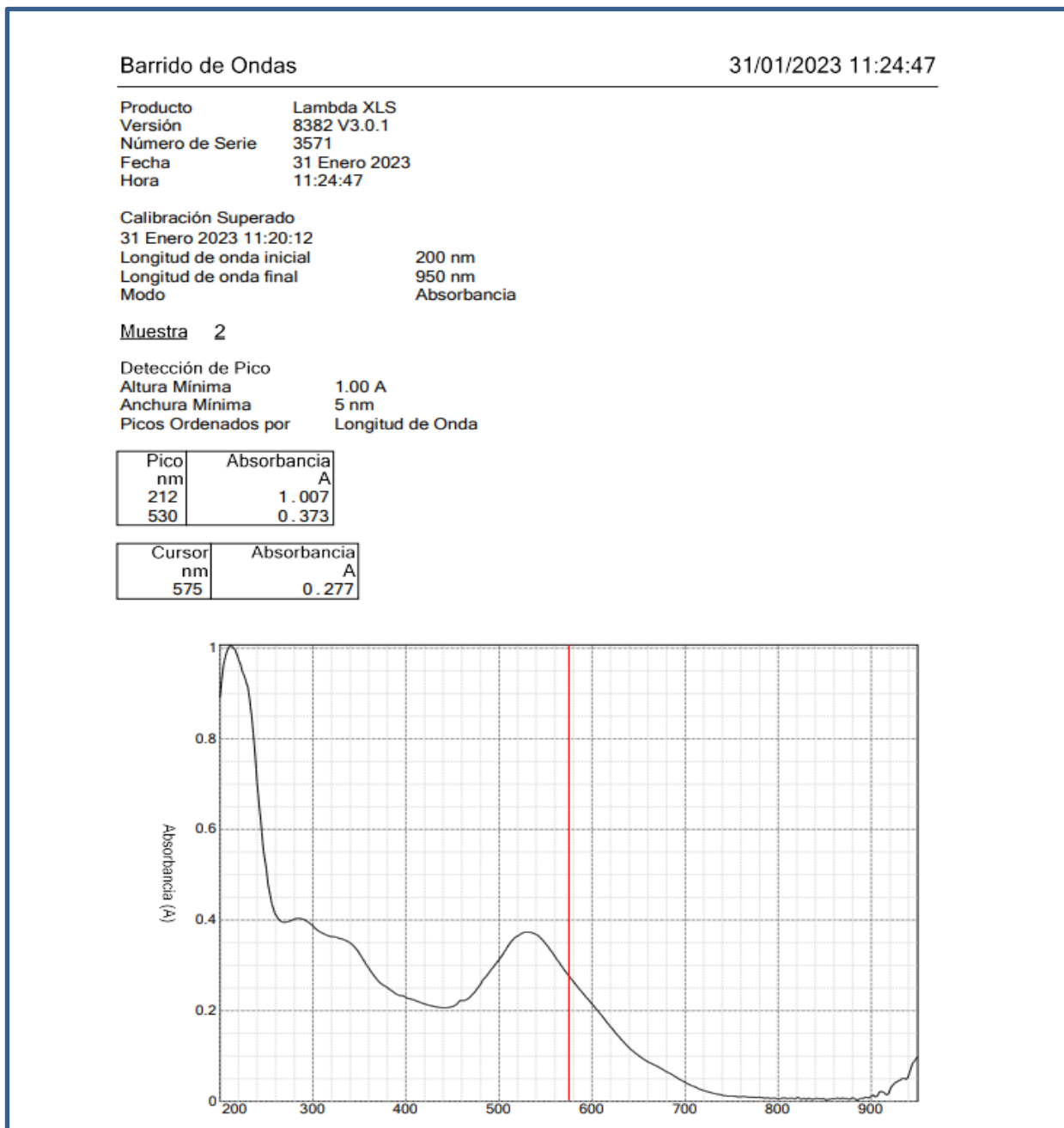
En un primer paso necesitamos obtener la recta de calibración del contaminante. Para ello y con la ayuda del espectrofotómetro se realiza el siguiente proceso:

##### *1. Determinación de la longitud de onda:*

Para garantizar que las medidas tomadas sean correctas se necesita determinar la longitud de onda en la que debe trabajar el espectrofotómetro, ya que variará según el compuesto a medir. Para ello se trabajará en el modo 3 del espectrofotómetro (barrido de ondas). Este modo permite graficar la reacción que tiene la disolución elaborada a las distintas longitudes de onda en las que puede trabajar. Una vez se obtiene la gráfica se conoce el valor de la longitud de onda óptima y será la empleada para el cálculo de



la absorbancia de muestras de distintas concentraciones, que se emplearán para la construcción de la recta de calibración.



**Figura 3-5 Longitud de onda**

Tras la realización de varios barridos se obtiene una longitud de onda de  $\lambda = 530$  nm.

*2. Obtención de la recta de calibración:*

Una vez se ha obtenido la longitud de onda de trabajo se toman cinco muestras de la disolución con diferentes concentraciones para obtener su absorbancia.

En primer lugar, se selecciona el modo1 (longitud de onda simple) del espectrofotómetro y se pone una muestra de agua destilada en la probeta de cuarzo para ajustar el cero y tener ese valor de referencia.

Para cada muestra que se emplee tenemos que volver a establecer el nivel de referencia de absorbancia cero del agua desionizada. Las muestras que se van a medir irán disminuyendo su concentración de forma progresiva.

Se parte de una muestra de 10 ml del agua contaminada (máxima concentración) y se va diluyendo con agua destilada para variar la concentración de las mismas.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Establecimiento del patrón, en nuestro caso agua destilada. El valor de absorbancia que se le asocia a esta muestra del agua debe ser de 0.
2. Establecida la muestra patrón, se irán introduciendo en el espectrofotómetro las disoluciones de las muestras que se han ido tomando, obteniendo de esta manera sus valores de absorbancia.
3. Toma de datos de los distintos valores de absorbancia obtenidos.

Se realiza el proceso descrito y se va obteniendo una recta cuyos ejes serán: la absorbancia en el eje de abscisas y la concentración de negro de eriocromo (nuestro contaminante) en agua destilada en el eje de ordenadas.

Con cada una de las muestras elaboradas para el contaminante “negro de eriocromo T” con distintas concentraciones se obtiene la siguiente tabla:

MUESTRA	CONCENTRACIÓN (g/l)
1	0,00414
2	0,00828
3	0,01242
4	0,01656
5	0,02070

**Tabla 3-5 Concentración de las muestras para recta de calibración.**

Longitud de Onda Simple		31/01/2023 11:54:19
Producto	Lambda XLS	
Versión	8382 V3.0.1	
Número de Serie	3571	
Fecha	31 Enero 2023	
Hora	11:54:19	
Calibración Superado		
31 Enero 2023 11:20:12		
Longitud de Onda	530 nm	
Modo	Absorbancia	
Hora	Muestra	Absorbancia
11:54:19	Referencia	
11:55:47	1	0.071
11:57:32	Referencia	
11:58:24	2	0.150
11:59:30	Referencia	
12:00:26	3	0.224
12:02:07	Referencia	
12:03:30	4	0.303
12:05:08	Referencia	
12:06:10	5	0.377

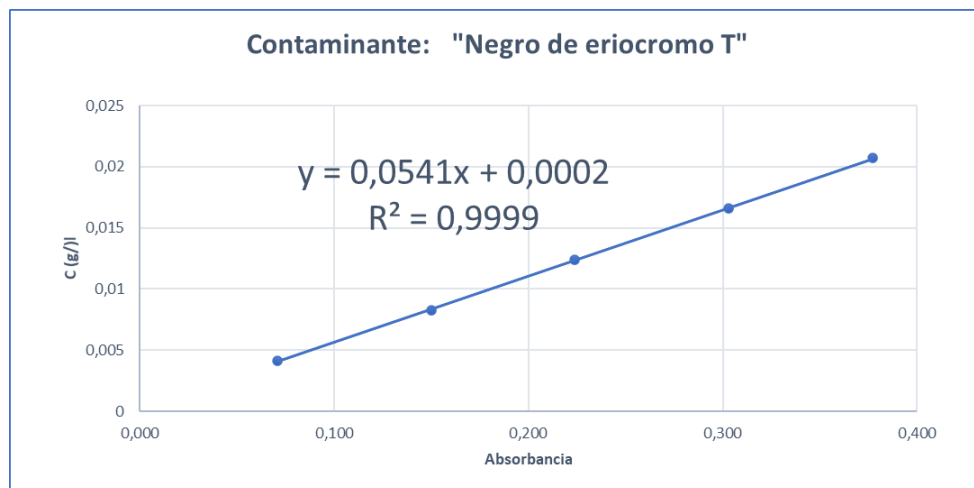
**Figura 3-6 Absorbancia de muestras espectrofotómetro para recta de calibración.**

Con los valores de concentración de las disoluciones y sus valores de absorbancia asociada se procede a elaborar la gráfica que representa la recta de calibrado del “negro de eriocromo T”

ABS ( 530 nm)	C(g/L)
0,071	0,00414
0,150	0,00828
0,224	0,01242
0,303	0,01656
0,377	0,0207

**Tabla 3-6 Absorbancia / concentración "negro de eriocromo T" para obtención de la recta de calibración.**

Esta recta de calibración obtenida es la que se muestra a continuación:



**Figura 3-7 Recta de calibración para contaminante "negro de eriocromo T"**

Destacar la importancia de realizar la recta de calibrado del compuesto que se vaya a utilizar, ya que es la base para la correcta obtención de los valores de concentración a lo largo del proceso.

#### Generación de esferas de adsorbente

Para poder emplear el adsorbente de forma eficiente en la planta piloto se seguirá la línea de trabajo del AN Maza Fernández, que en su trabajo de fin de grado [10] llegó a la conclusión de que la forma óptima de trabajo con el adsorbente que se emplee es inmovilizarlo dándole forma de esfera.

Así mismo y siguiendo las lecciones aprendidas del citado trabajo, nos basaremos en las proporciones indicadas en dicha experiencia. Las proporciones son las que se detallan en la descripción del proceso a lo largo de este epígrafe.

El adsorbente espirulina que se emplea en el trabajo está originalmente pulverizado, lo cual complicaría su empleo en el interior de la columna al presentar excesiva área superficial. Además, el filtro de la columna podría llegar a obstruirse con el adsorbente en polvo impidiendo el correcto flujo de agua a través del adsorbente.

Por todo ello emplearemos las esferas de inmovilizado citadas anteriormente, cuya elaboración se describe a continuación:

1. Preparación de una disolución con 100 mililitros de agua destilada, 2 gramos del adsorbente que se vaya a emplear en la prueba en cuestión y 5 gramos de alginato sódico ( $C_6H_7O_6Na$ ).
2. Elaboración de una disolución con cloruro cálcico ( $Ca(ClO_3)_2$ ) dihidratado 0,475M. Para ello, hemos calculado la cantidad de cloruro cálcico que hay que emplear para obtener dicha molaridad en 250 mililitros de agua desionizada, teniendo en cuenta la pureza y el peso molecular del compuesto.
3. Con el agitador se procede a agitar las mezclas realizadas para diluir los compuestos. Es fundamental que se haga una buena mezcla y en el caso del alginato con el adsorbente se debe hacer de forma manual, ya que debido a su textura se hace inviable el uso del agitador.

4. Mojar la mano en la disolución de cloruro cálcico ( $\text{CaCl}_2$ ) y recoger con una cuchara cierta cantidad de la disolución del adsorbente para que al entrar en contacto el alginato con el calcio se vaya endureciendo y se le pueda dar la forma de esfera deseada. Teniendo la bola en la mano se deposita en la disolución de cloruro cálcico para que endurezca por completo.
5. Retirar la esfera de adsorbente y depositarla en un papel de secado.

Se detecta que las esferas con el paso del tiempo reducen su tamaño y si no se conservan en un ambiente adecuado de temperatura y humedad, puede llegar a formarse moho en ellas. Este hecho implica la necesidad de fabricación continua de esferas a lo largo del desarrollo de los experimentos.

Se tienen que realizar cuantas esferas sea necesario, puesto que no todas ellas salen de forma correcta y se necesita gran cantidad de ellas para realizar las experiencias con las distintas alturas de relleno propuestas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la realización de esferas para la espirulina:

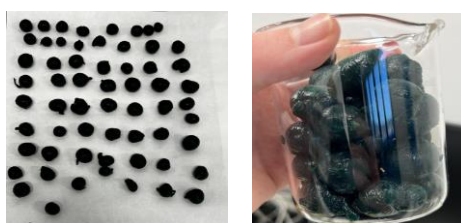


Figura 3-8 Esferas de inmovilizado de espirulina

#### Montaje del adsorbente en la planta

Una vez realizadas las esferas de adsorbente, las introducimos en la torre dispuesta para tal fin. Tal y como hemos mencionado, se realizará el experimento y la consiguiente toma de datos con dos alturas de relleno de adsorbente, analizando los resultados obtenidos para intentar llegar a una relación entre altura de adsorbente (superficie de contacto, ya que mayor altura implica mayor superficie) y la bondad del proceso.

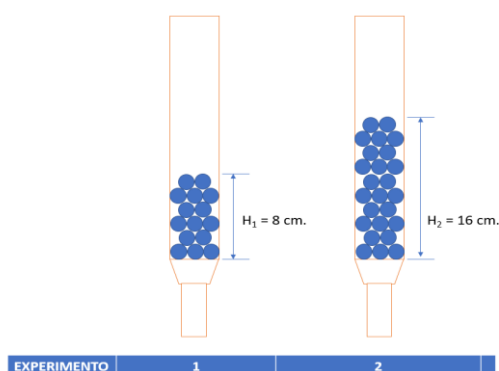


Figura 3-9 Alturas previstas para experimento con planta piloto

#### Cálculo de tiempos de toma de datos

Uno de los parámetros a tener en cuenta es el intervalo de tiempo entre tomas de datos. Se establecerá el tiempo que tarda el fluido en recorrer todo el circuito (desde la salida del tanque accionado por la bomba, hasta su vuelta al mismo tras el paso por la columna de adsorción). Este tiempo vendrá determinado por el caudal de la bomba y el volumen de disolución en el circuito:

Para la realización del experimento se tomarán 18 muestras de la disolución en intervalos de 10 min, ya que es un tiempo suficientemente amplio para obtener un flujo continuo de la disolución en el circuito de la planta. El sistema estará 180min (3 horas) realizando el proceso de adsorción. Tiempo que se considera suficiente para obtener un juego de datos lo suficientemente preciso como para poder sacar conclusiones muy aproximadas sobre los resultados obtenidos.

Realización del experimento

Una vez realizado el montaje de la planta, la recta de calibración del contaminante, las esferas de adsorbente espirulina y estimados los tiempos de tomas de datos, se procede a la realización de los experimentos propiamente dichos.

El proceso realizado se describe a continuación:

1. Se rellena el recipiente con 5 litros de solución contaminada con “negro de eriocromo T” con una concentración inicial de 0,027 g/l de contaminante.
2. Se rellena la columna de adsorción con el primer adsorbente elegido, espirulina (realizaremos el experimento con dos adsorbentes, espirulina y carbón activado) hasta la primera de las alturas de adsorbente estipulada;  $H_1 = 8$  cm. (recordamos que vamos a realizar el experimento con 2 alturas:  $H_1 = 8$  cm. y  $H_2 = 16$  cm.).
3. Se toma una muestra de la disolución anotando los resultados obtenidos en las tablas preparadas para tal fin.
4. Se acciona la bomba, observando que la disolución recorre todo el circuito, volviendo a depositarse en el recipiente.
5. Se toman muestras de la disolución cada 10 min, tiempo estipulado en el epígrafe anterior y que garantiza un flujo continuo de la disolución a través del circuito de la planta.

Se observa que el flujo de retorno de la torre de adsorción es lento. Se regulan la bomba y la válvula a valores mínimos, aun así, se observa que sigue habiendo riesgo de desborde. Se juega con los tiempos de bombeo para garantizar un caudal de salida sin rebose.

6. Con las muestras obtenidas vamos al espectrofotómetro obteniéndose el valor de absorbancia para cada una de ellas.
7. Se trasladan los datos de absorbancia obtenidos en el espectrofotómetro a una tabla para su posterior análisis.

H <sub>1</sub> = 8 cm.	
TIEMPO (MIN)	ABS (530nm)
0	0,377
10	0,306
20	0,347
30	0,275
40	0,342
50	0,3205
60	0,3045
70	0,3305
80	0,363
90	0,365

H <sub>i</sub> = 8 cm.	
TIEMPO (MIN)	ABS (530nm)
100	0,338
110	0,369
120	0,29
130	0,317
140	0,357
150	0,335
160	0,356
170	0,322
180	0,285

**Tabla 3-7 Tabla de resultados de absorbancia de las muestras espirulina**

A simple vista se puede observar que los datos obtenidos muestran un comportamiento un tanto errático, hecho que analizaremos tras el cálculo de las concentraciones en el siguiente paso.

- En una tabla preparada para tal fin se obtienen los valores de concentración basándose en la recta de calibración calculada anteriormente.

Como ya se ha explicitado, dicha recta es de forma:  $y = 0,0541x + 0,0002$

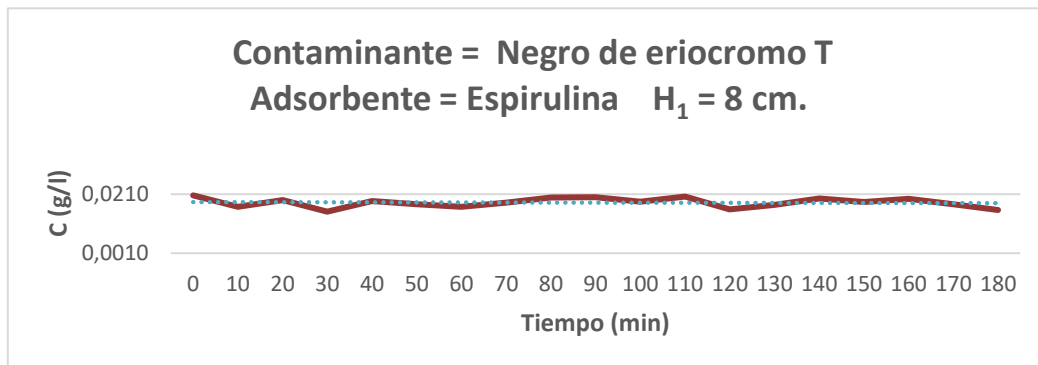
Introduciendo el valor de la variable “x” con los valores de la absorbancia obtenidos en las mediciones de las muestras en los intervalos de tiempo considerados, se obtiene el valor de la variable “y”, la cual representa el valor de la concentración de la disolución en g/l.

Con todo ello se obtiene la siguiente tabla de valores:

H <sub>i</sub> = 8 cm.		
TIEMPO (MIN)	ABS (530nm)	C (g/l)
0	0,377	0,0206
10	0,306	0,0168
20	0,347	0,0190
30	0,275	0,0151
40	0,342	0,0187
50	0,3205	0,0175
60	0,3045	0,0167
70	0,3305	0,0181
80	0,363	0,0198
90	0,365	0,0199
100	0,338	0,0185
110	0,369	0,0202
120	0,29	0,0159
130	0,317	0,0173
140	0,357	0,0195
150	0,335	0,0183
160	0,356	0,0195
170	0,322	0,0176
180	0,285	0,0156

**Tabla 3-8 Tabla de resultados de concentración correspondientes a los valores de absorbancia obtenidos**

Se representan a continuación, en una gráfica, los resultados obtenidos para poder realizar un mejor análisis e intentar llegar a las causas que pueden provocar la variabilidad de los datos obtenidos.



**Figura 3-10 Gráfica resultados espirulina para  $H_1 = 8$  cm. Experimento n°1**

Tras el análisis de los datos se puede concluir lo siguiente:

OBSERVACIÓN	ACCIÓN
La toma de datos de medida en el espectrofotómetro puede estar dando errores, ya que en diversas muestras se ha realizado dos veces la toma de datos con la misma muestra, dando resultados distintos. En este caso se ha tomado un valor medio.	Comprobar la exactitud de las medidas en el espectrofotómetro. Tomar tres medidas para hacer media de los valores obtenidos.
Es necesario remover mejor la disolución, previo a la toma de la muestra, ya que si no se hace, se puede estar tomando dichas muestras en zonas de concentraciones diferentes.	Remover bien la disolución en el recipiente previo a la toma de muestras. Tomar siempre la muestra en el mismo sitio.
Probar con un volumen de disolución inicial más pequeño, ya que por lo que parece a simple vista, el proceso de adsorbancia es lento (el retorno al recipiente es por goteo) y al partir de un volumen excesivamente grande de disolución se hace más difícil apreciar las disminuciones de concentración.	Probar con un volumen de disolución inicial mínimo con el que se aspira disolución con la bomba.

Se llevan a cabo las siguientes actuaciones con el objeto de intentar paliar en la medida de lo posible la erraticidad de los datos obtenidos:

Realizar tres mediciones de las muestras que vamos obteniendo, con estas tres medidas calcularemos la media como valor representativo para cada intervalo de tiempo establecido.

Adquirir un agitador que nos permita remover la disolución de una forma adecuada previo a la toma de las muestras.

Realizar las bolas de adsorbente con el menor diámetro posible.

Disminuir el volumen de disolución inicial para intentar apreciar mejor la disminución de concentración de contaminante.

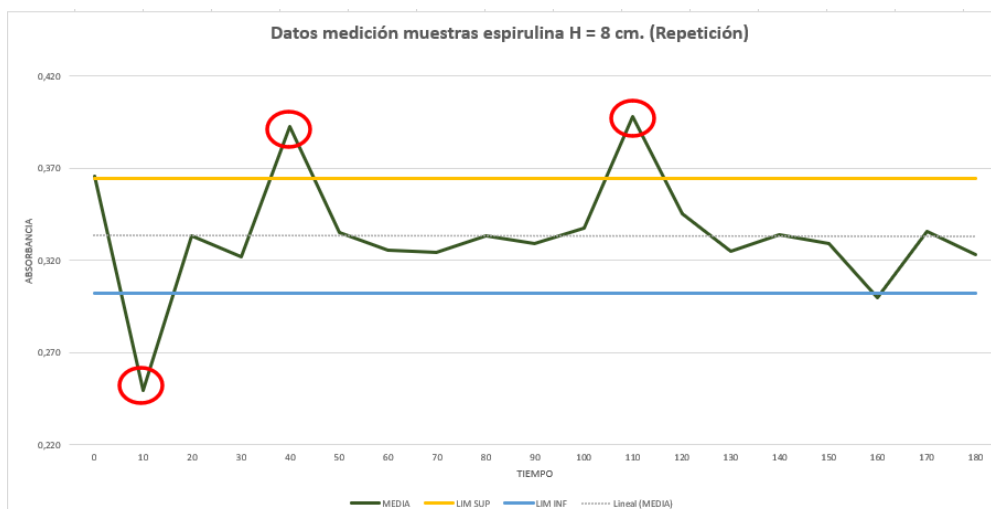
- Se repite el experimento con H= 8 cm. para comprobar si las acciones realizadas causan el efecto esperado.

Con las muestras obtenidas y las mediciones realizadas en el espectrofotómetro (en el apéndice IV se muestran ejemplos de los reportes extraídos del mismo) se realiza la tabla de datos, calculando el valor medio para cada intervalo de tiempo, así como la desviación estándar con los correspondientes límites superior e inferior, lo que nos permitirá desechar aquellos valores que se encuentren fuera de dichos límites:

DATOS MEDICIÓN MUESTRAS Espirulina H = 8 cm. (Repetición)						
TIEMPO (MIN)	ABS 1º MEDIC	ABS 2º MEDIC	ABS 3º MEDIC	MEDIA	LIM SUP	LIM INF
0	0,366	0,37	0,361	0,366	0,364718609	0,302298935
10	0,49	0,17	0,088	0,249	0,364718609	0,302298935
20	0,326	0,342	0,331	0,333	0,364718609	0,302298935
30	0,282	0,316	0,367	0,322	0,364718609	0,302298935
40	0,506	0,347	0,324	0,392	0,364718609	0,302298935
50	0,325	0,354	0,326	0,335	0,364718609	0,302298935
60	0,324	0,32	0,333	0,326	0,364718609	0,302298935
70	0,328	0,325	0,32	0,324	0,364718609	0,302298935
80	0,337	0,342	0,32	0,333	0,364718609	0,302298935
90	0,302	0,346	0,339	0,329	0,364718609	0,302298935
100	0,344	0,349	0,32	0,338	0,364718609	0,302298935
110	0,35	0,524	0,32	0,398	0,364718609	0,302298935
120	0,333	0,361	0,342	0,345	0,364718609	0,302298935
130	0,346	0,319	0,31	0,325	0,364718609	0,302298935
140	0,331	0,335	0,335	0,334	0,364718609	0,302298935
150	0,33	0,331	0,327	0,329	0,364718609	0,302298935
160	0,358	0,356	0,186	0,300	0,364718609	0,302298935
170	0,348	0,347	0,312	0,336	0,364718609	0,302298935
180	0,318	0,32	0,331	0,323	0,364718609	0,302298935
<b>MEDIA</b>	0,349684211	0,340736842	0,310105263	0,334		
<b>DESV EST</b>	0,055698646	0,060968883	0,064788455	0,031		
<b>LIM SUP</b>	0,405382857	0,401705725	0,374893718	0,365		
<b>LIM INF</b>	0,293985564	0,279767959	0,245316808	0,302		

**Tabla 3-9 Resultados obtenidos espirulina para H = 8 cm. (Repetición experimento)**

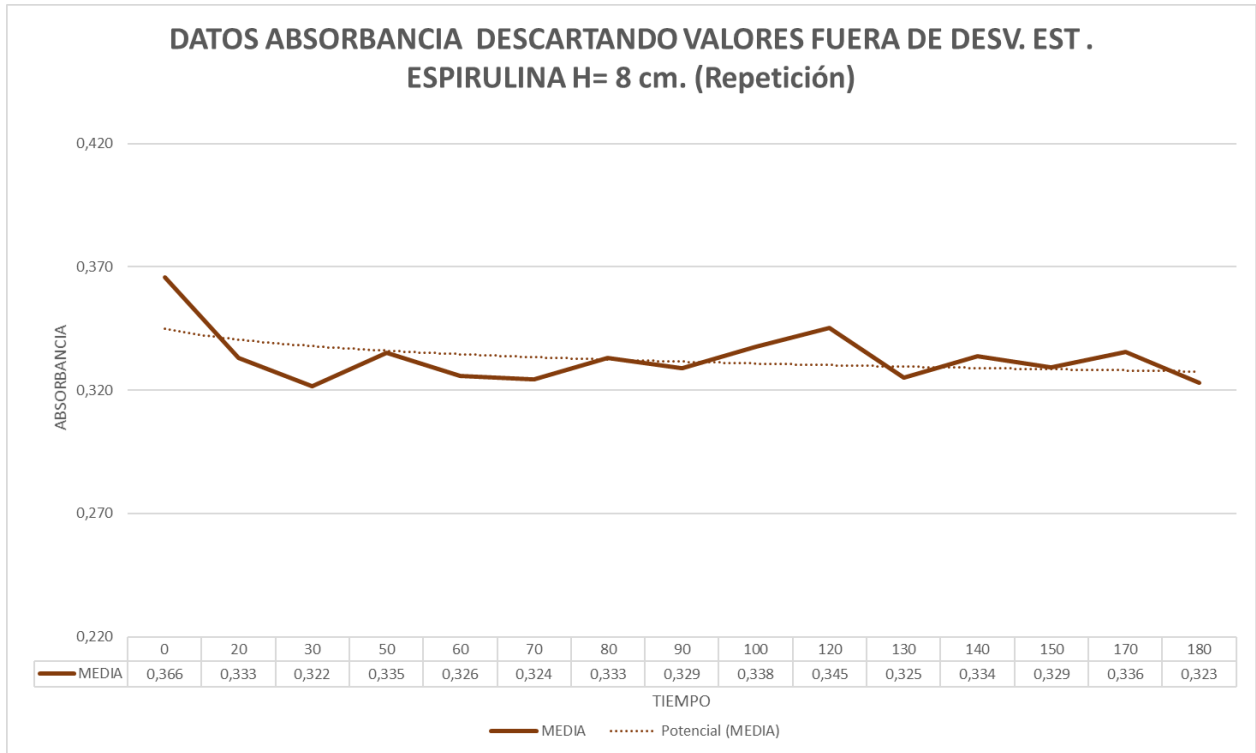
Los resultados de la tabla se muestran en una gráfica, la cual permite identificar de una manera rápida todos aquellos valores que se encuentran fuera de los límites y que por tanto desecharemos, ya que fuera de dichos límites los resultados se consideran anormales debido a diferentes errores en el proceso (el propio del espectrofotómetro, la manualidad del proceso, etc.)



**Figura 3-11 Gráfica resultados espirulina H = 8 cm. (Repetición experimento)**



Desechando los valores que se encuentran fuera de límites, se obtienen la siguiente tabla y gráfica de resultados:

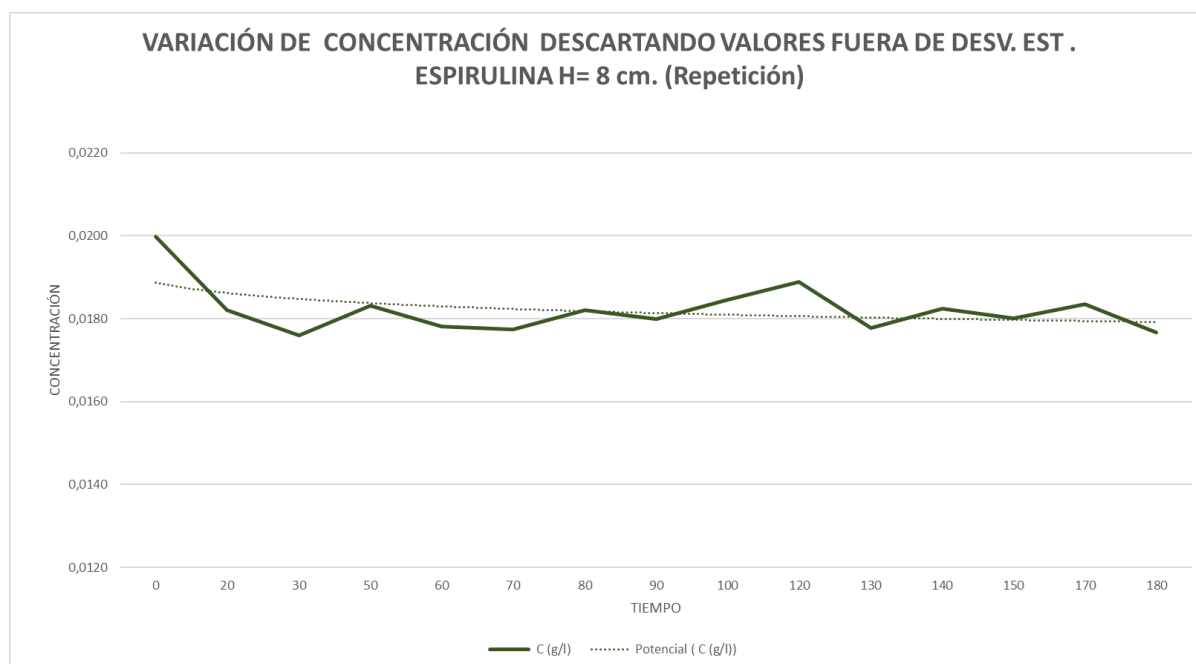


**Figura 3-12 Datos absorbancia descartando valores fuera de desv. est. para espirulina y H = 8 cm. (Repetición experimento)**

Sustituyendo los datos de absorbancia obtenidos en la recta de calibración de la disolución contaminada (  $y = 0,0541x + 0,0002$  ) se obtiene la gráfica de variación de la concentración con respecto al tiempo (cinética de la concentración). En el apartado cuatro (4) correspondiente a resultados se analizará la globalidad de los datos obtenidos.

<b>H<sub>1</sub> = 8 cm. (Repetición)</b>		
<b>TIEMPO (MIN)</b>	<b>ABS (530nm)</b>	<b>C (g/l)</b>
0	0,366	0,0200
20	0,333	0,0182
30	0,322	0,0176
50	0,335	0,0183
60	0,326	0,0178
70	0,324	0,0177
80	0,333	0,0182
90	0,329	0,0180
100	0,338	0,0185
120	0,345	0,0189
130	0,325	0,0178
140	0,334	0,0183
150	0,329	0,0180
170	0,336	0,0184
180	0,323	0,0177

**Tabla 3-10 Tabla resultados espirulina H = 8 cm. (Repetición experimento).**



**Figura 3-13 Gráfica de variación de concentración descartando valores fuera de desv. est. espirulina H = 8 cm. (Repetición experimento)**

10. Se varía la altura de adsorbente hasta el segundo valor establecido ( $H_2 = 16$  cm.). Se realizan las esferas de espirulina con el menor diámetro que nos permite la manualidad del proceso y se parte de un volumen de disolución de cuatro (4) litros, que es el mínimo volumen que nos permite el recipiente y con el que se garantiza el correcto funcionamiento de la bomba.



**Figura 3-14 Torre espirulina para H = 16 cm**

Se toman, como se ha expuesto en las acciones a llevar a cabo, tres muestras de la disolución inicial previo al funcionamiento de la planta, se miden los resultados de absorbancia en el espectrofotómetro, se anotan los valores obtenidos y se pone en funcionamiento la planta.

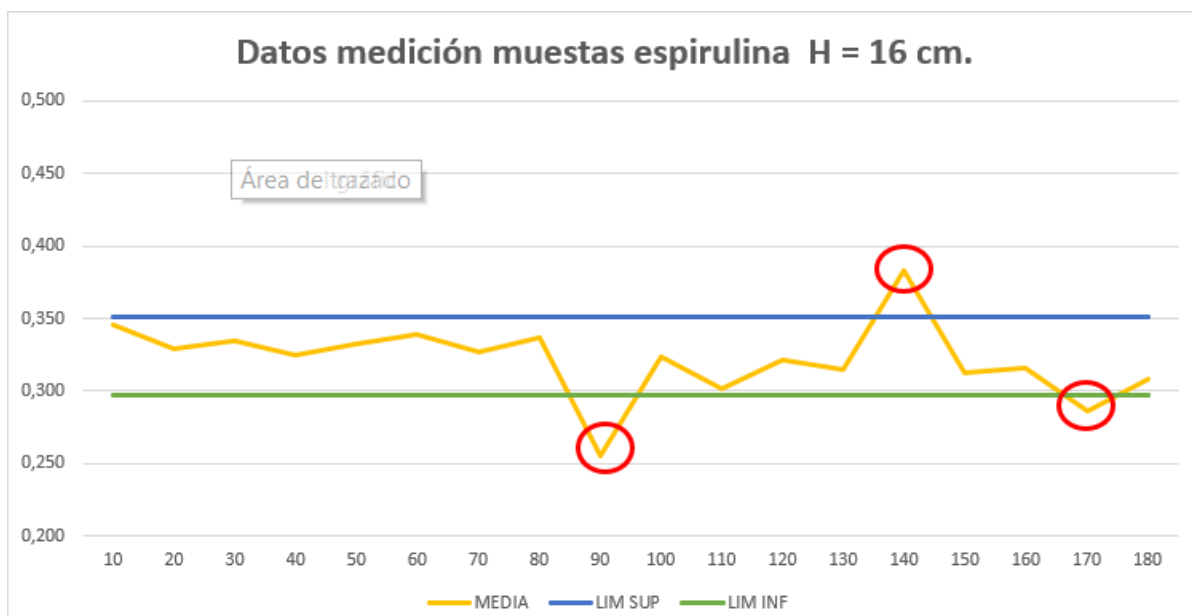
Cada 10 minutos se procede a tomar una muestra, tal y como se ha hecho en los casos anteriores, removiendo la disolución con el agitador manual y procurando tomar las muestras siempre en el mismo lugar del recipiente.

Al igual que en el caso anterior, con las muestras obtenidas y las mediciones realizadas en el espectrofotómetro, se realiza la tabla de datos calculando el valor medio para cada intervalo de tiempo, así como la desviación estándar con los correspondientes límites superior e inferior, lo que, como ya se ha expuesto, permitirá desechar aquellos valores que se encuentren fuera de dichos límites:

DATOS MEDICIÓN MUESTRAS Espirulina H =16 cm.						
TIEMPO (MIN)	ABS 1ª MEDIC	ABS 2ª MEDIC	ABS 3ª MEDIC	MEDIA	LIM SUP	LIM INF
0	0,366	0,37	0,361	0,366	0,02739655	0,35134392
10	0,339	0,344	0,353	0,345	0,35134392	0,29655081
20	0,33	0,332	0,324	0,329	0,35134392	0,29655081
30	0,335	0,342	0,326	0,334	0,35134392	0,29655081
40	0,31	0,327	0,338	0,325	0,35134392	0,29655081
50	0,33	0,331	0,336	0,332	0,35134392	0,29655081
60	0,337	0,341	0,339	0,339	0,35134392	0,29655081
70	0,324	0,332	0,325	0,327	0,35134392	0,29655081
80	0,328	0,343	0,338	0,336	0,35134392	0,29655081
90	0,255	0,255	0,256	0,255	0,35134392	0,29655081
100	0,326	0,318	0,327	0,324	0,35134392	0,29655081
110	0,302	0,304	0,299	0,302	0,35134392	0,29655081
120	0,318	0,326	0,32	0,321	0,35134392	0,29655081
130	0,344	0,289	0,31	0,314	0,35134392	0,29655081
140	0,37	0,383	0,397	0,383	0,35134392	0,29655081
150	0,354	0,291	0,291	0,312	0,35134392	0,29655081
160	0,322	0,305	0,32	0,316	0,35134392	0,29655081
170	0,281	0,294	0,284	0,286	0,35134392	0,29655081
180	0,366	0,275	0,282	0,308	0,35134392	0,29655081
<b>MEDIA</b>	0,328263158	0,321157895		0,32394737		
<b>DESV EST</b>	0,028417213	0,031780957		0,02739655		
<b>LIM SUP</b>	0,356680371	0,352938852		0,35134392		
<b>LIM INF</b>	0,299845945	0,289376938		0,29655081		

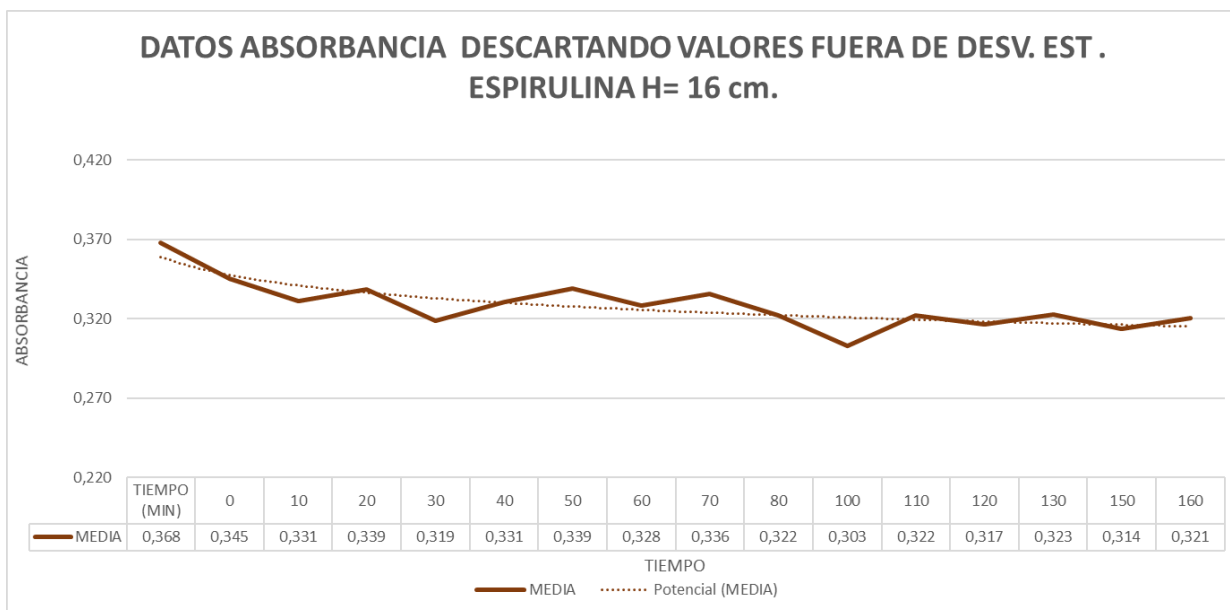
**Tabla 3-11** Tabla de resultados absorción muestras espirulina y H<sub>2</sub> = 16 cm

Los resultados de la tabla se muestran en la siguiente gráfica que, como en el caso anterior, nos permitirá identificar de una manera rápida todos aquellos valores que se encuentran fuera de los límites y que, como ya se ha comentado, desecharemos



**Figura 3-15** Gráfica resultados muestras espirulina y H = 16 cm.

Desechando los valores que se encuentran fuera de límites se obtiene la siguiente tabla y gráfica de resultados:



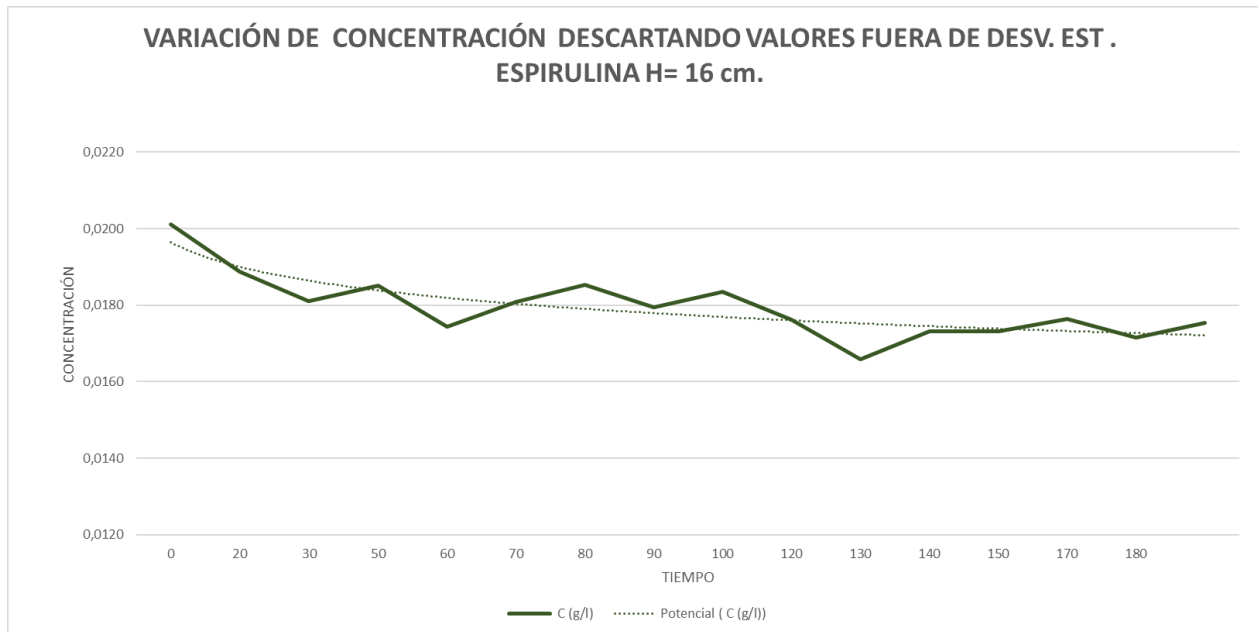
**Figura 3-16 Gráfica resultado absorbancia datos descartando valores fuera de desv. est. espirulina y H = 16 cm.**

Del análisis de la gráfica se puede concluir que se produce una ligera desviación ya que, si se observa la curva de tendencia, se aprecia que es descendente, lo que indica una disminución, aunque leve, en los datos de la absorbancia obtenidos.

Sustituyendo los datos de absorbancia obtenidos en la recta de calibración de la disolución contaminada se obtiene la gráfica de variación de la concentración con respecto al tiempo (cinética de la concentración).

<b>H<sub>2</sub> = 16cm.</b>		
<b>TIEMPO (MIN)</b>	<b>ABS (530nm)</b>	<b>C (g/l)</b>
0	0,368	0,0201
10	0,345	0,0189
20	0,331	0,0181
30	0,339	0,0185
40	0,319	0,0174
50	0,331	0,0181
60	0,339	0,0185
70	0,328	0,0179
80	0,336	0,0184
100	0,322	0,0176
110	0,303	0,0166
120	0,317	0,0173
130	0,317	0,0173
150	0,323	0,0176
160	0,314	0,0172
180	0,321	0,0175

**Tabla 3-12 Resultados concentración espirulina y H = 16 cm.**



**Figura 3-17 Variación de concentración espirulina y H = 16 cm**

Una vez realizados los experimentos con la espirulina para las alturas propuestas, queda la duda de porqué de la poca disminución de contaminante, que suponemos debido a dos (2) posibles causas:

1º Incompatibilidad entre el adsorbato y el adsorbente: Puede existir cierta incompatibilidad entre el adsorbente elegido y el adsorbato presente en la disolución que hace que el resultado no sea todo lo bueno que se espera.

2º Poca superficie de adsorción debido al proceso de esferificación de los adsorbentes, siendo éste excesivamente manual y no permitiendo la realización de esferas lo suficientemente pequeñas como para aumentar la superficie de adsorción en la medida necesaria.

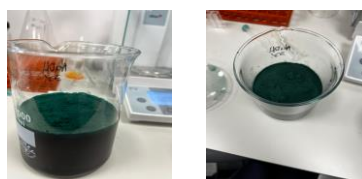
La superficie de adsorción es un parámetro fundamental dentro del proceso de adsorción, por lo que es muy importante conseguir la máxima superficie posible ya que a mayor superficie mayor adsorción.

En las esferas la superficie de adsorción está íntimamente ligada con su volumen:

$$\left. \begin{aligned} S &= 4 * \pi * r^2 \\ V &= \frac{4}{3} * \pi * r^3 \end{aligned} \right\} \boxed{\frac{S}{V} = \frac{3}{r}}$$

Para intentar despejar estas dudas se realiza el siguiente experimento:

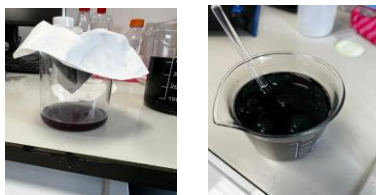
1º. En un vaso de precipitados, se rellena medio litro de disolución contaminada de la que previamente se habrán extraído tres (3) muestras que analizaremos en el espectrofotómetro y a la que añadiremos 10 gramos de adsorbente.



**Figura 3-18 Vaso de precipitados con espirulina y disolución contaminada**

2º Se sitúa el vaso con la disolución y el adsorbente (manteniéndolo 24 horas) para, de esta manera, permitir la correcta interacción entre adsorbato y adsorbente.

3º Se pasa la disolución mezclada por un filtro tipo “Melita”.



**Figura 3-19** Obtención de la disolución clarificada tras el paso por el filtro. *Espirulina*

4º Se toman tres (3) muestras de la disolución clarificada. Los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación:

<b>Espirulina</b>	<b>1º muestra</b>	<b>2º muestra</b>	<b>3º muestra</b>	<b>Media</b>	<b>Concentración</b>
<b>Concentración inicial</b>	0,353	0,355	0,36	0,356	0,02
<b>Concentración después de 24 horas</b>	0,3390	0,3260	0,2970	0,321 €	0,02
<b><math>C_0 - C_{final}</math></b>					<b>0,00</b>
<b><math>(C_0 - C_{final}) / C_0</math></b>					<b>0,10</b>

**Tabla 3-13** Datos reducción de concentración en vaso de precipitados. *Espirulina*.

5º Se analizan los resultados para, en el [epígrafe 4.1.1](#) de resultados, obtener conclusiones y realizar las correspondientes propuestas de actuación.

11. Realizados los experimentos con *espirulina* cambiamos el adsorbente a carbón activado para las dos alturas definidas.

Destacar que en el caso del carbón activado no es necesario la realización de esferas, ya que el carbón suministrado viene en forma de pellets, hecho éste que beneficia, ya que podemos obviar la formación de las mismas, proceso, como ya se ha comentado, engorroso y excesivamente manual.

Así mismo, con esta forma de suministro ya obtenemos formas con una buena superficie de adsorción, la cual, en principio, nos debería de proporcionar mejores resultados.



**Figura 3-20** Carbón activado

12. Procediendo de manera similar a lo realizado con la *espirulina*, se realizará el experimento con carbón activado para dos (2) alturas,  $H = 8$  cm. y  $H = 16$  cm. para de esta manera poder comparar los resultados y extraer las correspondientes conclusiones:

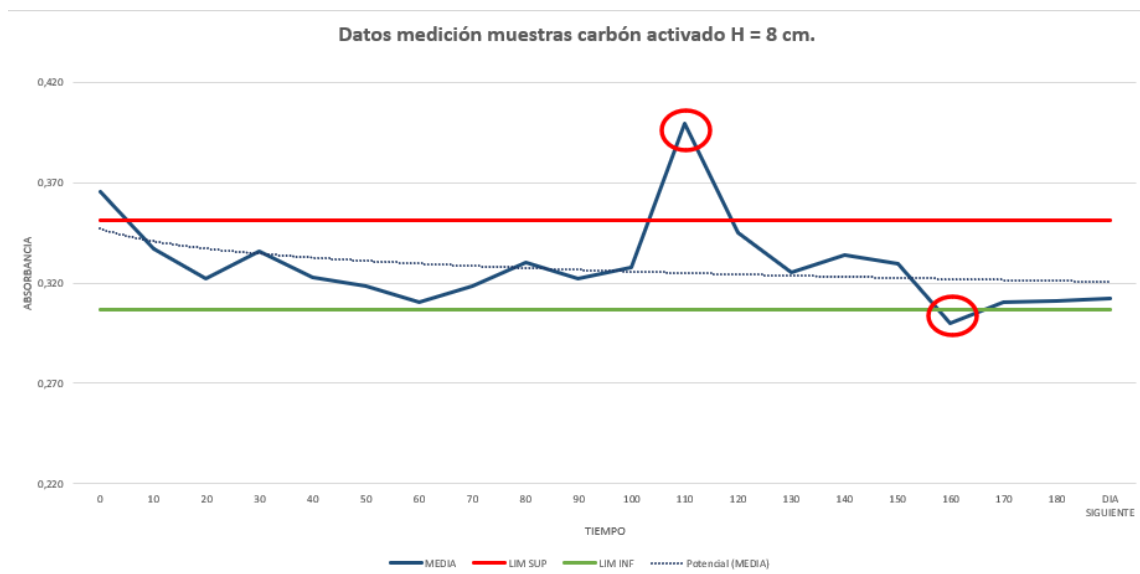
Se rellena el recipiente con cuatro (4) litros de disolución contaminada, se toman tres (3) muestras que se miden en el espectrofotómetro anotando los resultados obtenidos y se rellena la torre de adsorción hasta una altura de  $H = 8$  cm.

Tomando las correspondientes muestras en los intervalos de tiempo establecidos, se actúa de manera similar a lo explicitado en el caso de la *espirulina*, obteniéndose los siguientes resultados:

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UNA PLANTA PILOTO DE DEPURACIÓN DE AGUAS  
BASADA EN ADSORCIÓN

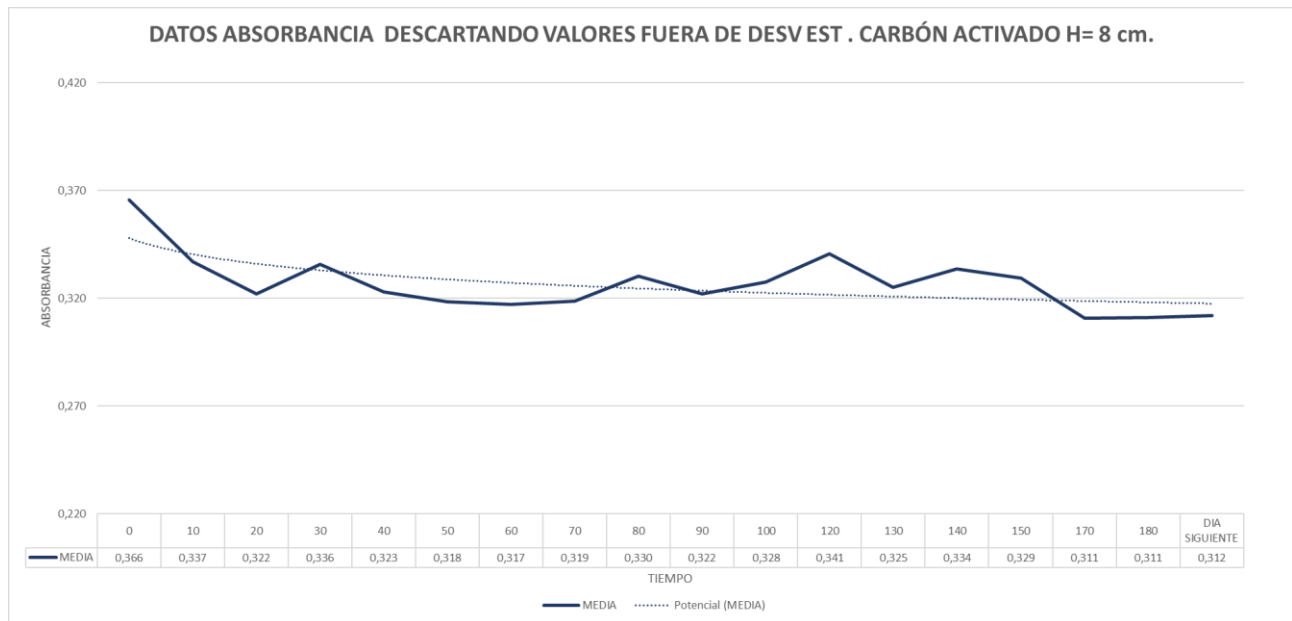
DATOS MEDICIÓN MUESTRAS Carbón Activado H = 8 cm.						
TIEMPO (MIN)	ABS 1ª MEDIC	ABS 2ª MEDIC	ABS 3ª MEDIC	MEDIA	LIM SUP	LIM INF
0	0,366	0,37	0,361	0,366	0,351088211	0,306611789
10	0,39	0,312	0,309	0,337	0,351088211	0,306611789
20	0,348	0,306	0,312	0,322	0,351088211	0,306611789
30	0,348	0,347	0,312	0,336	0,351088211	0,306611789
40	0,318	0,32	0,331	0,323	0,351088211	0,306611789
50	0,321	0,326	0,308	0,318	0,351088211	0,306611789
60	0,321	0,305	0,305	0,310	0,351088211	0,306611789
70	0,297	0,324	0,335	0,319	0,351088211	0,306611789
80	0,329	0,333	0,329	0,330	0,351088211	0,306611789
90	0,303	0,329	0,334	0,322	0,351088211	0,306611789
100	0,325	0,332	0,326	0,328	0,351088211	0,306611789
110	0,35	0,524	0,324	0,399	0,351088211	0,306611789
120	0,333	0,361	0,342	0,345	0,351088211	0,306611789
130	0,346	0,319	0,31	0,325	0,351088211	0,306611789
140	0,331	0,335	0,335	0,334	0,351088211	0,306611789
150	0,33	0,331	0,327	0,329	0,351088211	0,306611789
160	0,358	0,356	0,186	0,300	0,351088211	0,306611789
170	0,305	0,317	0,31	0,311	0,351088211	0,306611789
180	0,297	0,326	0,31	0,311	0,351088211	0,306611789
DIA SIGUIENTE	0,318	0,306	0,312	0,312	0,351088211	0,30661179
<b>MEDIA</b>	0,3317	0,33895	0,3159	0,329		
<b>DESV EST</b>	0,024434301	0,047735443	0,034720943	0,022		
<b>LIM SUP</b>	0,356134301	0,386685443	0,350620943	0,351		
<b>LIM INF</b>	0,307265699	0,291214557	0,281179057	0,307		

**Tabla 3-14 Resultado absorbancia muestras carbón activado y H = 8 cm.**



**Figura 3-21 Datos medición muestras carbón activado y H = 8 cm.**

Observamos que tenemos dos (2) valores fuera de límites, los cuales, como ya hemos indicado en experimentos anteriores, deseamos:



**Figura 3-22 Absorbancia muestras fuera desv. est. carbón Activado y H = 8 cm.**

Al igual que se ha realizado para el caso de la espirulina, sustituyendo los datos de absorbancia obtenidos en la recta de calibración de la disolución contaminada, obtenemos la gráfica de variación de la concentración con respecto al tiempo (cinética de la concentración).

H <sub>2</sub> = 8 cm.		
TIEMPO (MIN)	ABS (530nm)	C (g/l)
0	0,366	0,0200
10	0,337	0,0184
20	0,322	0,0176
30	0,336	0,0184
40	0,323	0,0177
50	0,318	0,0174
60	0,317	0,0174
70	0,319	0,0174
80	0,330	0,0181
90	0,322	0,0176
100	0,328	0,0179
120	0,341	0,0186
130	0,325	0,0178
140	0,334	0,0183
150	0,329	0,0180
170	0,311	0,0170
180	0,311	0,0170
DIA SIGUIENTE	0,312	0,0171

**Tabla 3-15 Resultados concentración carbón activado y H = 8 cm**



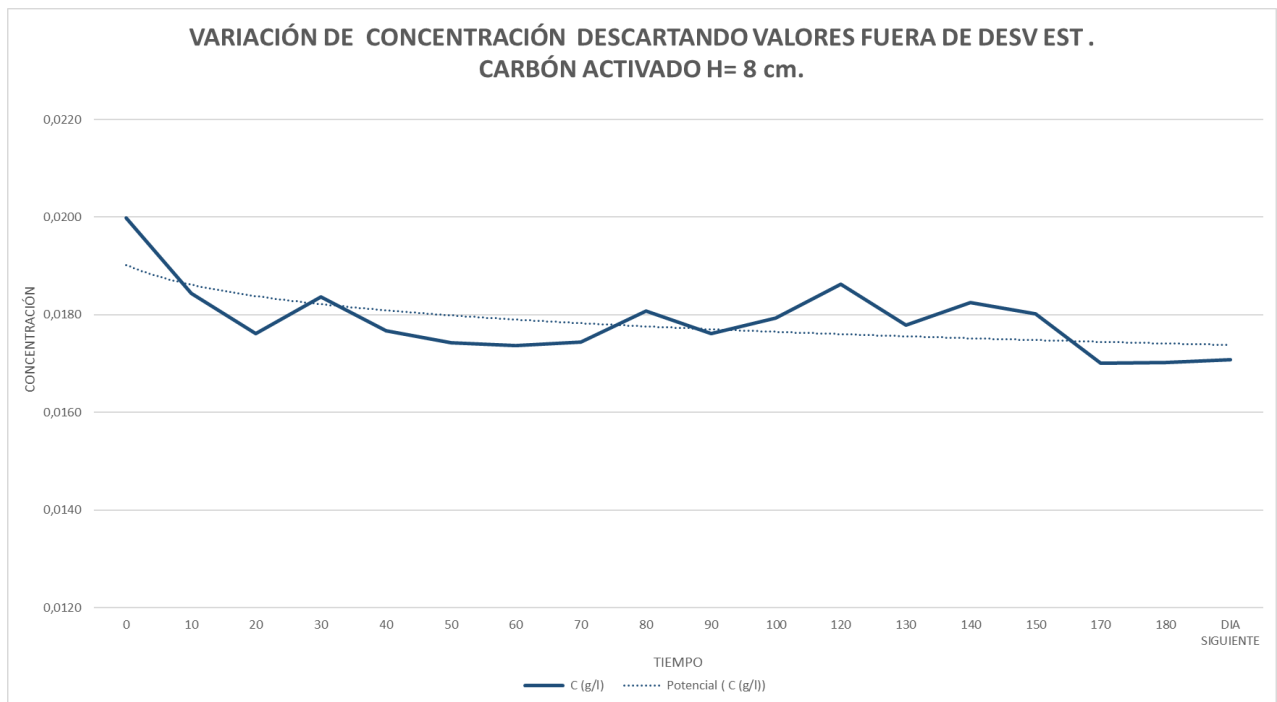


Figura 3-23 Variación de concentración carbón activado y H = 8 cm

En el *epígrafe 4.1.2*, como ya se ha comentado, analizaremos la globalidad de los resultados obtenidos.

13. Se procede a repetir la operación para el carbón activado con H = 16 cm. obteniéndose en este caso:

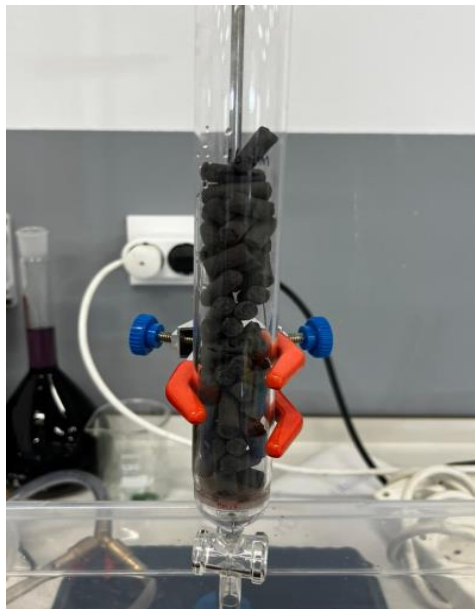


Figura 3-24 Torre carbón activado y H = 16 cm

DATOS MEDICIÓN MUESTRAS carbón activado H = 16 cm.						
TIEMPO (MIN)	ABS 1º MEDIC	ABS 2º MEDIC	ABS 3º MEDIC	MEDIA	LIM SUP	LIM INF
0	0,366	0,37	0,361	0,366	0,329699383	0,279133951
10	0,294	0,295	0,436	0,342	0,329699383	0,279133951
20	0,332	0,332	0,311	0,325	0,329699383	0,279133951
30	0,328	0,337	0,309	0,325	0,329699383	0,279133951
40	0,288	0,288	0,301	0,292	0,329699383	0,279133951
50	0,318	0,31	0,323	0,317	0,329699383	0,279133951
60	0,317	0,318	0,304	0,313	0,329699383	0,279133951
70	0,326	0,312	0,182	0,273	0,329699383	0,279133951
80	0,284	0,295	0,298	0,292	0,329699383	0,279133951
90	0,284	0,286	0,291	0,287	0,329699383	0,279133951
100	0,326	0,314	0,311	0,317	0,329699383	0,279133951
110	0,33	0,318	0,306	0,318	0,329699383	0,279133951
120	0,334	0,269	0,263	0,289	0,329699383	0,279133951
130	0,28	0,262	0,275	0,272	0,329699383	0,279133951
140	0,306	0,25	0,288	0,281	0,329699383	0,279133951
150	0,307	0,31	0,315	0,311	0,329699383	0,279133951
160	0,33	0,265	0,26	0,285	0,329699383	0,279133951
170	0,321	0,286	0,296	0,301	0,329699383	0,279133951
180	0,289	0,261	0,261	0,270	0,329699383	0,279133951
DIA SIGUIENTE	0,318	0,306	0,312	0,312	0,329699383	0,279133951
<b>MEDIA</b>	0,3139	0,2992	0,30015	0,304		
<b>DESV EST</b>	0,022688844	0,030452628	0,048663662	0,025		
<b>LIM SUP</b>	0,336588844	0,329652628	0,348813662	0,330		
<b>LIM INF</b>	0,291211156	0,268747372	0,251486338	0,279		

Tabla 3-16 Resultado absorbancia muestras carbón activado y H = 16 cm.

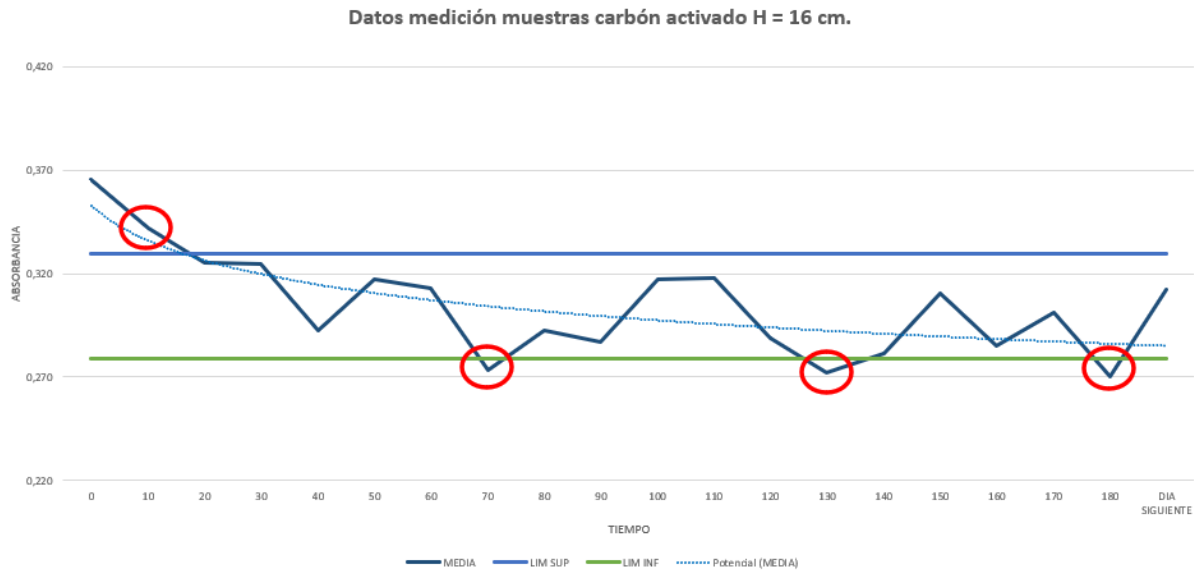
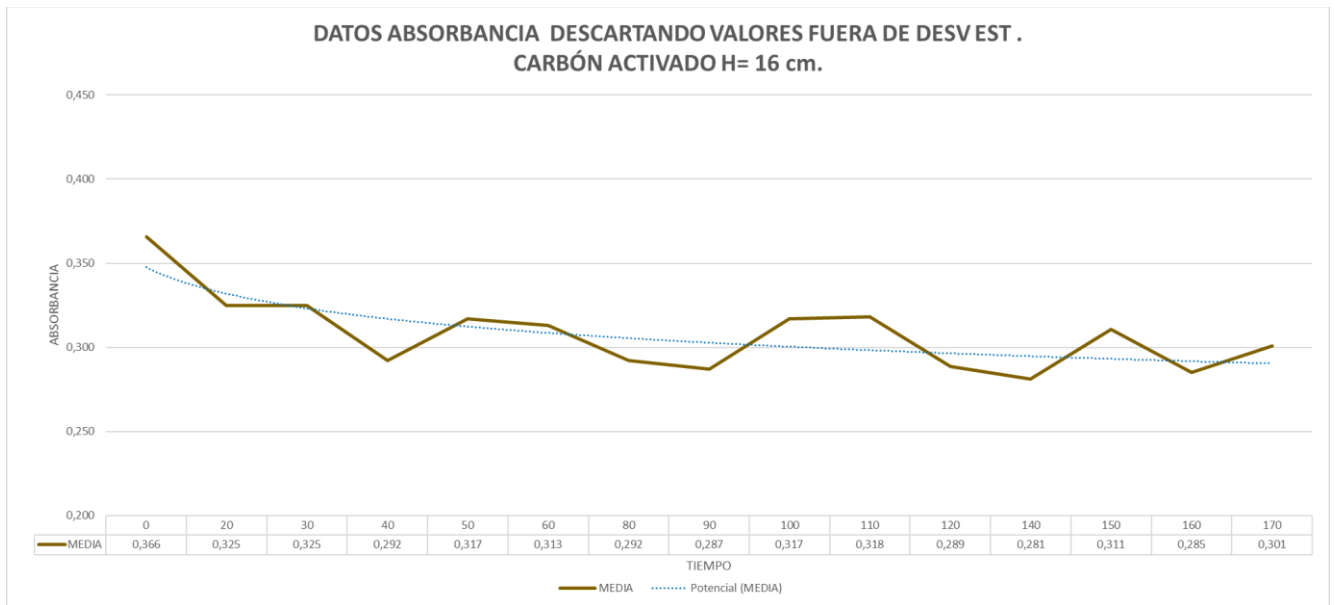


Figura 3-25 Datos medición muestras carbón activado y H = 16 cm

En este caso se observa que tenemos cuatro (4) valores fuera de límites, los cuales, como en casos anteriores desechamos:

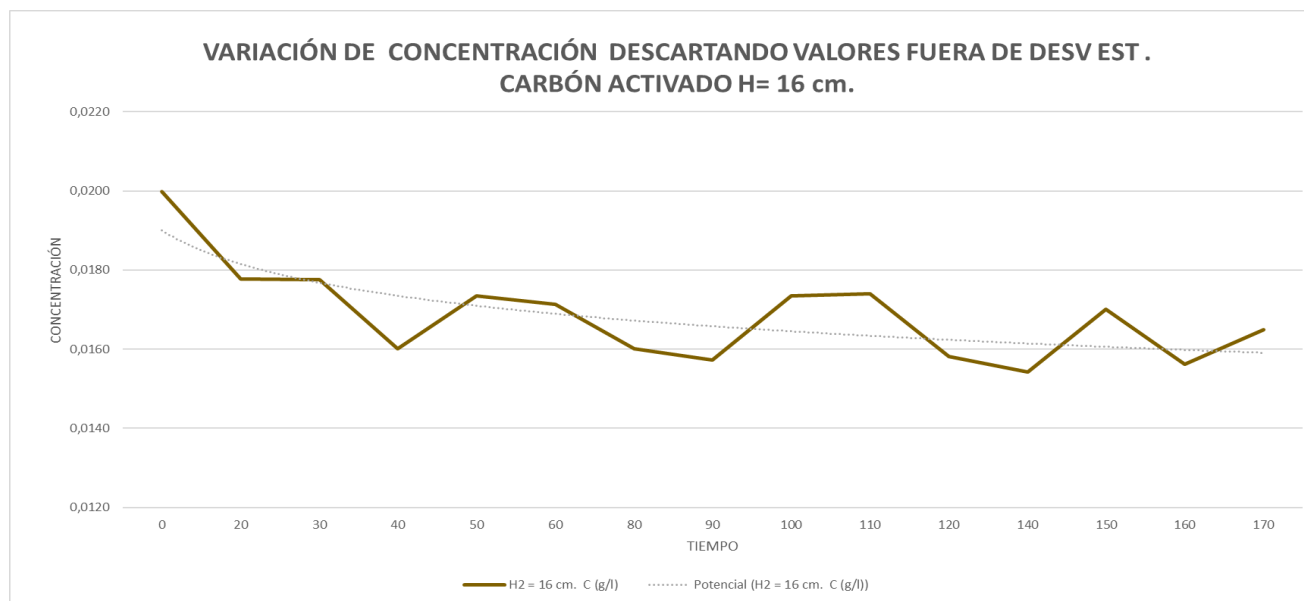


**Figura 3-26 Absorbancia muestras fuera desv. est. carbón Activado y H = 16cm**

De la misma manera que en los casos anteriores, sustituyendo los datos de absorbancia obtenidos en la recta de calibración de la disolución contaminada, obtenemos la tabla y gráfica de variación de la concentración con respecto al tiempo (cinética de la concentración).

<b>H<sub>2</sub> = 16 cm.</b>		
<b>TIEMPO (MIN)</b>	<b>ABS (530nm)</b>	<b>C (g/l)</b>
0	0,366	0,0200
20	0,325	0,0178
30	0,325	0,0178
40	0,292	0,0160
50	0,317	0,0173
60	0,313	0,0171
80	0,292	0,0160
90	0,287	0,0157
100	0,317	0,0173
110	0,318	0,0174
120	0,289	0,0158
140	0,281	0,0154
150	0,311	0,0170
160	0,285	0,0156
170	0,301	0,0165

**Tabla 3-17 Resultados concentración carbón activado y H = 16 cm.**



**Figura 3-27 Variación de concentración carbón activado y H = 16 cm**

Al igual que se ha realizado para el caso de la espirulina, se realiza el experimento con el vaso de precipitados para el carbón activado para analizar la compatibilidad de adsorbente y adsorbato independientemente del diseño de la planta.

1º. En un vaso de precipitados, se rellena medio litro de disolución contaminada de la que previamente se habrán extraído tres (3) muestras que analizaremos en el espectrofotómetro y a la que añadiremos 30 gramos de adsorbente, en este caso carbón activado:



**Figura 3-28 Vaso de precipitados con carbón activado y disolución contaminada**

2º Se sitúa el vaso con la disolución y el adsorbente (manteniéndolo 24 horas), para, de esta manera, permitir la correcta interacción entre adsorbato y adsorbente.

3º Se pasa la disolución mezclada por un filtro tipo “Melita”.



**Figura 3-29 Vaso de precipitados con carbón activado y proceso de filtrado**

4° Se toman tres (3) muestras de la disolución clarificada. Los resultados son los mostrados en la siguiente tabla;

Carbón Activado	1º muestra	2º muestra	3º muestra	Media	Concentración
Concentración inicial	0,366	0,37	0,361	0,3657	0,0200
Concentración después de 24 horas	0,300	0,299	0,358	0,3190	0,0175
$C_0 - C_{final}$					0,0025
$(C_0 - C_{final}) / C_0$					0,1263

**Tabla 3-18 Datos Concentración en vaso de precipitados carbón activado.**

5° Se analizan los resultados y se extraen las correspondientes conclusiones: Se analizan los resultados para, en el *epígrafe 4.1.2* de resultados, obtener conclusiones y realizar las correspondientes propuestas de actuación

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Resultados de las pruebas de funcionamiento

En este apartado se presentan e interpretan los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos. Dichos resultados y su posterior análisis nos permitirán obtener las correspondientes conclusiones, así como realizar propuestas de cara a líneas de trabajo futuras.

#### 4.1.1 *Espirulina*

Realizado el experimento para el contaminante “negro de eriocromo T” con la espirulina como adsorbente, se obtienen los siguientes resultados:

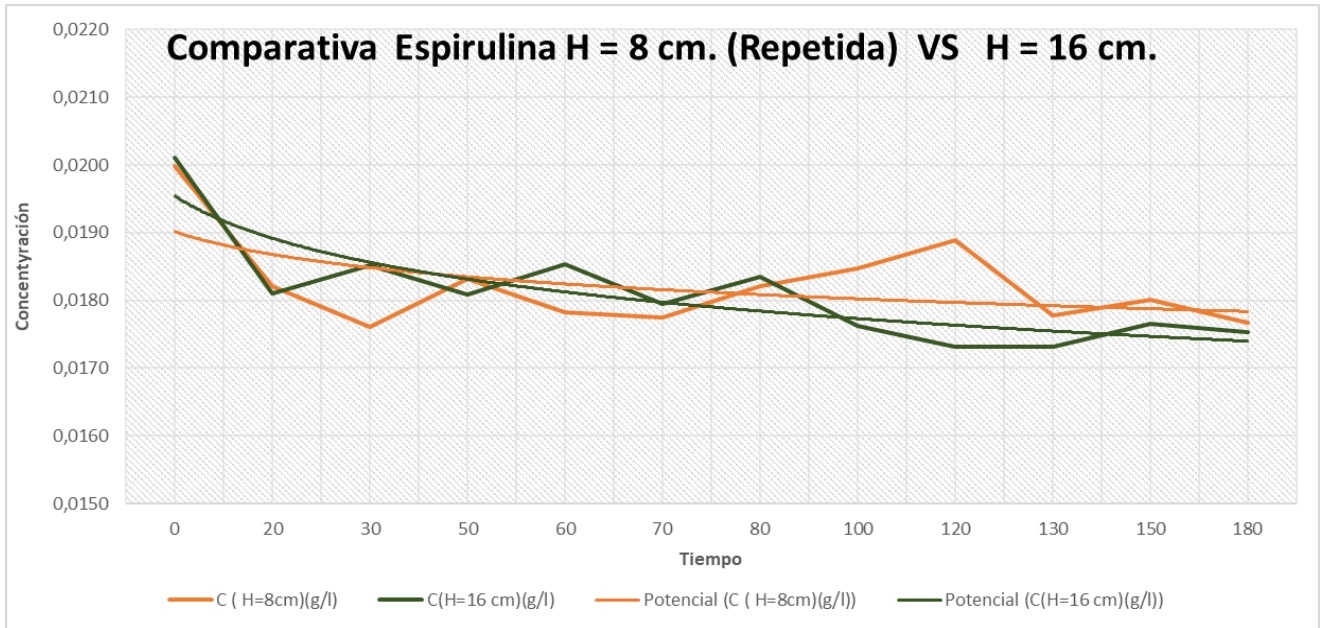
Recta de calibración =>  $y = 0,0541x + 0,0002$

DATOS COMPARATIVA DESCARTANDO FUERA DE DESVEST		
TIEMPO (MIN)	C ( H=8cm)(g/l)	C(H=16 cm)(g/l)
0	0,0200	0,0201
20	0,0182	0,0181
30	0,0176	0,0185
50	0,0183	0,0181
60	0,0178	0,0185
70	0,0177	0,0179
80	0,0182	0,0184
100	0,0185	0,0176
120	0,0189	0,0173
130	0,0178	0,0173
150	0,0180	0,0176
180	0,0177	0,0175
MEDIA	0,018	0,018

**Tabla 4-1 Resultados espirulina para las dos alturas consideradas**

Los resultados obtenidos en el experimento adsorbente espirulina para las distintas alturas son los mostrados en la siguiente gráfica:

Se realiza así mismo una comparativa de comportamiento de la Espirulina según la altura de adsorbente utilizado:



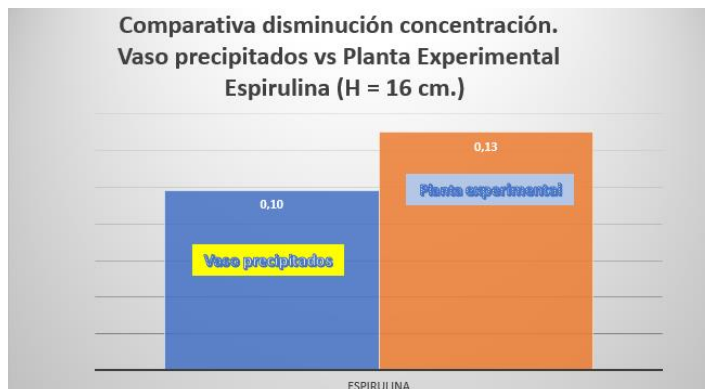
**Figura 4-1 Comparativa espirulina para  $H_1 = 8$  cm. y  $H_2 = 16$  cm.**

Se pueden extraer las siguientes consideraciones con respecto al comportamiento del contaminante “negro de eriocromo T” frente al adsorbente “espirulina”:

<b>Contaminante</b>	Negro de eriocromo T		
<b>Adsorbente</b>	Espirulina	<b>Alturas de Adsorbente</b>	$H_1 = 8$ cm y $H_2 = 16$ cm
<b>Concentración inicial</b>	$H_1 = 8$ cm => 0,0200		$H_2 = 16$ cm => 0,0201
<b>Concentración final</b> (media de los ocho (8) últimos valores muestreados)	$H_1 = 8$ cm => 0,0182		
	$H_2 = 16$ cm => 0,0174		
<b>Tiempo de medición</b> = 180 min	<b>Nº de mediciones</b> = 18	<b>Tiempo entre mediciones</b> = 10 min.	
<b>Consideraciones iniciales</b>			
1) El experimento para la altura de 8 cm es necesario repetirlo ya que únicamente se toma una muestra en cada intervalo temporal, observándose una gran variabilidad en los datos obtenidos, con comportamiento errático que no nos permiten la toma de conclusiones			
2) Se observa que las esferas deberían ser más pequeñas para aumentar la superficie de adsorción, hecho este complicado por la excesiva manualidad del proceso.			
3) Se desarrollan lecciones aprendidas en base a la experiencia en el desarrollo de los experimentos.			

**Tabla 4-2 Tabla de resultados espirulina**

Si se comparan los resultados obtenidos en el experimento realizado con el vaso de precipitados y los de la planta para la espirulina y  $H_2 = 16$  cm. (el mejor resultado obtenido con espirulina en la planta) el resultado es el mostrado en la siguiente gráfica:



**Figura 4-2 Comparativa de concentración vaso precipitados vs planta. Espirulina**

Se puede observar que el resultado obtenido en la planta supera al del vaso de precipitados, por lo que podemos asegurar que el diseño de la planta no penaliza la bondad del proceso, sino al contrario, ayuda en la consecución del objetivo de limpieza de la disolución contaminada.

Se puede por tanto concluir que los resultados no excesivamente halagüeños, en este caso, son debidos a la débil compatibilidad entre adsorbato y adsorbente.

#### 4.1.2 Carbón Activado

Realizado el experimento para el contaminante “negro de eriocromo T” con carbón activado como adsorbente, se obtienen los siguientes resultados:

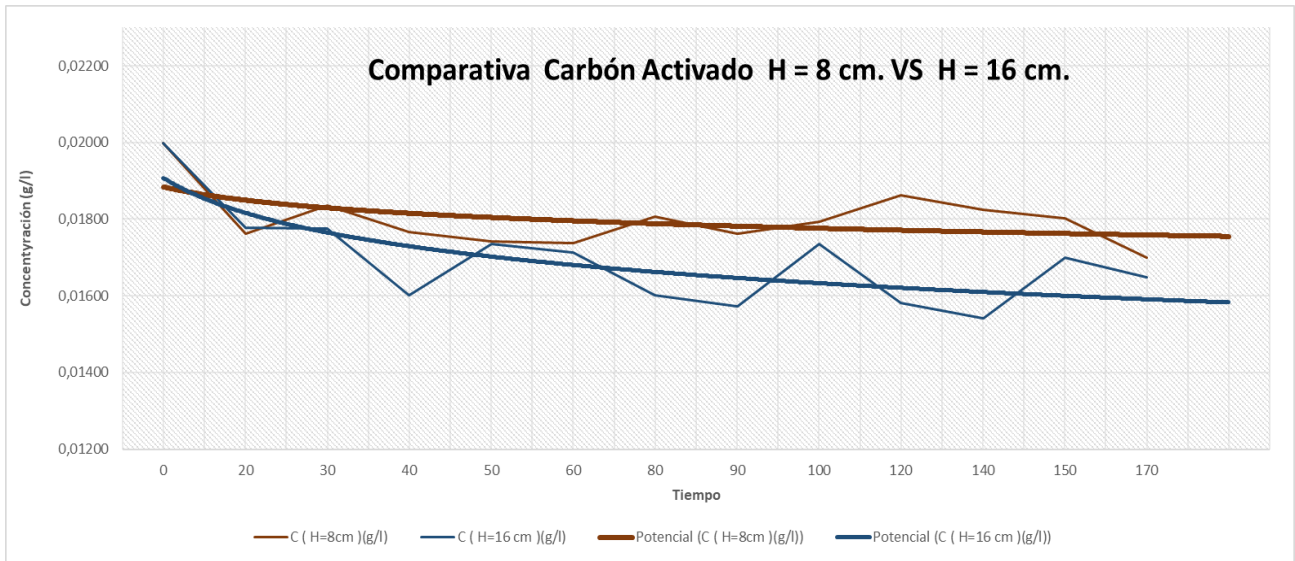
Recta de calibración  $\Rightarrow y = 0,0541x + 0,0002$  Como el contaminante es el mismo que en el experimento de la espirulina, la recta de calibración es la misma.

DATOS COMPARATIVA DESCARTANDO FUERA DE DESVEST		
TIEMPO (MIN)	C ( H=8cm )(g/l)	C ( H=16 cm )(g/l)
0	0,01998	0,0200
20	0,01762	0,0178
30	0,01836	0,0178
40	0,01767	0,0160
50	0,01742	0,0173
60	0,01737	0,0171
80	0,01807	0,0160
90	0,01762	0,0157
100	0,01793	0,0173
120	0,01863	0,0158
140	0,01825	0,0154
150	0,01802	0,0170
170	0,01701	0,0165
MEDIA	0,018	0,017

**Tabla 4-3 Resultados carbón activado para las dos alturas consideradas**



Realizamos, asimismo, una comparativa de comportamiento frente al contaminante “negro de eriocromo T” del carbón activado según la altura de adsorbente utilizado:



**Figura 4-3 Gráfica comparativa alturas carbón activado**

Tras el análisis de la comparativa de las alturas experimentadas, se observa una mayor disminución en la altura  $H_2 = 16$  cm que en la  $H_1 = 8$  cm.

Del mismo modo que en el caso anterior, se exponen las siguientes consideraciones respecto al comportamiento del contaminante “negro de eriocromo T” frente al adsorbente “carbón activado”.

<b>Contaminante</b>	Negro de eriocromo T		
<b>Adsorbente</b>	Carbón activado	<b>Alturas de Adsorbente</b>	$H_1 = 8$ cm y $H_2 = 16$ cm
<b>Concentración inicial</b>	$H_1 = 8$ cm => 0,0200		$H_2 = 16$ cm => 0,0200
<b>Concentración final</b> (media de los ocho (8) últimos valores muestreados)	$H_1 = 8$ cm => 0,0177		$H_2 = 16$ cm => 0,0162
<b>Tiempo de medición</b> = 180 min	<b>Nº de mediciones</b> = 18	<b>Tiempo entre mediciones</b> = 10 min.	
<b>Consideraciones iniciales</b>			
1) Realizamos el experimento para dos alturas: $H_1 = 8$ cm. Y $H_2 = 16$ cm.			
2) Como el carbón se suministra en pellets no se considera necesario el realizar esferas de adsorbente			
3) Se desarrollan lecciones aprendidas en base a la experiencia en el desarrollo de los experimentos.			

**Tabla 4-4 Tabla resultados carbón activado**

Del mismo modo que se realiza en el caso de la espirulina, se comparan los resultados obtenidos en el experimento del vaso de precipitados con los de la planta para carbón activado y  $H_2 = 16$  cm. (el mejor resultado obtenido con carbón activado en la planta):

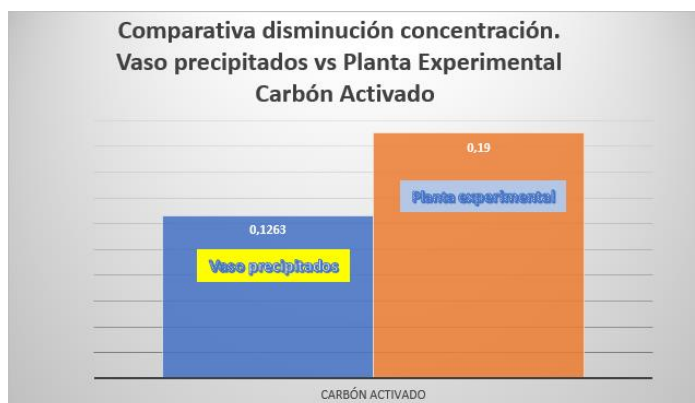


Figura 4-4 Comparativa de concentración vaso precipitados vs planta. Carbón activado.

En la gráfica se puede observar que el resultado de la planta supera al del vaso de precipitados (similar al obtenido en el caso de la espirulina) por lo que podemos asegurar que el diseño de la planta no penaliza la bondad del proceso, sino al contrario, ayuda en la consecución del objetivo de limpieza de la disolución contaminada.

Se puede por tanto concluir, al igual que en el caso de la espirulina, que los resultados no excesivamente halagüeños son debidos a la débil compatibilidad entre adsorbato y adsorbente.

#### 4.1.3 Análisis y comparativa de resultados

En este apartado se realizarán diferentes comparativas entre los distintos resultados obtenidos con las distintas opciones. De esta manera obtendremos una matriz de información que nos facilitará la realización de un análisis final y la posterior toma de decisiones.

TIEMPO (MIN)	C (g/l) H = 8 cm.	
	ESPIRULINA	CARBÓN ACTIVADO
0	0,02	0,01998
20	0,0182	0,01762
30	0,0176	0,01836
50	0,0183	0,01742
60	0,0178	0,01737
80	0,0182	0,01807
100	0,0185	0,01793
120	0,0189	0,01863
150	0,018	0,01802

Tabla 4-5 Comparativa resultados para  $H_1 = 8$  cm

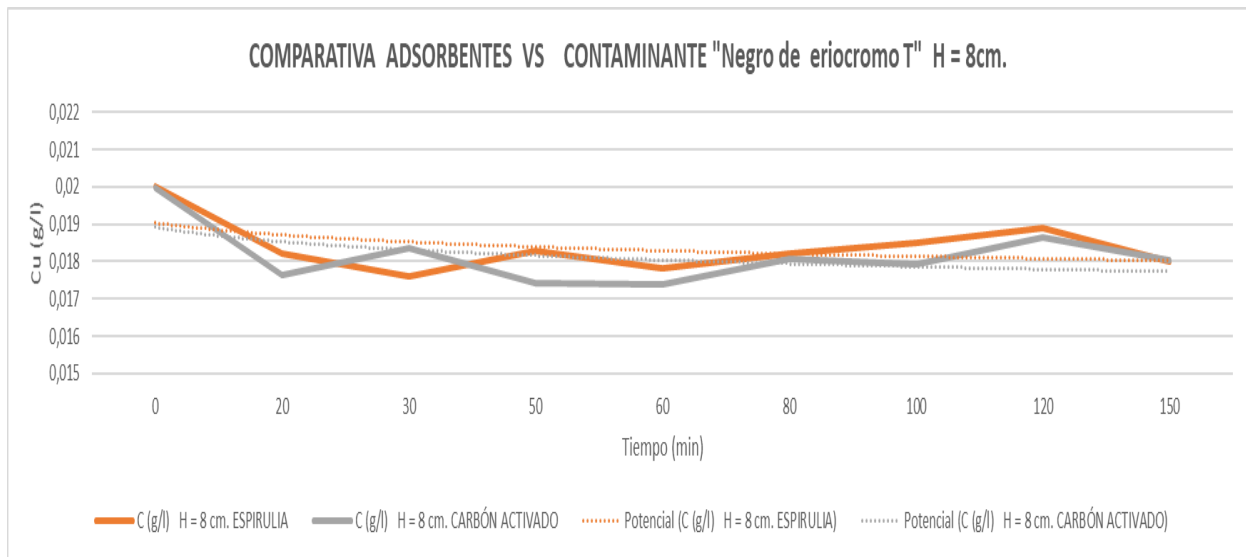


Figura 4-5 Gráfica comparativa adsorbentes para H<sub>1</sub> = 8 cm.

Realizamos la misma comparativa de datos para la segunda altura, en este caso H<sub>2</sub> = 16 cm.

TIEMPO (MIN)	C (g/l) H = 16 cm.	
	ESPIRULINA	CARBÓN ACTIVADO
0	0,02010	0,02000
20	0,01810	0,01780
30	0,01850	0,01780
50	0,01810	0,01730
60	0,01850	0,01710
80	0,01840	0,01600
100	0,01760	0,01730
120	0,01730	0,01580
150	0,01760	0,01700

Tabla 4-6 Comparativa adsorbentes para H<sub>2</sub> = 16 cm

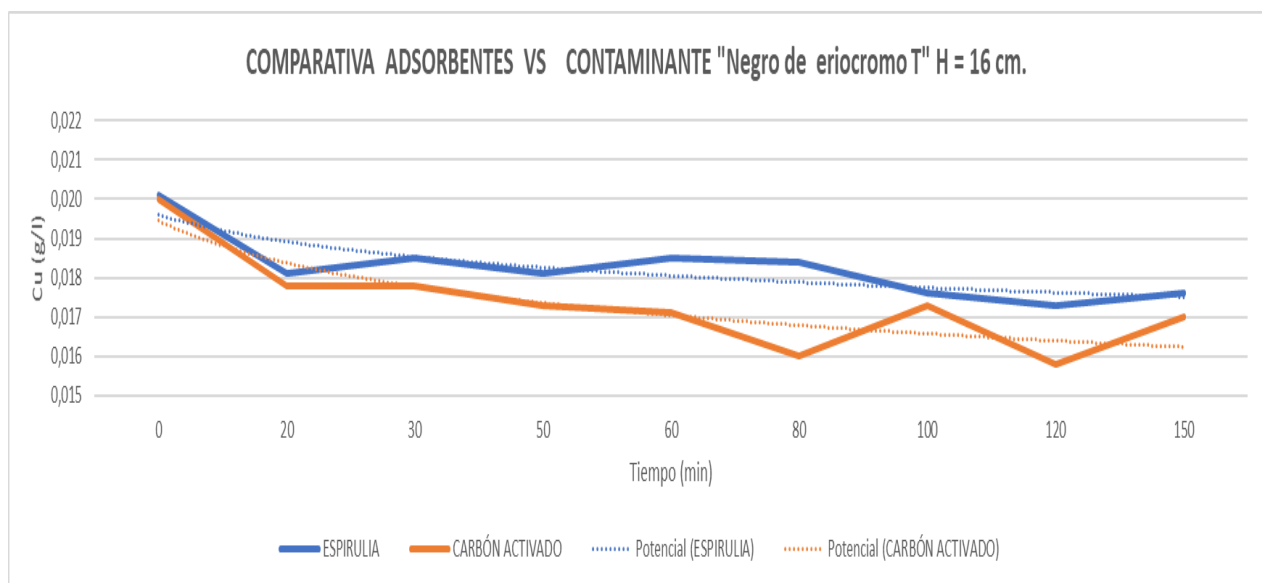


Figura 4-6 Gráfica comparativa adsorbentes para H<sub>2</sub> = 16 cm

A continuación, se muestra una comparativa de la disminución de concentración con los dos adsorbentes considerados y las alturas realizadas en los experimentos:

Adsorbente	Altura adsorbente	Concentración inicial	Media concentración 8 últimos valores	Disminución de concentración Inicial vs media 8 últimos valores	% Disminución Concentración
Carbón Activado	H = 16 cm.	0,0200	0,0162	0,19	19%
Carbón Activado	H = 8 cm,	0,0198	0,0177	0,11	11%
Espirulina	H = 16 cm.	0,0201	0,0174	0,13	13%
Espirulina	H = 8 cm,	0,0200	0,0182	0,09	9%

Tabla 4-7 Comparativa disminución de contaminantes para los distintos adsorbentes y alturas experimentadas

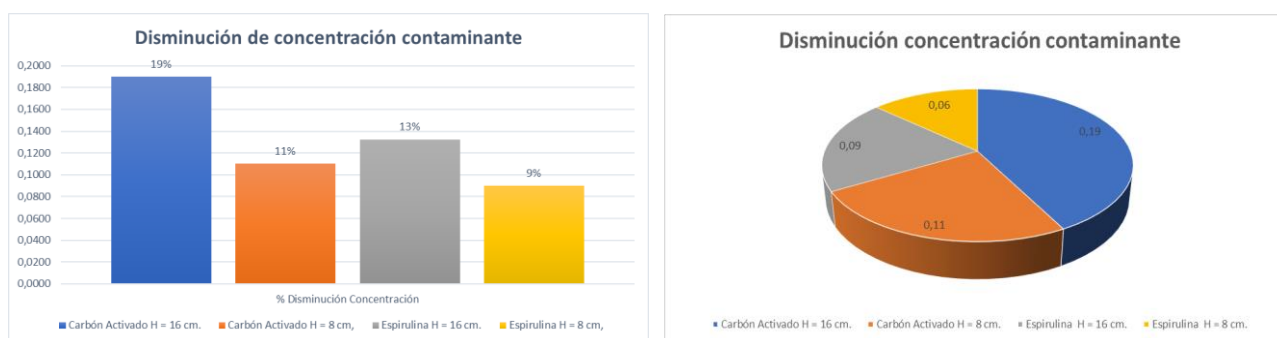


Figura 4-7 Gráficas comparativas de disminución de contaminantes para los distintos adsorbentes y las distintas alturas experimentadas.

EXPERIMENTO	MEJORAS / CAMBIOS RESPECTO AL EXPERIMENTO ANTERIOR
1º	NEGRO DE ERIOCROMO T - ESPIRULINA 8 CM NA ( PRIMERO)
2º	NEGRO DE ERIOCROMO T - ESPIRULINA 16CM USO DE AGITADOR TOMA DE MEDIDAS SIEMPRE EN EL MISMO LUGAR EXPERIENCIA EN LA GENERACIÓN DE ESFERAS EXPERIENCIA EN EL PROCESO
3º	NEGRO DE ERIOCROMO T - CARBÓN ACTIVADO 8 CM CAMBIO DE TIPO DE ADSORBENTE FORMA DE PELLET NO NECESIDAD DE ESFERAS MANUALES EXPERIENCIA EN EL PROCESO
4º	NEGRO DE ERIOCROMO T - CARBÓN ACTIVADO 16 CM OPTIMIZACIÓN DE TAMAÑO Y FORMA DE LAS PARTICULAS DE ADSORBENTE ( BUSCANDO MÁS REGULARIDAD EN SU FORMA) EXPERIENCIA EN EL PROCESO

Tabla 4-8 Cambios y/o mejoras en experimentos a lo largo del proceso

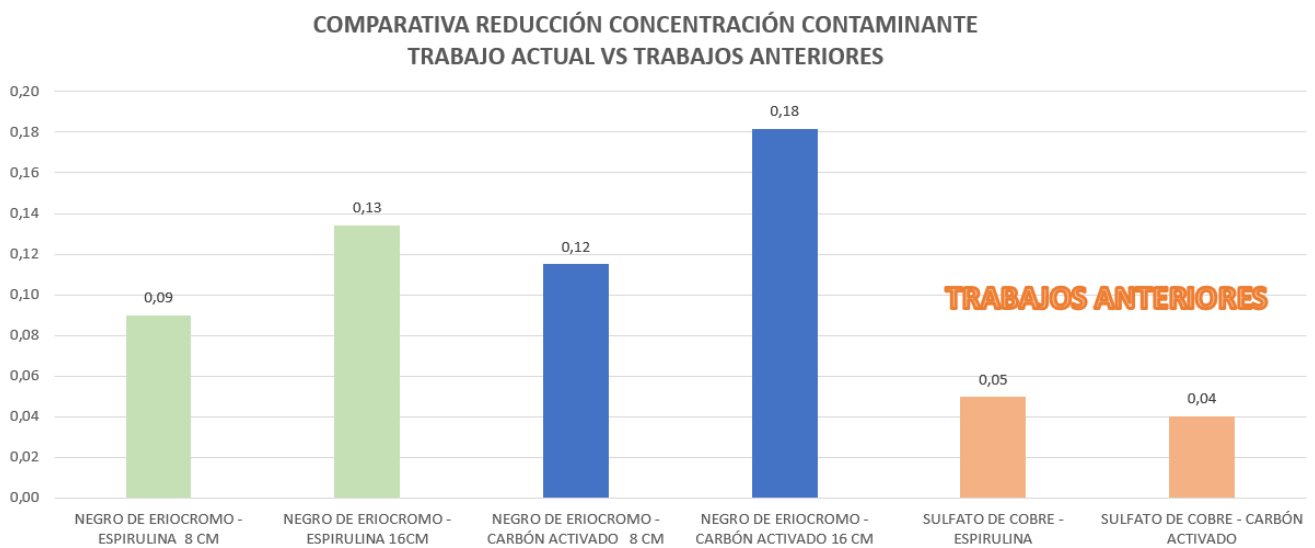
En el *epígrafe 5.1* se expondrán las conclusiones relativas a la matriz de resultados obtenida y expuesta en las gráficas anteriores.

A continuación, se muestra una comparativa entre los resultados obtenidos en el trabajo con los similares de trabajos anteriores [10]:

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UNA PLANTA PILOTO DE DEPURACIÓN DE AGUAS  
BASADA EN ADSORCIÓN

TIPO DE CONTAMINANTE V TIPO DE ADSORBENTE	CONCENTRACIÓN INICIAL ( $C_0$ ) (g/l)	MEDIA DE LOS ÚLTIMOS 8 VALORES DE CONCENTRACIÓN ( $C_{media}$ ) (g/l)	$C_0 - C_{media}$	$(C_0 - C_{media}) / C_0$
NEGRO DE ERIOCROMO T - ESPIRULINA 8 CM	0,02	0,0182	0,0018	0,09
NEGRO DE ERIOCROMO T - ESPIRULINA 16CM	0,0201	0,0174	0,0027	0,13
NEGRO DE ERIOCROMO T - CARBÓN ACTIVADO 8 CM	0,02	0,0177	0,0023	0,12
NEGRO DE ERIOCROMO T - CARBÓN ACTIVADO 16 CM	0,0198	0,0162	0,0036	0,18
SULFATO DE COBRE - ESPIRULINA	4,97	4,723	0,247	0,05
SULFATO DE COBRE - CARBÓN ACTIVADO	4,81	4,616	0,194	0,04

Trabajos anteriores



**Figura 4-8 Comparativa de reducción de contaminante trabajo actual vs trabajos anteriores**

Tras el análisis de los resultados explicitados en el *epígrafe 4.1.3*, se pueden extraer las siguientes consideraciones:

PROCESO	ANÁLISIS	DIAGNÓSTICO
Diseño de la planta	El diseño de la planta está basado en las lecciones aprendidas de trabajos anteriores [10]. Se hace complicado mantener un régimen estable de flujo de disolución.	Tras varias pruebas de regulación de caudal, ayudados por la válvula de tres vías, llegamos a una solución de compromiso que nos permite un retorno constante de la solución clarificada.
Realización de esferas de adsorbente espirulina	El proceso de formación de esferas de espirulina es excesivamente manual y de difícil ejecución. Se hace complicado la generación de esferas de poco diámetro que mejoren la superficie de adsorción.	Este punto se considera clave en los resultados y condicionante en la bondad del proceso conseguido. Consiguiendo una mejor esferificación se obtendría un mejor rendimiento de la planta.

PROCESO	ANÁLISIS	DIAGNÓSTICO
Pellets de carbón activado	El suministro del carbón activado en forma de pellets hace innecesario la generación de esferas. Se detecta que la forma cilíndrica de los pellets provoca demasiados espacios en la torre, que hacen que la disolución fluya con no demasiado contacto con el adsorbente.	Se decide partir los pellets por la mitad para intentar hacer piezas más regulares en forma (con tendencia esférica) para que de esta manera, se rellene mejor la torre con el adsorbente y se produzca una mayor superficie de adsorción.
Toma de muestras	En la toma de muestras es fundamental conseguir que se realice de forma que la disolución esté perfectamente mezclada con la disolución limpia proveniente de la torre de adsorción. Es necesario establecer un mecanismo de mezcla de la disolución inicial con la clarificada en el recipiente, para obtener un resultado lo más fiable posible.	Se adquiere un agitador portátil que nos permita realizar una mejor remoción de la disolución en el recipiente, sin entorpecer el proceso de bombeo.
Toma de datos en espectrofotómetro	Se detecta variabilidad en la toma de datos para una misma muestra realizada en el mismo intervalo temporal.	<p>Se realizan tres (3) mediciones para cada muestra, tomando la media de los resultados obtenidos.</p> <p>Se calcula la desviación estándar, con los límites superior e inferior. Se desechan los valores fuera de límites.</p>

**Tabla 4-9 Análisis y diagnóstico de la realización de los experimentos**

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones de los resultados obtenidos en base a los objetivos propuestos.

Tras la realización de las distintas experiencias propuestas y su posterior discusión y análisis, se sacan las siguientes conclusiones:

- 1) El contaminante empleado es un colorante azoico de compleja eliminación. Tras los resultados obtenidos, se puede concluir que, como se muestra en las distintas cinéticas obtenidas, si bien se produce una disminución en la concentración de contaminante, esta no es todo lo satisfactoria que se esperaba. También se concluye que el tipo de adsorbente es bastante influyente en los resultados y que los resultados no son penalizados por el diseño de la planta, tal y como se complementa en los objetivos posteriores.
- 2) Se produce una mayor disminución de concentración de contaminante cuanto mayor es la altura de adsorbente dispuesta en la torre. Este hecho tiene lógica, ya que, a mayor altura, mayor superficie de adsorción. Se puede apreciar una potenciación en el caso del carbón activado, por el proceso más limpio del propio adsorbente. (pellets frente a esferas realizadas manualmente) también influido por factor aprendizaje del proceso.
- 3) Tras el análisis de los resultados obtenidos en la planta y en los experimentos en vaso de precipitados *Figura 4-2 Comparativa de concentración vaso precipitados vs planta. Espirulina* y *Figura 4-4 Comparativa de concentración vaso precipitados vs planta. Carbón activado*. para los distintos adsorbentes, se puede concluir:
  - 3.1) La compatibilidad entre el negro de eriocromo T y la espirulina es menor que con el carbono activado.
  - 3.2) Los resultados entre el negro de eriocromo T y cada uno de los adsorbentes, nos indica que la bondad del proceso es ligeramente superior en la planta que en el vaso de precipitados (en el caso de los dos adsorbentes), lo que nos induce a pensar que la principal limitación es la propia compatibilidad entre adsorbente y adsorbato y no en el propio diseño de la planta. Es por ello, que el diseño de la planta no penaliza en absoluto la bondad del proceso. Por lo que se concluye que el diseño es válido.
- 4) Tal y como se ha planteado en el *epígrafe 3.1.2*, nos hemos basado en las lecciones aprendidas de otros trabajos anteriores [10].

Se ha detectado que el principal punto de mejora de la planta está en garantizar el flujo de disolución en la torre de adsorción. Una vez regulado el flujo de la mejor manera posible con la ayuda de la válvula de tres vías, se puede dar el caso de desbordamientos en función de la clase / cantidad de adsorbente. Una mejora en el diseño sería la utilización de medidores de nivel que ayuden a la regulación de flujo en la propia torre de adsorción, activando/ desactivando el funcionamiento de la bomba según la necesidad detectada.

5) En el *epígrafe 5.2* se realiza una propuesta de aplicación que trata de cumplir este objetivo. Es una propuesta que se fundamenta en lo desarrollado y aprendido a lo largo del trabajo, que permite la implantación de líneas de trabajo futuras (tanto en próximos trabajos como, por ejemplo, en futuros proyectos i+d+i).

## **5.2 Propuesta de aplicación en planta TAR de buques de la Armada.**

Tras el desarrollo del trabajo, tanto en la parte teórica del análisis de las plantas instaladas actualmente en buques de la Armada, así como los resultados obtenidos en los diferentes experimentos, se puede concluir, de cara a la aplicación de una planta por el método de adsorción en buques de la Armada (objeto del presente trabajo), las siguientes consideraciones:

1º En los buques, tanto en su modo de operación, como en su estancia en puerto, se producen multitud de contaminantes tal y como se ha desarrollado en el *epígrafe 1.5.1*.

2º El método de adsorción posee gran especificidad, esto es, determinados materiales adsorbentes son adecuados para determinados contaminantes, no siendo válido cualquier adsorbente para el tratamiento de cualquier contaminante. De esta manera, se necesitaría disponer de una gran variedad de adsorbentes para tratar adecuadamente todos los contaminantes presentes en las aguas residuales. Este hecho limita en gran medida su ámbito de aplicación en el sector naval, donde el espacio es un factor importante de cara a la elección del sistema a utilizar.

3º Los resultados obtenidos en los diferentes experimentos realizados, aun teniendo en cuenta la no excesiva bondad de los mismos, sí muestran, en las gráficas de las cinéticas de los adsorbentes, que el proceso no es excesivamente rápido y necesita un tiempo mínimo para poder lograr los frutos esperados. Hecho este que también penaliza su utilización en buques de la Armada, ya que como se ha comentado en el *epígrafe 2.3*, un requisito básico en estos buques es una capacidad de respuesta prácticamente al 100% en el momento de su puesta en funcionamiento.

Atendiendo a las consideraciones mencionadas, se realizan las siguientes propuestas de aplicación de cara a su utilización en buques de la Armada, objetivo del presente trabajo:

Tal y como hemos podido comprobar en el *epígrafe 2.3*, en la actualidad, en los buques de la Armada en su práctica totalidad, las plantas de tratamiento de aguas residuales son del tipo físico – químico, por los motivos expuestos en dicho epígrafe.

Como se ha expuesto en el desarrollo del funcionamiento de dicho tipo de plantas, una fase del proceso es la de clarificación, donde la presencia de contaminantes ya es reducida y mucho más concreta. **Es en ese momento del proceso donde se plantea la utilización de la planta de adsorción.**

Esto es, se propone la planta de adsorción como una planta que forme parte de un proceso global (por ejemplo, físico–químico, ya que, como hemos visto, es la más habitual en los buques de la Armada), complementado el proceso de desinfección presente en la misma. De esta manera, con dicha planta, se tratarían de forma adecuada aquellos contaminantes que, habiendo superado los primeros procesos



(coagulación/floculación, decantación/flotación) y habiendo pasado la disolución al proceso de desinfección, se eliminarían en dicha parte del proceso previo a su descarga al mar.

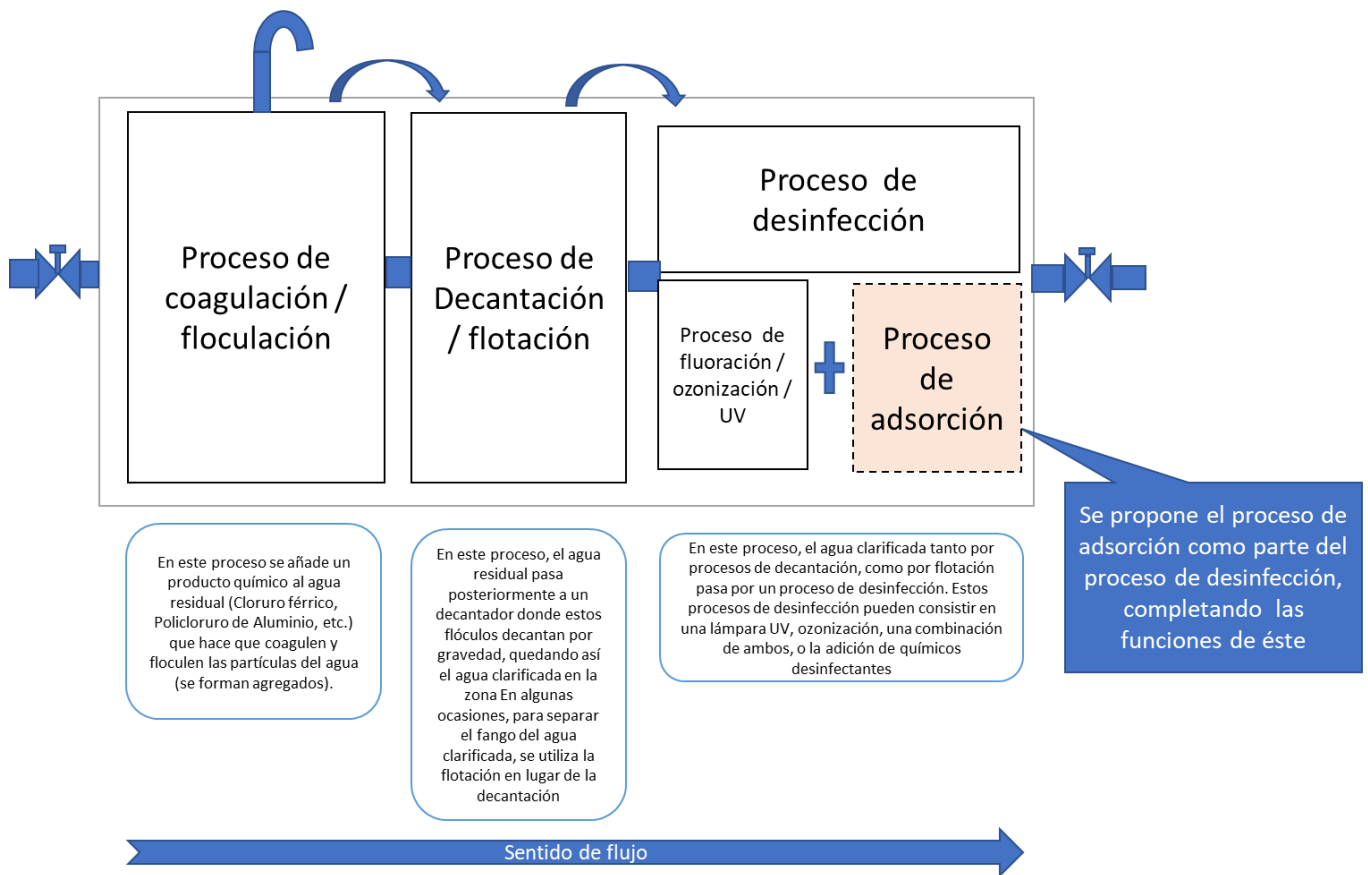


Figura 5-1. Propuesta de aplicación de planta de adsorción integrada en una físico – química

Es por todo ello que podemos considerar la adsorción, dentro de las plantas de tratamiento de las aguas residuales en buques de la Armada, como un proceso terciario, orientado a la eliminación de contaminantes específicos que no se hayan podido eliminar en las fases anteriores de la planta y encajada dentro del proceso de desinfección. Formando parte de un proceso de tratamiento global.

### 5.3 Líneas futuras de trabajo.

En base a todo lo anteriormente expuesto se proponen líneas de trabajo a futuro, de cara a afinar la utilización de la planta de adsorción integrada en un proceso global dentro de un buque de la Armada, objetivo principal del presente trabajo:

1º) Estudio pormenorizado de los contaminantes presentes en las aguas residuales de un buque, una vez realizados los procesos de coagulación/floculación y decantación/flotación de una planta físico – química (con la disolución clarificada).

2º) Experimentación de distintos adsorbentes que sean compatibles con los contaminantes referenciados en el punto 1º.

3º) Propuesta de integración de la planta de adsorción con los adsorbentes señalados, dentro de la planta físico – química global.

4º) Continuar perfeccionando el diseño de la planta con el fin de perfeccionar su rendimiento. Al mismo tiempo se propone la utilización de adsorbentes como restos de frutas, cáscaras de frutos secos o incluso posos de café.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Organización Marítima Internacional, «Marpol 73/78»,» 1973/1978. [En línea]. Available: [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-thePrevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\)](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-thePrevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL)). [Último acceso: 23 Enero 2023].
- [2] MINISDEF, «Directiva\_107\_97,» [En línea]. Available: <https://www.defensa.gob.es/medioambiente/formaciondivulgacion/politicaambiental/>. [Último acceso: 23 Enero 2023].
- [3] ARMADA, «Sistema Gestión Medioambiental en la Armada,» [En línea]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiipoe70PT8AhWgg\\_0HHRK\\_BpIQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.defensa.gob.es%2FArmadaPortal%2Fpage%2FPortal%2FArmadaEspañola%2Fconocenosmedioambiente%2FprefLang-es%2](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiipoe70PT8AhWgg_0HHRK_BpIQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.defensa.gob.es%2FArmadaPortal%2Fpage%2FPortal%2FArmadaEspañola%2Fconocenosmedioambiente%2FprefLang-es%2). [Último acceso: 26 Enero 2023].
- [4] «LEY 21/2013, DE 9 DE DICIEMBRE, DE EVALUACIÓN AMBIENTAL,» 2013. [En línea]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwihv7HD4cb9AhWpUaQEHZqLDwUQFnoECE0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.congreso.es%2Fdocu%2Fdocum%2Fddocum%2Fdosieres%2Fsleg%2Flegislatura\\_12%2Fsp1\\_17%2Fpdfs%2F15.pdf&usg=AOvVaw3Ze73b7oxeaVr-03](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwihv7HD4cb9AhWpUaQEHZqLDwUQFnoECE0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.congreso.es%2Fdocu%2Fdocum%2Fddocum%2Fdosieres%2Fsleg%2Flegislatura_12%2Fsp1_17%2Fpdfs%2F15.pdf&usg=AOvVaw3Ze73b7oxeaVr-03). [Último acceso: 30 Enero 2023].
- [5] M. d. T. Ecológica, «Convenio de Ramsar - Ministerio de Transición Ecológica,» 1971. [En línea]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjm0Oys5Mb9AhVxTaQEHWKPBREQFnoECAsQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.miteco.gob.es%2Fes%2Fbiodiversidad%2Ftemas%2Fecosistemas-y-conectividad%2Fconservacion-de-humedales%2Fch\\_hu](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjm0Oys5Mb9AhVxTaQEHWKPBREQFnoECAsQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.miteco.gob.es%2Fes%2Fbiodiversidad%2Ftemas%2Fecosistemas-y-conectividad%2Fconservacion-de-humedales%2Fch_hu). [Último acceso: 25 Enero 2023].
- [6] MINISDEF, «Instrucción\_56\_2011,» 2011. [En línea]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiV48ytnJf9AhXVTaQEHTY-Cy0QFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.defensa.gob.es%2Fmedioambiente%2FGalerias%2Fformacion%2Fficheros%2FInstruccin\\_56\\_2011.pdf&usg=AOvVaw2Ji9nfw](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiV48ytnJf9AhXVTaQEHTY-Cy0QFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.defensa.gob.es%2Fmedioambiente%2FGalerias%2Fformacion%2Fficheros%2FInstruccin_56_2011.pdf&usg=AOvVaw2Ji9nfw). [Último acceso: 23 Enero 2023].

- [7] MINISDEF, «Instrucción\_59\_2014\_modif\_56\_2011,» 2014. [En línea]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjA76vMnJf9AhUDQKQEHWrSA5YQFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.defensa.gob.es%2Fmedioambiente%2FGalerias%2Fformacion%2Fficheros%2FInstruccin\\_59\\_2014\\_modif\\_56\\_2011.pdf&usg](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjA76vMnJf9AhUDQKQEHWrSA5YQFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.defensa.gob.es%2Fmedioambiente%2FGalerias%2Fformacion%2Fficheros%2FInstruccin_59_2014_modif_56_2011.pdf&usg). [Último acceso: 23 Enero 2023].
- [8] M. p. l. t. e. y. e. r. demográfico, «Convención OSPAR,» 1992. [En línea]. Available: [https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/proteccion-internacional-mar/convenios-internacionales/convenio\\_ospar.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/proteccion-internacional-mar/convenios-internacionales/convenio_ospar.aspx). [Último acceso: 28 Enero 2023].
- [9] TN Paz Armada, «Selección de residuos orgánicos como Adsorbentes de bajo coste para la eliminación de contaminantes en aguas.,» 2017 - 2018.
- [10] AN Maza Fernández, «Construcción de un sistema de adsorción a escala en el laboratorio para la depuración de aguas de buques con residuos,» 2020 - 2021.
- [11] P. B. Díaz, «Estudio y dimensionamiento de la instalación de recogida y tratamiento de aguas negras en un buque,» 2016. [En línea]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwium-Krqp9AhWFwAIHHQuxB-AQFnoECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Fupcommons.upc.edu%2Fbitstream%2F2117%2F85541%2F1%2F112385\\_Estudio%2By%2Bdimensionamiento%2Bde%2Bla%2Binstalaci%25](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwium-Krqp9AhWFwAIHHQuxB-AQFnoECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Fupcommons.upc.edu%2Fbitstream%2F2117%2F85541%2F1%2F112385_Estudio%2By%2Bdimensionamiento%2Bde%2Bla%2Binstalaci%25). [Último acceso: 17 Febrero 2023].
- [12] J. Baturone, «TFG: Tratamiento de aguas grises para su utilización y posible implantación en buques de la armada,» 2016. [En línea]. [Último acceso: 15 Febrero 2023].
- [13] OMI, «Gestión del agua de lastre,» [En línea]. Available: <https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/BallastWaterManagement.aspx>. [Último acceso: 1 Marzo 2023].
- [14] GEA, «Tratamiento del agua de sentina,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi hotjc2tb9AhUgVKQEHVxsDJIQFnoECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.gea.com%2Fes%2Fmarine%2Fprotecting-seas-oceans%2Fbilge-water-treatment.jsp&usg=AOvVaw30ca3wjbR2Q5rqlGdnVOK2>. [Último acceso: 24 Febrero 2023].
- [15] A. Valdivieso, «Tipos de contaminantes del agua,» [En línea]. Available: <https://www.iagua.es/respuestas/tipos-contaminantes-agua>. [Último acceso: 1 Marzo 2023].
- [16] F. aquae, «Los 8 principales contaminantes del agua,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/los-residuos-que-mas-contaminan-el-agua/>. [Último acceso: 02 Marzo 2023].
- [17] L. F. Roldán, «Ecología verde.Tipos de contaminación del agua,» [En línea]. Available: <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-contaminacion-del-agua-2660.html>. [Último acceso: 2 Marzo 2023].
- [18] AN Blanco Bazquez, «Evaluación de alternativas tecnológicas y diseño preliminar de un sistema de depuración de aguas residuales para buques,» 2020 - 2021.

- [19] R. V. Caro, «Sistemas de tratamiento de aguas residuales a bordo,» 2020. [En línea]. Available: <https://exponav.org/blog/puertos-y-buques/sistemas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-a-bordo/>. [Último acceso: 3 Marzo 2023].
- [20] Bluegold, «Biorreactor de membrana MBR: Descripción y su aplicación al tratamiento de aguas residuales,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.bluegold.es/biorreactores-de-membrana-mbr-descripcion-y-aplicacion/>. [Último acceso: 25 Febrero 2023].
- [21] DETEGASA, «Planta de tratamiento de aguas residuales fragata F-105; Planta FQ-24 ; FQ-8469-02,» 2014.
- [22] DETEGASA, «Planta de tratamiento de aguas residuales LHD J.Carlos I ; FQ-125 ; FQ-5797-02,» 2011.
- [23] NAVANTIA, «Especificación Panta de tratamiento de aguas residuales para buques serie F-110,» 2022.
- [24] OMI, «Prevención de la contaminación por las aguas sucias de los buques,» 2003. [En línea]. Available: <https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Sewage-Default.aspx>. [Último acceso: 26 Febrero 2023].
- [25] R. Leiva Ramos, «Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida,» 2017. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/320407302\\_Importancia\\_y\\_Aplicaciones\\_de\\_la\\_Adsorcion\\_en\\_Fase\\_Liquida](https://www.researchgate.net/publication/320407302_Importancia_y_Aplicaciones_de_la_Adsorcion_en_Fase_Liquida). [Último acceso: 27 Febrero 2023].
- [26] A. V. Braderas, «La operación unitaria de adsorción,» Facultad de química UNAM, C.U. , México D.F., 2014.
- [27] W. L. Carranza, Adsorción Sólido Fluido: Equilibrio de fases y separaciones., Editorial Académica Española , 2018.
- [28] U. d. Valencia, «Tema 7. Superficies sólidas: adsorción y catálisis heterogénea,» [En línea]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwja5pn3gLP9AhWaO-wKHcWAAGAQFnoECEkQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.uv.es%2Ftunon%2Fpdf\\_documento%2FSuperficies\\_Solidas\\_A.pdf&usg=AOvVaw0KHkqW1-n\\_F7NrdK-BroWE](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwja5pn3gLP9AhWaO-wKHcWAAGAQFnoECEkQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.uv.es%2Ftunon%2Fpdf_documento%2FSuperficies_Solidas_A.pdf&usg=AOvVaw0KHkqW1-n_F7NrdK-BroWE). [Último acceso: 2 Marzo 2023].
- [29] Torre Castelló, «Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de colorantes presentes en disoluciones,» 2017. [En línea]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiH0MTqppf9AhUAh\\_0HHUW0Bt4QFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Friunet.upv.es%2Fbitstream%2Fhandle%2F10251%2F93468%2FCASTELL%25C3%2593%2520-%2520Dise%25C3%25B1o%2520de%2520un%2520](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiH0MTqppf9AhUAh_0HHUW0Bt4QFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Friunet.upv.es%2Fbitstream%2Fhandle%2F10251%2F93468%2FCASTELL%25C3%2593%2520-%2520Dise%25C3%25B1o%2520de%2520un%2520). [Último acceso: 5 Marzo 2023].
- [30] D. Figueroa, A. Moreno y A. Hormaza, «Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz,» 2015. [En línea]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjWtvvhndv9AhVfhP0HHb10CqMQFnoECAkQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.scielo.org.co%2Fpdf%2Frium%2Fv14n26%2Fv14n26a08.pdf&usg=AOvVaw0qosqhKHtsopDbDr8n-E\\_c](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjWtvvhndv9AhVfhP0HHb10CqMQFnoECAkQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.scielo.org.co%2Fpdf%2Frium%2Fv14n26%2Fv14n26a08.pdf&usg=AOvVaw0qosqhKHtsopDbDr8n-E_c). [Último acceso: 1 Marzo 2023].

- [31] V. M. R. García., «tripod.com. Tipos de isoterma de adsorción,» 1999. [En línea]. Available: <https://lqi.tripod.com/FQAv/isoterms.htm>. [Último acceso: 1 Marzo 2023].
- [32] M. M. Mateos, «Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas con colorantes,» [En línea]. Available: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/15692/>. [Último acceso: 25 Febrero 2023].
- [33] «Textos científicos. com. Los materiales adsorbentes,» [En línea]. Available: <https://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/materiales-adsorbentes>. [Último acceso: 02 Marzo 2023].
- [34] O. R. Vargas, «Aplicación de ozonación y fotocátalisis heterogénea al colorante Negro de Eriocromo T,» 2017. [En línea]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj-wbS8wpf9AhXjWaQEHYFEBaoQFnoECBgQAQ&url=http%3A%2F%2Fzaloamati.azc.uam.mx%2Fhandle%2F11191%2F8330&usg=AOvVaw1N-1lu\\_\\_oBxX0dXRvUkrFl](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj-wbS8wpf9AhXjWaQEHYFEBaoQFnoECBgQAQ&url=http%3A%2F%2Fzaloamati.azc.uam.mx%2Fhandle%2F11191%2F8330&usg=AOvVaw1N-1lu__oBxX0dXRvUkrFl). [Último acceso: 7 Marzo 2023].
- [35] G. G. L. M. Á. A. Laura, «AGENTES QUELANTES, INDICADORES METALOCROMICOS Y CARACTERÍSTICA,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-nacional-autonoma-de-mexico/quimica-analitica-ii/anteproyecto-indicadores-metalocromicos/26237080>. [Último acceso: 04 Marzo 2023].
- [36] L. J. G. Merchán, «Uso de spirulina platensis en la bioadsorción de metales pesados presentes en aguas residuales industriales,» [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj8ke\\_wr5f9AhXH\\_KQKHTxAB-YQFnoECAsQAQ&url=https%3A%2F%2Fdocplayer.es%2F109896388-Uso-de-spirulina-platensis-en-la-bioadsorcion-de-metales-pesados-presentes-en-aguas-re](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj8ke_wr5f9AhXH_KQKHTxAB-YQFnoECAsQAQ&url=https%3A%2F%2Fdocplayer.es%2F109896388-Uso-de-spirulina-platensis-en-la-bioadsorcion-de-metales-pesados-presentes-en-aguas-re), 2018.
- [37] Jose G. Carriazo, «Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo,» 2010. [En línea]. Available: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi586rrsJf9AhU5U6QEhdFoCWEQFnoECAwQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.elsevier.es%2Fes-revista-educacion-quimica-78-articulo-propiedades-adsorptivas-un-carbon-activado-S0187893X1>. [Último acceso: 1 Marzo 2023].
- [38] J. H. Ramirez, «Remoción de contaminantes en aguas residuales empleando carbón activado de pino pátula,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjzivCFppf9AhVaaqQEHUUCdsQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fservlet%2Farticulo%3Fcodigo%3D6684860&usg=AOvVaw24avOW2mx93XS5GU0OhLtU>. [Último acceso: 4 Marzo 2023].
- [39] J. Rodríguez y V. Fernández, *Cómo redactar el estado del arte de un trabajo*, Editorial Genios, 2010.
- [40] P. Martínez y A. García, *Cómo escribir una buena memoria de TFG*, Publicaciones del 2000, 2013.
- [41] A. Pérez, *Cómo escribir una bibliografía*, Nuevas publicaciones.

- [42] J. Bueno y H. & L. A. Sastre, Contaminación e ingeniería ambiental: contaminación de las aguas., Fundación para el Fomento en Asturias de la Investigación Científica Aplicada y la Tecnología (FICYT),, 1997.
- [43] X. V. Bello, «AVANCES HACIA UN DESARROLLO SOSTENIBLE MEDIANTE EL TRATAMIENTO Y REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS: ESTUDIO DE LA APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS,» 2014. [En línea]. Available:  
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjw5KSvrJf9AhUCQaQEHT2DCQsQFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.investigacion.biblioteca.uvigo.es%2Fxmlui%2Fhandle%2F11093%2F366&usg=AOvVaw3KQ8wbBeEQrV4F4VL0bp6A>. [Último acceso: 20 Febrero 2023].
- [44] C. H. R. García, «<https://es.slideshare.net/CesarRenteria2/adsorcion-34636053>,» [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/CesarRenteria2/adsorcion-34636053>. [Último acceso: 28 Febrero 2023].
- [45] C. M. Gutiérrez, «Tratamiento de agua y gestión y tratamiento de residuos,» 2010. [En línea]. Available:  
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjutv6Cw5f9AhWmVqQEHTPkB0o4ChAWegQIHBAB&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FCarlos-Menendez-Gutierrez%2Fpublication%2F284188773\\_Tratamiento\\_de\\_Agua\\_y\\_Gestion\\_y\\_Tratami](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjutv6Cw5f9AhWmVqQEHTPkB0o4ChAWegQIHBAB&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FCarlos-Menendez-Gutierrez%2Fpublication%2F284188773_Tratamiento_de_Agua_y_Gestion_y_Tratami). [Último acceso: 26 Febrero 2023].
- [46] O. M. Martínez Avila, «EVALUACIÓN DE UN PROCESO INTEGRADO DE ADSORCIÓN Y OXIDACIÓN AVANZADA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES REALES,» [En línea]. Available:  
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwji4qWgqZf9AhVYUaQEHeU\\_CrkQFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Frepositorio.unal.edu.co%2Fhandle%2Funal%2F11148&usg=AOvVaw1V2n9wEtD-tJhMyjmdak0M](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwji4qWgqZf9AhVYUaQEHeU_CrkQFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Frepositorio.unal.edu.co%2Fhandle%2Funal%2F11148&usg=AOvVaw1V2n9wEtD-tJhMyjmdak0M). [Último acceso: 24 Febrero 2023].

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

### Implicaciones sociales

El tratamiento de aguas residuales (TAR) en los buques tiene importantes implicaciones sociales, ya que afecta directamente a la salud y calidad de vida tanto de las personas como del ecosistema marino. El tratamiento inadecuado de las aguas residuales supone correr el riesgo de introducir una serie de contaminantes, que a su vez podrían provocar enfermedades e infecciones.

Las aguas residuales no tratadas pueden contaminar los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, lo que puede afectar la disponibilidad de agua potable y tener consecuencias graves para el medio ambiente y la biodiversidad

En resumen, el tratamiento de aguas residuales (TAR) es **fundamental para el desarrollo económico y social sostenible, para proteger la salud humana y el medio ambiente.**

La implicación social del cumplimiento de las normativas medioambientales, tanto reguladas oficialmente como autoimpuestas desde la propia Armada, por las consecuencias que podrían acarrear todo lo anteriormente expuesto, es máxima.

### Implicaciones económicas

El tratamiento de aguas residuales tiene importantes implicaciones económicas tanto a nivel local como global. A nivel local, implica costos para construir y mantener las plantas de tratamiento de los buques, así como para transportar y gestionar los residuos tratados. Además, el tratamiento adecuado puede reducir los costos de la atención médica relacionados con enfermedades transmitidas por el agua.

A nivel global, el tratamiento de aguas residuales es esencial para la preservación del medio ambiente y la salud pública, lo que a su vez puede tener implicaciones económicas a largo plazo. La contaminación del agua puede tener efectos negativos en la agricultura, la pesca y el turismo, lo que puede tener un impacto negativo en la economía local y nacional. Por otro lado, el tratamiento adecuado de las aguas residuales puede crear empleos en el sector de la gestión de aguas residuales y fomentar el crecimiento económico sostenible.

A continuación, y a modo de simulación, se relacionan los conceptos de coste asociados a las líneas de trabajo mostradas en el [epígrafe 5.3](#)

Ante la dificultad de exactitud de un dato económico real, se realiza una presupuestación inicial, tal y como se expone a continuación:

#### 1. *Estudio de contaminantes.*

Uno de los ítems a trabajar es el estudio de los contaminantes en la etapa de desinfección, una vez pasados los procesos de coagulación/floculación y la decantación/flotación. Este estudio se basa en el análisis de la disolución clarificada, tomando un número representativo de muestras, barriendo todas las posibles combinaciones de operación y dotación del buque.



Item	Unidad	Total	Horas / total	€/hora	Importe (€)
Nº Situaciones analizadas	16	NA	NA	NA	NA
Nº muestras / situación	50	800	800	30	24000
Análisis datos obtenidos	1	1	150	30	4500
Informe y conclusiones datos analizados	1	1	75	30	2250
<b>TOTAL</b>					<b>30750</b>

Tabla A1 1 Presupuesto estudio de contaminantes

### 2. Estudio de adsorbentes compatibles.

Una vez concretados los contaminantes a neutralizar, el siguiente paso es la definición de aquellos adsorbentes que muestran una mejor compatibilidad con los primeros.

Item	Unidad	Total	Horas / total	€/hora	Importe (€)
Estudio diferentes adsorbentes	1	1	1000	30	30000
Análisis datos obtenidos	1	1	150	30	4500
Informe y conclusiones datos analizados	1	1	75	30	2250
<b>TOTAL</b>					<b>36750</b>

Tabla A1 2 Presupuesto estudio de adsorbentes

### 3. Diseño de la planta de adsorción e integración en la planta global.

Identificados los contaminantes a neutralizar y los adsorbentes más adecuados para ello, el siguiente paso propuesto es el diseño de la planta de adsorción tal y como se ha realizado en el desarrollo del trabajo. En este punto el contenido es la adaptación real basados en la planta experimental.

Realizado el diseño de la planta de adsorción se diseñará a su vez la forma de integrarla en una planta físico – química tal y como se ha expuesto en el [epígrafe 5.2](#)

Item	Unidad	Total	Horas / total	€/hora	Importe (€)
Diseño preliminar de la planta (Prototipo)	1	1	350	30	10500
Pruebas funcionamiento	1	1	112	30	3360
Diseño detalle de la planta	1	1	350	30	10500
Estudio integración planta físico - química	1	1	112	30	3360
Diseño detalle integración	1	1	350	30	10500
<b>TOTAL</b>					<b>38220</b>

Tabla A1 3 Presupuesto diseño de la planta

### 4. Fabricación de la planta

Finalizado el diseño, tanto de la planta de adsorción en si misma, como de su integración en la planta global, se presupuesta la fabricación de la misma, (a alto nivel, sería necesario una atomización de los ítems para un correcto control y seguimiento).

Item	Unidad	Total	Horas / total	€/hora	Importe (€)
Fabricación de la planta de adsorción	1	1	600	30	45000
Integración en la planta físico - química global	1	1	600	30	4500
Pruebas FAT	1	1	75	30	2250
<b>TOTAL</b>					<b>38250</b>

Tabla A1 4 Presupuesto fabricación de la planta

A continuación, se muestra el global de presupuesto aplicado:

Item	Importe (€)
<b>Estudio de contaminantes</b>	<b>30750</b>
<b>Estudio de adsorbentes compatibles</b>	<b>36750</b>
<b>Diseño de la planta de adsorción e integración en la planta global.</b>	<b>38220</b>
<b>Fabricación de la planta</b>	<b>38250</b>
<b>TOTAL</b>	
	<b>143970</b>

Tabla A1 5 Presupuesto global

La estimación del importe para la fabricación de una planta físico – química para un buque tipo fragata es de 160.000 € según datos proporcionados por Navantia. Por lo tanto, podemos estimar que el estudio y puesta en marcha de un proyecto de aplicación estaría en un entorno de importe similar al necesario para la construcción de una planta propiamente dicha.

Considerando la posibilidad de incluir los estudios en el entorno de un proyecto i+d+i y teniendo en cuenta que cualquier mejora de un proyecto medioambiental no es un coste, sino una inversión, no sería en absoluto descabellado la posible puesta en marcha de un proyecto de estas características.

### **Implicaciones ambientales**

El tratamiento de aguas residuales (TAR) tiene implicaciones ambientales positivas, ya que permite eliminar contaminantes y mejorar la calidad del agua antes de ser vertida al medio ambiente. Esto contribuye a la protección de los ecosistemas acuáticos y a la preservación de la biodiversidad. Además, el tratamiento de aguas residuales puede ayudar a prevenir la eutrofización, que es el enriquecimiento excesivo de nutrientes en cuerpos de agua, lo que puede provocar la proliferación de algas y la disminución del oxígeno en el agua, afectando negativamente a la vida acuática.

Por otro lado, el tratamiento de aguas residuales también puede generar impactos ambientales negativos, como la emisión de gases de efecto invernadero durante el proceso de tratamiento o la generación de lodos residuales que pueden contener contaminantes y que requieren una gestión adecuada para evitar su impacto ambiental negativo.

El impacto de las operaciones de los buques de la Armada sobre el medioambiente es evidente. En el modo de operación un buque genera multitud de residuos, pues no deja de ser un habitáculo que interacciona con el medio marino y en el que conviven dotaciones de hasta cientos de personas. Es de

gran importancia la correcta gestión de los residuos previo a su vertido al mar ya que de otra forma estaríamos generando un grave perjuicio a los organismos vivos presentes en dicho medio.

## **ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES**

### **Reflexiones éticas y sociales sobre el tratamiento de aguas residuales y el medio ambiente**

La reflexión ética y social sobre el medio ambiente se ha vuelto cada vez más importante a medida que la sociedad ha ido tomando conciencia de los impactos negativos que nuestras actividades tienen en el entorno natural. A nivel ético, nos enfrentamos a la pregunta de cuál es nuestra responsabilidad hacia el medio ambiente y hacia las futuras generaciones, y cómo debemos equilibrar nuestros intereses económicos y sociales con la necesidad de preservar la naturaleza.

Por otro lado, a nivel social, debemos abordar cuestiones como la distribución desigual de los impactos ambientales entre diferentes grupos socioeconómicos y países, y cómo podemos asegurar una transición justa hacia una economía más sostenible. También es importante considerar cómo nuestras acciones individuales y colectivas pueden afectar a otros seres humanos y a la biodiversidad.

En resumen, reflexionar sobre la ética y la sociedad en relación con el medio ambiente implica considerar no solo nuestros valores y principios morales, sino también las complejas interacciones entre los seres humanos y la naturaleza, así como las implicaciones de nuestras acciones para el bienestar de todos los seres vivos y del planeta en su conjunto.

### **Ética medio ambiental**

La ética medioambiental es un conjunto de principios y valores que orientan la relación entre los seres humanos y su entorno natural, con el fin de promover la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales. Esta ética se centra en la responsabilidad y la obligación de proteger el medio ambiente, teniendo en cuenta las necesidades de las generaciones presentes y futuras. La ética medioambiental también promueve la educación y la conciencia ambiental para fomentar la toma de decisiones informadas y responsables en relación al medio ambiente.

### **Medio ambiente y sociedad**

El medio ambiente y la sociedad están interconectados y son interdependientes. Las acciones humanas tienen un impacto directo en el medio ambiente, y a su vez, los cambios en el medio ambiente pueden afectar la calidad de vida y el bienestar de la sociedad. Es importante fomentar la conciencia y la responsabilidad ambiental en la sociedad para preservar y proteger el medio ambiente y garantizar un futuro sostenible para las generaciones venideras.

## ANEXO III: DATOS EXPERIMENTALES ESPECTROFOTÓMETRO

EJEMPLO: Adsorbente = *Espirulina*; H = 8 cm

Longitud de Onda Simple		08/02/2023 16:40:19
Producto	Lambda XLS	
Versión	8382 V3.0.1	
Número de Serie	3571	
Fecha	8 Febrero 2023	
Hora	16:40:19	
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49		
Longitud de Onda	530 nm	
Modo	Absorbancia	
Hora	Muestra	Absorbancia
16:40:20	Referencia	
16:40:55	1	0.490
16:41:43	Referencia	
16:42:18	2	0.170
16:42:58	Referencia	
16:43:50	3	0.088

t = 10

Longitud de Onda Simple		08/02/2023 16:45:17
Producto	Lambda XLS	
Versión	8382 V3.0.1	
Número de Serie	3571	
Fecha	8 Febrero 2023	
Hora	16:45:17	
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49		
Longitud de Onda	530 nm	
Modo	Absorbancia	
Hora	Muestra	Absorbancia
16:45:17	Referencia	
16:49:00	1	0.326
16:49:46	Referencia	
16:50:24	2	0.342
16:51:03	Referencia	
16:51:57	3	0.331

t = 20

Longitud de Onda Simple		08/02/2023 16:56:51
Producto	Lambda XLS	
Versión	8382 V3.0.1	
Número de Serie	3571	
Fecha	8 Febrero 2023	
Hora	16:56:51	
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49		
Longitud de Onda	530 nm	
Modo	Absorbancia	
Hora	Muestra	Absorbancia
16:56:51	Referencia	
16:57:31	1	0.282
16:58:01	Referencia	
16:58:39	2	0.316
16:59:17	Referencia	
16:59:53	3	0.367

t = 30

Longitud de Onda Simple		08/02/2023 17:03:07
Producto	Lambda XLS	
Versión	8382 V3.0.1	
Número de Serie	3571	
Fecha	8 Febrero 2023	
Hora	17:03:07	
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49		
Longitud de Onda	530 nm	
Modo	Absorbancia	
Hora	Muestra	Absorbancia
17:03:07	Referencia	
17:03:32	1	0.506
17:04:15	Referencia	
17:04:50	2	0.347
17:07:15	Referencia	
17:07:59	3	0.324

t = 40

Longitud de Onda Simple		08/02/2023 17:16:37
Producto	Lambda XLS	
Versión	8382 V3.0.1	
Número de Serie	3571	
Fecha	8 Febrero 2023	
Hora	17:16:37	
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49		
Longitud de Onda	530 nm	
Modo	Absorbancia	
Hora	Muestra	Absorbancia
17:16:37	Referencia	
17:17:09	1	0.325
17:17:49	Referencia	
17:18:24	2	0.354
17:19:09	Referencia	
17:19:50	3	0.326

t = 50

Longitud de Onda Simple		08/02/2023 17:20:48
Producto	Lambda XLS	
Versión	8382 V3.0.1	
Número de Serie	3571	
Fecha	8 Febrero 2023	
Hora	17:20:48	
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49		
Longitud de Onda	530 nm	
Modo	Absorbancia	
Hora	Muestra	Absorbancia
17:20:48	Referencia	
17:23:25	1	0.324
17:24:32	Referencia	
17:27:19	2	0.320
17:28:24	Referencia	
17:29:01	3	0.333

t = 60

Longitud de Onda Simple		08/02/2023 17:31:36
Producto	Lambda XLS	
Versión	8382 V3.0.1	
Número de Serie	3571	
Fecha	8 Febrero 2023	
Hora	17:31:36	
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49		
Longitud de Onda	530 nm	
Modo	Absorbancia	
Hora	Muestra	Absorbancia
17:31:36	Referencia	
17:38:18	1	0.328
17:38:46	Referencia	
17:39:15	2	0.325
17:39:46	Referencia	
17:40:16	3	0.320

t = 70

Longitud de Onda Simple		08/02/2023 17:43:08
Producto	Lambda XLS	
Versión	8382 V3.0.1	
Número de Serie	3571	
Fecha	8 Febrero 2023	
Hora	17:43:08	
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49		
Longitud de Onda	530 nm	
Modo	Absorbancia	
Hora	Muestra	Absorbancia
17:43:08	Referencia	
17:43:36	1	0.337
17:44:12	Referencia	
17:46:34	2	0.342
17:47:02	Referencia	
17:47:37	3	0.320

t = 80

Figura A3 1 Ejemplo toma de datos espectrofotómetro. *Espirulina* y H = 8cm (I)

# ANEXO III: DATOS EXPERIMENTALES ESPECTROFOTÓMETRO

**EJEMPLO: Adsorbente = Espirulina; H = 8cm (II)**

Longitud de Onda Simple			08/02/2023 17:57:23
Producto	Lambda XLS		
Versión	8382 V3.0.1		
Número de Serie	3571		
Fecha	8 Febrero 2023		
Hora	17:57:23		
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49			
Longitud de Onda	530 nm		
Modo	Absorbancia		
Hora	Muestra	Absorbancia	
17:57:23	Referencia		
17:58:51	1	0.302	
17:59:20	Referencia		
17:59:47	2	0.346	
18:00:22	Referencia		
18:00:56	3	0.339	

t = 90

Longitud de Onda Simple			08/02/2023 18:03:42
Producto	Lambda XLS		
Versión	8382 V3.0.1		
Número de Serie	3571		
Fecha	8 Febrero 2023		
Hora	18:03:42		
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49			
Longitud de Onda	530 nm		
Modo	Absorbancia		
Hora	Muestra	Absorbancia	
18:03:42	Referencia		
18:04:27	1	0.344	
18:05:03	Referencia		
18:07:12	2	0.349	
18:07:52	Referencia		
18:08:16	3	0.320	

t = 100

Longitud de Onda Simple			08/02/2023 18:16:15
Producto	Lambda XLS		
Versión	8382 V3.0.1		
Número de Serie	3571		
Fecha	8 Febrero 2023		
Hora	18:16:15		
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49			
Longitud de Onda	530 nm		
Modo	Absorbancia		
Hora	Muestra	Absorbancia	
18:16:15	Referencia		
18:16:38	1	0.350	
18:17:08	Referencia		
18:17:36	2	0.524	
18:18:08	Referencia		
18:18:45	3	0.324	

t = 110

Longitud de Onda Simple			08/02/2023 18:21:25
Producto	Lambda XLS		
Versión	8382 V3.0.1		
Número de Serie	3571		
Fecha	8 Febrero 2023		
Hora	18:21:25		
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49			
Longitud de Onda	530 nm		
Modo	Absorbancia		
Hora	Muestra	Absorbancia	
18:21:25	Referencia		
18:22:05	1	0.333	
18:22:50	Referencia		
18:23:18	2	0.361	
18:23:51	Referencia		
18:24:15	3	0.572	
18:24:22	4	0.342	

t = 120

Longitud de Onda Simple			08/02/2023 18:36:50
Producto	Lambda XLS		
Versión	8382 V3.0.1		
Número de Serie	3571		
Fecha	8 Febrero 2023		
Hora	18:36:50		
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49			
Longitud de Onda	530 nm		
Modo	Absorbancia		
Hora	Muestra	Absorbancia	
18:36:50	Referencia		
18:37:20	1	0.346	
18:37:52	Referencia		
18:38:18	2	0.319	
18:39:10	3	0.310	

t = 130

Longitud de Onda Simple			08/02/2023 18:45:42
Producto	Lambda XLS		
Versión	8382 V3.0.1		
Número de Serie	3571		
Fecha	8 Febrero 2023		
Hora	18:45:42		
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49			
Longitud de Onda	530 nm		
Modo	Absorbancia		
Hora	Muestra	Absorbancia	
18:45:42	Referencia		
18:46:31	1	0.331	
18:47:24	2	0.335	
18:48:00	3	0.335	

t = 140

Longitud de Onda Simple			08/02/2023 18:53:38
Producto	Lambda XLS		
Versión	8382 V3.0.1		
Número de Serie	3571		
Fecha	8 Febrero 2023		
Hora	18:53:38		
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49			
Longitud de Onda	530 nm		
Modo	Absorbancia		
Hora	Muestra	Absorbancia	
18:53:38	Referencia		
18:54:10	1	0.330	
18:54:44	2	0.331	
18:55:16	Referencia		
18:55:49	3	0.327	

t = 150

Longitud de Onda Simple			08/02/2023 18:59:27
Producto	Lambda XLS		
Versión	8382 V3.0.1		
Número de Serie	3571		
Fecha	8 Febrero 2023		
Hora	18:59:28		
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49			
Longitud de Onda	530 nm		
Modo	Absorbancia		
Hora	Muestra	Absorbancia	
18:59:28	Referencia		
18:59:56	1	0.358	
19:00:38	Referencia		
19:01:05	2	0.356	
19:01:31	Referencia		
19:02:02	3	0.186	

t = 160

**Figura A3 2 Ejemplo toma de datos espectrofotómetro. Espirulina y H = 8cm (II)**

## ANEXO III: DATOS EXPERIMENTALES ESPECTROFOTÓMETRO

EJEMPLO: Adsorbente = Espirulina; H = 8cm (III)

Longitud de Onda Simple			08/02/2023 19:07:25
Producto	Lambda XLS		
Versión	8382 V3.0.1		
Número de Serie	3571		
Fecha	8 Febrero 2023		
Hora	19:07:25		
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49			
Longitud de Onda	530 nm		
Modo	Absorbancia		
Hora	Muestra	Absorbancia	
19:07:25	Referencia		
19:08:30	1	0.348	
19:09:05	Referencia		
19:09:28	2	0.347	
19:09:57	Referencia		
19:10:34	3	0.312	

t = 170

Longitud de Onda Simple			08/02/2023 19:16:17
Producto	Lambda XLS		
Versión	8382 V3.0.1		
Número de Serie	3571		
Fecha	8 Febrero 2023		
Hora	19:16:17		
Calibración Superado 8 Febrero 2023 16:36:49			
Longitud de Onda	530 nm		
Modo	Absorbancia		
Hora	Muestra	Absorbancia	
19:16:17	Referencia		
19:17:02	1	0.318	
19:18:05	Referencia		
19:18:59	2	0.320	
19:19:34	Referencia		
19:20:14	3	0.331	

t = 180

Longitud de Onda Simple			09/02/2023 16:17:58
Producto	Lambda XLS		
Versión	8382 V3.0.1		
Número de Serie	3571		
Fecha	9 Febrero 2023		
Hora	16:17:58		
Calibración Superado 9 Febrero 2023 15:44:12			
Longitud de Onda	530 nm		
Modo	Absorbancia		
Hora	Muestra	Absorbancia	
16:17:59	Referencia		
16:18:48	1	0.289	
16:19:32	Referencia		
16:20:11	2	0.333	

t = 24horas

Figura A3 3 Ejemplo toma de datos espectrofotómetro. Espirulina y H = 8cm (III)