



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Caracterización y potencial uso de los lodos de
electrocoagulación con aluminio como agente floculante secundario
para el tratamiento de aguas residuales*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Alexander Quelle Dacal

DIRECTORES: Rosa Devesa Rey

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Caracterización y potencial uso de los lodos de
electrocoagulación con aluminio como agente floculante secundario
para el tratamiento de aguas residuales*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El presente trabajo investiga la caracterización y uso de los lodos de electrocoagulación con aluminio como agente floculante secundario en el tratamiento de aguas mediante la coagulación-floculación. Bajo un enfoque de economía circular se investiga cómo transformar un residuo en un recurso reduciendo el impacto ambiental.

Durante la fase experimental, se generaron lodos mediante electrocoagulación con electrodos de aluminio que se emplearon posteriormente para el tratamiento de tres contaminantes críticos: fosfatos, nitratos y cobre. Los resultados mostraron una gran eficiencia en la eliminación de nitratos, alcanzando porcentajes de eliminación de entre el 70% y el 100%. Para el cobre y los fosfatos, la eliminación mostró una eficacia menor, con valores que oscilan entre 30% y 36%, lo cual evidencia la necesidad de profundizar más en los mecanismos de su eliminación y la optimización de los procedimientos evaluados. En el mismo sentido, el análisis cinético determinó que el proceso se ajusta moderadamente a los modelos de primer y segundo orden, lo que pone de manifiesto la necesidad de profundizar más en los mecanismos de eliminación de los contaminantes evaluados.

El estudio analizó también el uso de materiales reciclados para la obtención de los coagulantes, tales como latas de aluminio o electrodos usados, demostrando la viabilidad de su uso y favoreciendo, por lo tanto, a los objetivos de economía sostenible.

PALABRAS CLAVE

Aluminio, tratamiento de aguas, coagulación-floculación, contaminación, aguas residuales.

AGRADECIMIENTOS

El siguiente trabajo no habría sido posible sin la ayuda de mis padres. Mis dos pilares que siempre me han ayudado y apoyado en cada una de mis decisiones, en especial, en la decisión más importante de mi vida que es dedicar mi vida a la defensa de España. Su ayuda en cada uno de los pasos que he ido dando han hecho posible que hoy me encuentre donde estoy y que vaya consiguiendo poco a poco mis metas.

Agradezco también a mis compañeros de promoción que me han hecho llevadero el camino en la Escuela. Su apoyo y ayuda como hermanos han hecho de este tiempo algo más sencillo.

Agradezco a mi tutora, doña Rosa Devesa Rey. Su apoyo y ayuda en cuanto a conocimientos y procesos han sido fundamentales en el desarrollo del trabajo. Así como el tiempo dedicado a lo largo de estos meses y su celeridad en la resolución de dudas.

Me gustaría agradecer también a mi compañero el AF Adrián Palacios su compañía y apoyo durante todos estos años como un verdadero amigo ayudando a sobrellevar los malos momentos, sobre todo a lo largo del desarrollo de este trabajo, donde su apoyo y compañía han sido un pilar fundamental.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
Índice de Ecuaciones	7
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Introducción	8
1.2 Antecedentes	9
1.3 Justificación	9
1.4 Objetivos	10
1.5 Estructura	10
2 Estado del arte	11
2.1 Tipos de aguas a tratar mediante la coagulación-floculación	11
2.1.1 Aguas residuales urbanas.....	11
2.1.2 Aguas residuales industriales con metales.....	12
2.1.3 Aguas residuales con colorantes y compuestos orgánicos recalcitrantes	12
2.1.4 Aguas con grasas y aceites	12
2.1.5 Aguas de origen agropecuario	13
2.2 Principales contaminantes presentes y tratamiento con coagulación-floculación	13
2.2.1 Nitratos	13
2.2.2 Fosfatos.....	14
2.2.3 Cobre.....	15
2.3 Normativa y marco legal en el tratamiento de aguas residuales	16
2.4 Papel de la coagulación-floculación en el tratamiento de aguas contaminadas.....	17
2.4.1 Coagulación-floculación en el proceso de tratamiento.....	18
2.4.2 Electrocoagulación como fuente de lodos	19
2.5 Lodos: generación, caracterización y reutilización.....	19
2.5.1 Naturaleza de los lodos ricos en aluminio	20
2.5.2 Caracterización de lodos.....	20
2.5.3 Recuperación de coagulante desde lodos	21
2.6 La economía circular en el tratamiento de aguas residuales	22
2.6.1 Valorización de subproductos en el sector del agua	23
2.6.2 Recuperación de recursos en aguas residuales	24
3 Materiales y métodos.....	26

3.1 Esquema general del trabajo	26
3.2 Electrocoagulación con electrodos de aluminio.....	27
3.2.1 Fundamento	27
3.2.2 Procedimiento	27
3.2.3 Materiales y reactivos	27
3.3 Determinación de Al en agua.....	28
3.3.1 Fundamento	28
3.3.2 Procedimiento	28
3.3.3 Materiales y reactivos	29
3.4 Preparación de coagulantes.....	29
3.4.1 Fundamento	29
3.4.2 Procedimiento	29
3.4.3 Materiales y reactivos	30
3.5 Procedimiento de coagulación-floculación del fosfato y su determinación	30
3.5.1 Fundamento	30
3.5.2 Procedimiento	30
3.5.3 Materiales y reactivos	30
3.6 Procedimiento de coagulación-floculación del nitrato y su determinación	31
3.6.1 Fundamento	31
3.6.2 Procedimiento	31
3.6.3 Materiales y reactivos	31
3.7 Procedimiento de coagulación-floculación del cobre y su determinación.....	32
3.7.1 Fundamento	32
3.7.2 Procedimiento	32
3.7.3 Materiales y reactivos	32
3.8 Procedimiento empleando electrodos lijados.....	33
3.8.1 Fundamento	33
3.8.2 Procedimiento	33
3.8.3 Materiales y reactivos	33
3.9 Procedimiento empleando aluminio reciclado	33
3.9.1 Fundamento	33
3.9.2 Procedimiento	33
3.9.3 Materiales y reactivos	34
3.10 Estudio de las cinéticas de reacción	34
3.10.1 Fundamento	34
3.10.2 Procedimiento	34

3.10.3 Materiales y reactivos	35
4 Resultados y discusión	36
4.1 Análisis previo de las aguas	36
4.2 Fosfatos	36
4.2.1 Análisis de la eliminación de fosfatos con coagulantes producidos en laboratorio.....	36
4.3 Nitratos.....	38
4.3.1 Análisis de la eliminación de nitratos con coagulantes producidos en laboratorio	38
4.4 Cobre.....	40
4.4.1 Análisis de la eliminación de cobre con coagulantes producidos en laboratorio	40
4.5 Comparativa con electrodos lijados	41
4.6 Comparativa con aluminio reciclado	42
4.7 Comparativa con $AlCl_3$ comercial	43
4.8 Cinéticas de eliminación de contaminantes	43
4.8.1 Cinéticas de fosfatos con $AlCl_3$	44
4.8.2 Cinéticas de fosfatos con $Al_2(SO_4)_3$	45
4.8.3 Cinéticas de Nitratos con $AlCl_3$	45
4.8.4 Cinéticas de Nitratos con $Al_2(SO_4)_3$	46
4.8.5 Cinéticas de Cobre con $AlCl_3$	47
4.8.6 Cinéticas de Cobre con $Al_2(SO_4)_3$	48
4.8.7 Parámetros de las cinéticas.	48
4.9 Comparativa de los resultados con otros trabajos	49
4.9.1 Comparativa en la eficiencia de eliminación de fosfatos	49
4.9.2 Comparativa en la eficiencia de eliminación de nitratos	49
4.9.3 Eliminación de cobre	49
4.9.4 Comparativa entre el sulfato de aluminio y el cloruro de aluminio	49
5 Conclusiones y líneas futuras	51
5.1 Conclusiones	51
5.2 Líneas futuras	52
6 Bibliografía.....	53
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas, y Ambientales	58
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Proceso de coagulación-floculación (elaboración Propia en Canva).	11
Figura 2-2 Tipos de aguas residuales (Elaboración Propia con Canva)	12
Figura 2-3 Molécula de nitrato. (Elaboración Propia con Canva)	13
Figura 2-4 Esquema de Nitratos. (Elaboración Propia con Canva)	14
Figura 2-5 Metahemoglobinemia. (Elaboración Propia con Canva)	14
Figura 2-6 Esquema de consecuencias de fosfatos. (Elaboración Propia con Canva)	15
Figura 2-7 Cobre como contaminante. (Elaboración Propia con Canva)	16
Figura 2-8 Normativa. (Elaboración Propia con Canva)	17
Figura 2-9 Cooperación entre procesos. (Elaboración Propia con Canva)	18
Figura 2-10 Empleos de los lodos. (Elaboración Propia con Canva)	19
Figura 2-11 Formación de lodos. (Elaboración Propia con Canva)	20
Figura 2-12 Técnicas de análisis. (Elaboración Propia con Canva)	21
Figura 2-13 Extracción de lodos. (Elaboración Propia con Canva)	21
Figura 2-14 Separación de contaminantes. (Elaboración Propia con Canva)	22
Figura 2-15 Economía circular. (Elaboración Propia con Canva)	23
Figura 2-16 ODS Agenda 2030 (Tomada de [43])	23
Figura 2-17 Valorización de lodos. (Elaboración Propia con Canva)	24
Figura 2-18 Ciclo de nutrientes P y N. (Elaboración Propia con Canva)	24
Figura 2-19 Recuperación y metas para 2026. (Elaboración Propia con Canva)	25
Figura 2-20 Valorización de Subproductos y Materias Primas Secundarias. (Elaboración Propia con Canva)	25
Figura 3-1 Esquema general del trabajo. (Elaboración Propia)	26
Figura 3-2 Proceso de electrocoagulación con Aluminio. (Elaboración Propia con Canva)	27
Figura 3-3 Filtración. (Elaboración Propia con Canva)	27
Figura 3-4 Proceso de determinación de aluminio. (Elaboración Propia con Canva)	28
Figura 3-5 Fotómetro Multiparamétrico. (Tomada de Hanna instruments)	28
Figura 3-6 Reactivos aluminio. (Elaboración Propia)	28
Figura 3-7 Cubetas con Aluminio listo para medir. (Elaboración Propia)	29
Figura 3-8 Preparación de coagulantes. (Elaboración Propia con Canva)	29
Figura 3-9 Proceso de análisis de fosfatos. (Elaboración Propia con Canva)	30
Figura 3-10 Proceso de análisis de Nitrato. (Elaboración Propia con Canva)	31
Figura 3-11 Reactivo de nitrato. (Elaboración Propia)	32
Figura 3-12 Análisis de Cobre. (Elaboración Propia con Canva)	32
Figura 4-1 Gráfico de primer orden. (Elaboración Propia)	44

Figura 4-2 Gráfico de segundo orden. (Elaboración Propia)	44
Figura 4-3 Gráfico de primer orden. (Elaboración Propia)	45
Figura 4-4 Gráfico de Segundo Orden. (Elaboración Propia)	45
Figura 4-5 Gráfico de Primer Orden. (Elaboración Propia)	46
Figura 4-6 Gráfico de Segundo Orden. (Elaboración Propia)	46
Figura 4-7 Gráfico de Primer Orden. (Elaboración Propia)	46
Figura 4-8 Gráfico de Segundo Orden. (Elaboración Propia)	47
Figura 4-9 Gráfico de Primer Orden. (Elaboración Propia)	47
Figura 4-10 Gráfico de Segundo Orden. (Elaboración Propia)	47
Figura 4-11 Gráfico de Primer Orden. (Elaboración Propia)	48
Figura 4-12 Gráfico de Segundo Orden. (Elaboración Propia)	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1 Fosfatos con tiempos de 10-5-10. (Elaboración Propia).....	36
Tabla 4-2 Fosfatos con tiempos de 5-2,5-5. (Elaboración Propia).....	36
Tabla 4-3 Fosfatos con tiempos de 20-10-20. (Elaboración Propia).....	37
Tabla 4-4 Fosfatos con tiempos de 10-5-10. (Elaboración Propia).....	37
Tabla 4-5 Fosfatos con tiempos de 20-10-20. (Elaboración Propia).....	37
Tabla 4-6 Fosfatos con tiempos de 5-2,5-5. (Elaboración Propia).....	38
Tabla 4-7 Nitratos con tiempos de 10-5-10. (Elaboración Propia)	38
Tabla 4-8 Nitratos con tiempos de 5-2,5-5. (Elaboración Propia)	38
Tabla 4-9 Nitratos con tiempos de 20-10-20. (Elaboración Propia)	39
Tabla 4-10 Nitratos con tiempos de 10-5-10. (Elaboración Propia)	39
Tabla 4-11 Nitratos con tiempos de 5-2,5-5. (Elaboración Propia)	39
Tabla 4-12 Nitratos con tiempos de 20-10-20. (Elaboración Propia)	39
Tabla 4-13 Cobre con tiempos de 10-5-10. (Elaboración Propia).....	40
Tabla 4-14 Cobre con tiempos de 5-2,5-5. (Elaboración Propia)	40
Tabla 4-15 Cobre con tiempos de 20-10-20. (Elaboración Propia).....	40
Tabla 4-16 Cobre con tiempos de 10-5-10. (Elaboración Propia).....	41
Tabla 4-17 Cobre con tiempos de 5-2,5-5. (Elaboración Propia)	41
Tabla 4-18 Cobre con tiempos de 20-10-20. (Elaboración Propia).....	41
Tabla 4-19 Análisis de eliminación con electrodos lijados. (Elaboración Propia).....	42
Tabla 4-20 Tratamiento con lata como electrodo. (Elaboración Propia)	43
Tabla 4-21 Tratamiento con Cloruro Comercial. (Elaboración Propia).....	43
Tabla 4-22 Cinéticas de fosfato con cloruro. (Elaboración Propia)	44
Tabla 4-23 Cinéticas de Fosfatos con Sulfato de Aluminio. (Elaboración Propia)	45
Tabla 4-24 Cinéticas de Nitrato con Cloruro de Aluminio. (Elaboración Propia).....	45
Tabla 4-25 Cinéticas de Nitratos con Sulfato de Aluminio. (Elaboración Propia)	46
Tabla 4-26 Cinéticas de Cobre con Cloruro de Aluminio. (Elaboración Propia)	47
Tabla 4-27 Cinéticas de Cobre con Sulfato de Aluminio. (Elaboración Propia)	48
Tabla 4-28 Parámetros de las cinéticas	49

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	34
Ecuación 2	34

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El agua, recurso esencial para la supervivencia, representa el 70% de la superficie terrestre. A pesar de su abundancia, los recursos hídricos del planeta -ríos, mares, canales y océanos, entre otros - se ven afectados por la contaminación que proviene de las diferentes industrias. Solo un 0,01% del agua es potable y esta cifra se reduce anualmente debido a la contaminación [1].

Uno de los principales efectos que tiene la contaminación es la degradación de los ecosistemas acuáticos. La presencia de estos contaminantes tiene múltiples efectos: la muerte de las diferentes especies que habitan en esos ecosistemas marinos, la dificultad de estas para su desarrollo y su crecimiento y reproducción, entre otros efectos. También se han descrito efectos secundarios sobre la salinidad de las aguas y su temperatura debido a la contaminación, debidas a la contaminación por vertidos antropogénicos y descargas de ríos [2,3].

Por otro lado, en lo referente a la contaminación del agua destinada al consumo, son también destacables los grandes riesgos directos ocasionados para la salud pública, derivados de la presencia de microorganismos y de agentes químicos. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la inadecuada gestión de las aguas expone a los seres humanos al consumo de aguas con contaminación química y biológica, lo que resulta en la transmisión de enfermedades [4].

Dentro de los contaminantes seleccionados para este estudio se incluyen los nitratos, fosfatos y el cobre. La OMS destaca los nitratos, objeto de estudio en el presente trabajo, como fuente a controlar, procedente de fertilizantes y residuos agrarios. Su presencia en el agua genera, además de la eutrofización, un riesgo de toxicidad química debido a su consumo que debe ser gestionado para un abastecimiento seguro [4]. De la misma forma, el cobre y otros metales pesados pueden alcanzar elevadas concentraciones en el agua debido a vertidos industriales, generando efectos nocivos en el crecimiento y desarrollo de los organismos expuestos a ellos. La falta de saneamiento de las aguas causa, cada año, millones de fallecimientos debidos a enfermedades causadas por su consumo, que afectan, de forma drástica a la población infantil [4].

Combatir la contaminación presente en las aguas, empleando diferentes técnicas de tratamiento, supone uno de los mayores retos en la actualidad, para poder proveer de agua potable y limpia a una continuamente creciente población mundial. Así, la implementación de medidas para mitigarlos es urgente, de forma que se pueda conseguir evitar la propagación de los efectos nocivos. De entre las tecnologías de tratamiento disponibles, este Trabajo Fin de Grado, se centra en el uso de técnicas de coagulación-floculación, que destacan por su fácil implementación, por la capacidad de eliminar suspensiones coloidales que no sedimentarían por gravedad y por su gran versatilidad.

1.2 Antecedentes

La coagulación-floculación es uno de los procesos más importantes en lo que al tratamiento de aguas se refiere. Su principal función es eliminar partículas coloidales, sólidos en suspensión y materia orgánica. En este proceso, se emplean coagulantes que provocan una desestabilización de las partículas, en la fase de coagulación, así como su posterior agrupación en flóculos de mayor tamaño en la fase de floculación.

Los coagulantes empleados, normalmente, son sales metálicas, compuestos de aluminio y hierro debido a su buena eficacia de eliminación de contaminantes [5]. El uso de estos presenta importantes limitaciones como el consumo de productos químicos y la dificultad de ajustar el proceso a las condiciones operativas, además de la generación de cantidades masivas de lodos. La gestión de los lodos mencionados supone un gran reto ya que implica elevados costes y pone en riesgo el medio ambiente.

Hoy en día, la investigación centra sus esfuerzos en optimizar el proceso, haciendo un buen uso posterior de los lodos. Una de las alternativas planteadas, objeto de estudio del presente trabajo, es el empleo de los lodos de la electrocoagulación con aluminio como coagulantes para este proceso [6]. Este proceso genera lodos ricos en hidróxidos por la disolución del ánodo. Estos productos presentan propiedades similares a los coagulantes convencionales de aluminio. Esto lleva a pensar que estos lodos podrían emplearse como coagulantes o floculantes secundarios en el tratamiento de otras aguas en lugar de ser desechados, transformando lo que *a priori* era un residuo en un material útil para nuevos procesos.

El empleo de estos lodos puede reducir el consumo de los coagulantes convencionales comerciales disminuyendo a su vez la cantidad de residuos generados contribuyendo a mejorar la sostenibilidad y a la ya mencionada economía circular [7]. La eficacia de la reutilización de estos lodos viene dada, principalmente, por la composición de estos, condiciones de operación, dosis empleada y características de las aguas a tratar.

La revalorización de estos lodos busca lograr un crecimiento en la búsqueda de la integración de procesos y la valorización de productos secundarios en los tratamientos de aguas [8]. El empleo de los lodos de electrocoagulación de aluminio como floculante secundario en coagulación-floculación se convierte, en este Trabajo Fin de Grado, en objeto de interés y estudio en lo que al tratamiento de aguas se refiere.

1.3 Justificación

El presente proyecto surge como una necesidad de realizar una innovación en las técnicas de tratamiento de aguas residuales, como una forma más de protección de los ecosistemas acuáticos y, al mismo tiempo, proponer una solución para los lodos que se generan en procesos de electrocoagulación.

El método que se emplea en el proyecto, la coagulación-floculación, utiliza como materia prima los lodos generados en la electrocoagulación con electrodos de aluminio. Esta es considerada una de las tecnologías más eficaces a la hora de eliminar metales pesados, sólidos en suspensión y se considera como una de las técnicas más eficientes en lo que al tratamiento de las aguas se refiere. Durante este proceso, al igual que en el resto de los procesos similares, también se generan lodos que, normalmente, se consideran un residuo a desechar. En base a los principios de economía circular, que promueve la valoración y reutilización de materiales, se emplearán estos lodos para extraer coagulantes que serán empleados en un posterior tratamiento de coagulación-floculación.

En este Trabajo Fin de Grado se plantea el estudio de los lodos generados durante la electrocoagulación con aluminio para comprobar si sus propiedades fisicoquímicas permiten su utilización a la hora de tratar otras aguas. Emplear estos lodos como coagulante-floculante secundario, podría contribuir a reducir el consumo de otros reactivos, disminuir el volumen de residuos y mejorar los costes en los procesos de tratamiento.

1.4 Objetivos

En base a lo anterior resulta oportuno realizar un amplio estudio del tema para comprobar la eficacia de los lodos para nuevos tratamientos, para ello se plantean diferentes objetivos:

- Obtener lodos de electrocoagulación, a partir de disoluciones sintéticas, de las cuales extraer los lodos a emplear posteriormente. Para estas se emplearán electrodos de aluminio.
- Analizar la composición de los lodos extraídos en relación con su concentración de aluminio.
- Obtener coagulantes a partir del aluminio extraído por medio de hidrólisis ácida.
- Comparar el resultado de los lodos en comparación con floculantes convencionales a la hora de realizar el tratamiento.
- Evaluar la velocidad de eliminación de los contaminantes en aguas, por medio de cinéticas de reacción.
- Evaluar el rendimiento de materiales reciclados en la obtención de las disoluciones de aluminio.

Cumpliendo los objetivos anteriores se podrá aportar una evidencia que avance en determinar el uso de los lodos de aluminio y cambiar la percepción tradicional de los mismos como residuo.

1.5 Estructura

En cuanto a la estructura del presente trabajo, comenzará con la introducción previa en la que se indica la presentación del trabajo, su motivación y justificación, así como los objetivos que se buscan cumplir con el mismo.

Se continúa con una explicación de las aguas residuales y de los principales residuos que presentan, realizando una clasificación clara y concisa sobre los mismos.

Posteriormente se presentan diferentes tipos de procesos y tratamientos empleados para el tratamiento de dichas aguas, así como una comparativa entre ellas indicando tanto sus aspectos positivos como los negativos.

Se continúa enfocándonos en los materiales y métodos empleados en el desarrollo del trabajo y que nos llevarán a cumplir con los objetivos previamente expuestos.

A continuación, se discutirán los resultados obtenidos de la fase experimental y se realiza el estudio de viabilidad del proceso empleado.

Se finaliza el proyecto con las conclusiones obtenidas del mismo y presentando una serie de líneas futuras.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Tipos de aguas a tratar mediante la coagulación-floculación

De entre las técnicas de tratamiento de aguas residuales existentes, este trabajo se centra en la coagulación-floculación, ya que esta técnica representa un proceso crítico para eliminar partículas coloidales y turbidez que otros métodos físicos no logran retener (Figura 2-1). Además, investigar su optimización permite reducir el uso de reactivos químicos y mejorar la eficiencia energética, alineando el proyecto con la sostenibilidad y la reducción de costes en el tratamiento de aguas.

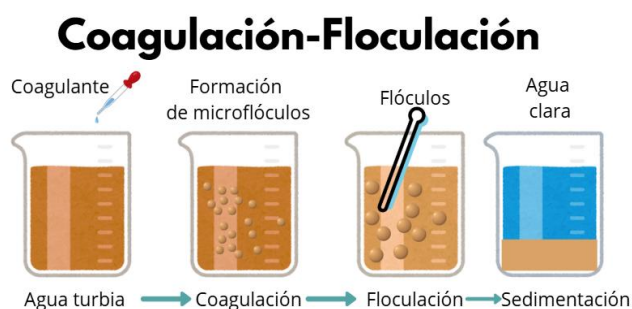


Figura 2-1 Proceso de coagulación-floculación (elaboración Propia en Canva).

En este proceso influyen de manera notable dos factores: en primer lugar, el tipo de agua a tratar y, en segundo lugar, el tipo de contaminantes. Comenzaremos a continuación con el tipo de aguas (Figura 2-2), estas pueden clasificarse principalmente en: aguas urbanas y aguas industriales. En ellas, los contaminantes más habituales son metales, grasas y sólidos, entre otros. Estos contaminantes son decisivos para demostrar tanto la eficacia del proceso como los lodos que con él se generarán [9].

2.1.1 Aguas residuales urbanas

Se entiende por aguas residuales urbanas el conjunto formado por aguas de origen doméstico con carga orgánica, que poseen sólidos en suspensión y microorganismos. Estas aguas sin tratamiento son vertidas al medio ambiente afectando a la salud de especies y dañando ríos, lagos, mares y, en consecuencia, océanos.

El principal interés respecto al tratamiento de estas aguas reside en una serie de puntos clave, tales como, la obligación de pagos derivados de la contaminación - canon de vertido, infracciones por vertidos u otros -, el impulso de la economía circular en los procesos de tratamiento o garantizar el acceso a saneamiento por parte de todos los usuarios. Para ello, la coagulación-floculación es un factor clave ya

que, actuando como terciario en el tratamiento, consigue eliminar excesos de nutrientes y otros compuestos que pueden causar efectos más dañinos en caso de no tratarse de la manera adecuada [10].

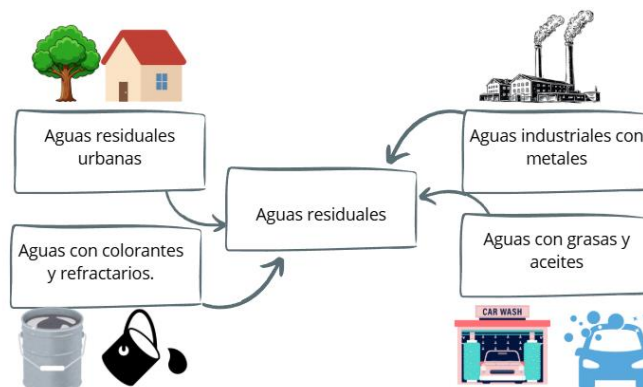


Figura 2-2 Tipos de aguas residuales (Elaboración Propia con Canva)

2.1.2 Aguas residuales industriales con metales

Las aguas procedentes de procesos como la minería o metalurgia suelen contener metales, como el cobre, en disolución o pequeñas y finas partículas que responden de manera efectiva al ser tratadas mediante el proceso de coagulación-floculación. La efectividad del proceso de tratamiento lleva a realizar un estudio profundo de su eficiencia y valorización [11]. En lo referente al tratamiento de los metales pesados, la coagulación-floculación es un proceso de desestabilización de partículas coloidales, lo que facilita su eliminación posterior. Esta influye de distinta manera en cada una de sus etapas:

- Coagulación: influye de manera directa en la química del agua a tratar eliminando la capa que mantiene a las partículas en suspensión, también conocidas como coloides, permitiendo su agrupación.
- Floculación: los coloides se agrupan por la atracción existente entre sus partículas y debido al uso de agentes floculantes que forman flóculos que sedimentan de manera más veloz.

El tipo de agente coagulante químico empleado es también un factor decisivo en la eliminación de los contaminantes.

2.1.3 Aguas residuales con colorantes y compuestos orgánicos recalcitrantes

Las aguas provenientes de sectores industriales, en especial del textil, poseen una elevada complejidad debido a la presencia de colorantes y compuestos orgánicos recalcitrantes [12]. Los recalcitrantes son compuestos que presentan limitada capacidad de biodegradación en los ecosistemas. Esta industria, consume entre 80 y 150 litros de agua por kilogramo de tela procesada, de los que una gran parte es descargada con elevadas concentraciones de pigmentos diseñados para ofrecer alta resistencia a la degradación biológica y química.

Los colorantes juegan un papel fundamental en la eutrofización [13]. Su presencia da lugar a un grave impacto ambiental al inhibir la fotosíntesis de las plantas y reducir el O_2 disuelto. Muchos de estos compuestos son tóxicos para los animales y seres humanos.

2.1.4 Aguas con grasas y aceites

Algunos ejemplos claros de aguas con aceites y grasas son las procedentes del lavado de vehículos, de frigoríficos y mataderos y de industrias lácteas. Estas presentan un problema significativo para el medioambiente. El tratamiento de estas mediante coagulación-floculación presenta una solución muy necesaria ya que, el aceite presente en el agua no puede separarse de manera efectiva mediante técnicas convencionales y sencillas.

Al igual que en las anteriores el tratamiento hace que las partículas de contaminantes se desestabilicen de manera que posteriormente se agrupen formando coágulos que son más sencillos de eliminar. En el caso de estas aguas, la eficacia del tratamiento se encuentra próxima a un 98% [14].

2.1.5 Aguas de origen agropecuario

Las aguas de origen agropecuario contienen grandes cantidades de nitratos y fosfatos, esto supone uno de los problemas ambientales más grandes y extendidos a nivel global. Los nitratos de esta industria provienen, en su mayoría, del uso excesivo de fertilizantes, así como de la inadecuada gestión de residuos ganaderos como el estiércol [15]. Estos son muy solubles, por ello, se filtran a través del suelo y son arrastrados hacia ríos y lagos. En los casos más extremos, su consumo puede derivar en enfermedades como la metahemoglobinemia y cáncer colorrectal y de próstata.

Los fosfatos, se adhieren a las partículas del suelo, siendo menos móviles que los nitratos. Su principal vía de acceso es la escorrentía de campos fertilizados y se generan, en su mayoría, por la descomposición de restos orgánicos vegetales y desechos animales [16].

En el año 2022 aproximadamente el 37% de las aguas subterráneas y el 11% de las superficiales, estaban contaminadas por nitratos. Se establecen límites de la cantidad máxima que pueden contener, en el caso de la normativa europea y española el límite se encuentra en 50 mg/L, a pesar de que hay mayores limitaciones presentes en el Real Decreto 47/2022, en el que se indican límites de 25 mg/L en aguas superficiales y de 37,5 mg/L en subterráneas [17].

2.2 Principales contaminantes presentes y tratamiento con coagulación-floculación

Las aguas residuales contienen una amplia variedad de contaminantes que, como se ha mencionado en anteriores apartados del presente trabajo, afectan a la calidad del agua y al equilibrio de los ecosistemas alterando la vida de las especies que en ellas habitan y de los seres vivos que de ellos se alimentan.

Entre los principales contaminantes se encuentran: nutrientes inorgánicos como el nitrato y el fosfato, y metales pesados como el cobre. Estos contaminantes, como se ha mencionado en los diferentes tipos de aguas proceden de diversas fuentes. Su presencia en elevadas cantidades puede provocar importantes impactos ambientales por lo que, su tratamiento es fundamental. La técnica objeto de estudio, ha sido elegida debido a su eficacia para tratar contaminantes asociados a partículas que puedan precipitar como compuestos insolubles [10].

2.2.1 Nitratos

Los nitratos (Figura 2-3) son compuestos muy solubles generados, principalmente, como resultado del uso de fertilizantes en el sector de la agricultura, también se encuentran en la descomposición de materia orgánica y en las mencionadas aguas residuales urbanas. Estos son compuestos muy solubles lo que implica que pueden desplazarse de manera sencilla por filtraciones de los suelos aumentando su rango de acción al poder alcanzar las aguas subterráneas [18].

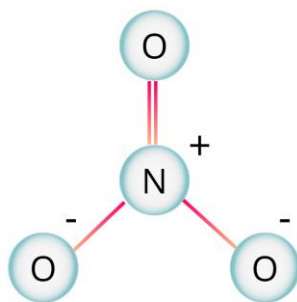


Figura 2-3 Molécula de nitrato. (Elaboración Propia con Canva)

Su elevada presencia puede generar procesos de eutrofización, que provocan el exceso de nutrientes en agua generando un crecimiento descontrolado de algas en ellas, lo que afecta de manera negativa a la vida de las especies en los ecosistemas acuáticos ya que, la descomposición posterior produce grandes cantidades de oxígeno que pueden generar hipoxia provocando la muerte de numerosos organismos acuáticos (Figura 2-4).

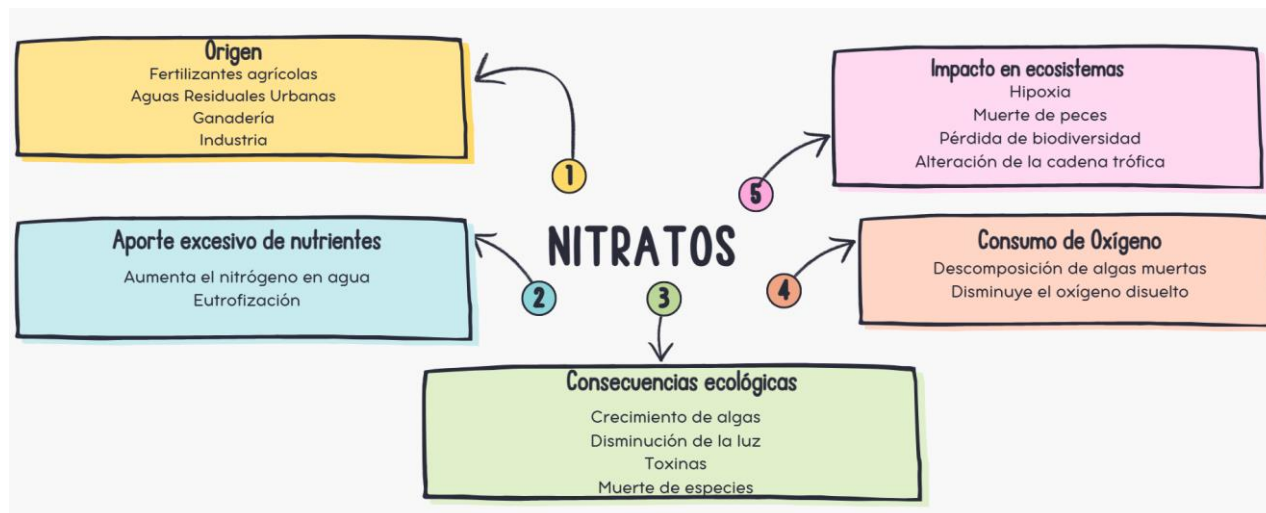


Figura 2-4 Esquema de Nitratos. (Elaboración Propia con Canva)

Centrándonos en los efectos adversos para los seres humanos, elevadas concentraciones de estos en agua pueden causar efectos muy dañinos como la metahemoglobinemia (Figura 2-5), que impide el transporte de oxígeno en sangre de manera correcta [19]. Este hecho fue propuesto por primera vez por Hunter Comly en el año 1945 quien afirmaba que la principal causa de la enfermedad en los menores era la presencia de elevadas concentraciones de estos nitratos. Esta teoría sería respaldada posteriormente por la Organización Mundial de la Salud que estableció como límite máximo de contaminación por nitratos de las aguas potables en 10 ppm. A pesar de que los pacientes presentaban más patologías, lo cual advertía que el nitrato no era lo único causante de la enfermedad, es un factor a tener en cuenta a la hora de investigar y potenciar su tratamiento [20].

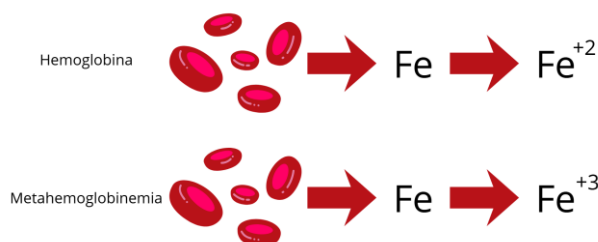


Figura 2-5 Metahemoglobinemia. (Elaboración Propia con Canva)

2.2.2 Fosfatos

Uno de los principales nutrientes presentes en las aguas residuales es el fósforo. Este se encuentra en ellas en forma de fosfatos. Estos proceden principalmente de fuentes agrícolas, detergentes, industrias y residuos orgánicos. Uno de los principales factores responsables de la eutrofización de las aguas de lagos, ríos y zonas costeras es el exceso de estos fosfatos en ellas [21].

En muchos de los ecosistemas a los que se hace referencia en este trabajo, el fosfato es un nutriente limitante, lo que quiere decir que cualquier mínima concentración puede estimular el crecimiento de algas de forma excesiva. Este hecho puede igualmente producir la reducción del oxígeno disuelto en el agua, así como una reducción de la penetración de la luz en el cuerpo del agua. La luz se reduce debido

al crecimiento excesivo de las algas que dificultan la entrada de luz a todas las zonas que, anteriormente se encontraban expuestas a ella y, cuyos organismos dependen de manera directa de esta exposición a la luz solar. Cuando estas algas llegan al final de su ciclo vital y mueren, se descomponen, lo cual requiere grandes cantidades de oxígeno que es lo que hace que, posteriormente, existe una ausencia de este que conlleva a las condiciones ya mencionadas de hipoxia que afectan de manera notable a especies marinas pudiendo causarles la muerte [22].

A diferencia de los nitratos, los fosfatos se pueden eliminar de manera eficaz mediante procesos de coagulación-floculación con productos de aluminio. Durante el tratamiento, los coagulantes metálicos pueden reaccionar con los fosfatos formando precipitados que se agregan en flóculos y que se pueden eliminar por sedimentación.

El mecanismo que describe su eliminación consta de tres etapas:

- Precipitación química: formación de sólidos insolubles a partir de una disolución líquida.
- Adsorción sobre hidróxidos metálicos: el residuo se enlaza en la superficie de un sólido.
- Incorporación del fósforo en los flóculos generados: el fósforo se incorpora a los flóculos para ser posteriormente eliminado.

Además, los hidróxidos que se generan durante la coagulación presentan una elevada superficie que favorece la adsorción de los fosfatos (Figura 2-6). Esto resulta de vital importancia en procesos ricos en aluminio como ocurre en el caso de la electrocoagulación. En estos casos, los lodos generados son capaces de retener nutrientes como es el caso del fósforo. Es debido a esto que, en los últimos años se estudia la posibilidad de reutilizar dichos lodos como agentes coagulantes secundarios en el tratamiento de las aguas [23].

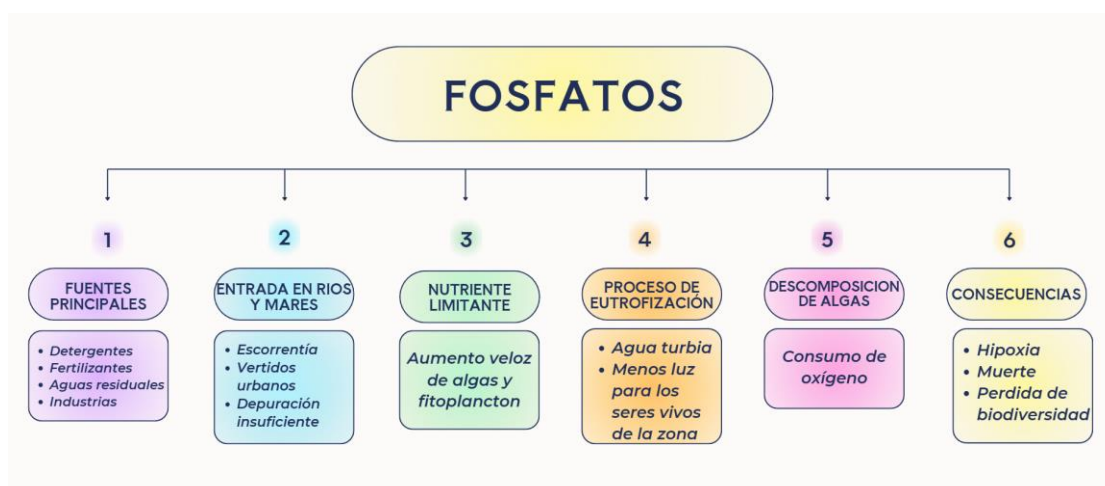


Figura 2-6 Esquema de consecuencias de fosfatos. (Elaboración Propia con Canva)

2.2.3 Cobre

El cobre (Figura 2-7) puede encontrarse en aguas residuales como resultado de diversas actividades industriales entre las cuales se pueden destacar: minería, metalurgia, fabricación de componentes electrónicos y tratamientos superficiales de metales, además, su presencia se debe también a la corrosión de las tuberías de cobre internas así como de sus accesorios, como válvulas y juntas [24].

Existe una dualidad en la concepción de este compuesto en los alimentos y aguas ya que se considera tanto un nutriente esencial como un contaminante. El cobre como nutriente esencial se define como tal debido a la necesidad de los seres humanos de su adquisición para el cumplimiento de sus funciones con normalidad, pero este ha de encontrarse dentro de unos límites para evitar efectos dañinos como por ejemplo daños en el hígado, los riñones y el sistema nervioso pudiendo, en los casos más extremos, llegar a ser mortal [25].

El cuerpo humano cuenta con mecanismos de homeostasis para regular los niveles de cobre que permitan una ingesta normal sin riesgo de superar los límites de la seguridad. Para un adulto se considera un rango aceptable la ingesta oral de en torno a 2 o 3 mg de cobre diarios sin exceder el límite de 10 mg por día.

A diferencia de otros contaminantes orgánicos, los metales no se degradan en el medio ambiente y se pueden acumular en los ecosistemas acuáticos. La presencia del cobre en el agua supone un riesgo para los organismos acuáticos, para las aguas en sí y, por ende, para los seres humanos. Al igual que para los humanos, el cobre en cantidades excesivas puede resultar dañino para diferentes especies que habitan los ecosistemas marinos. Este puede influir negativamente en procesos fisiológicos esenciales para la vida de estos como pueden ser: la respiración celular, la actividad de las enzimas o el equilibrio iónico de las células, entre otros. En los peces, la exposición a altas concentraciones de este material, puede provocar daños branquiales haciendo difícil el intercambio de oxígeno y pudiendo provocar, en el peor de los casos la muerte de estas especies [26].

La eliminación del cobre es uno de los principales retos en lo que al tratamiento de aguas se refiere. Al igual que para los anteriores existen diferentes tecnologías que contribuyen a su eliminación como la precipitación química, la filtración por membranas y los procesos electroquímicos. Entre estas técnicas, la coagulación-floculación se ha consolidado como un método eficaz y económico. Durante el proceso, los iones metálicos pueden ser eliminados de maneras diversas como, por ejemplo, mediante la precipitación en forma de hidróxidos metálicos insolubles. A pesar de la simplicidad de la técnica y de su bajo coste, se pueden generar lodos voluminosos de baja densidad, lo que aumentaría el precio del tratamiento y de manejo de los residuos posteriormente. La eficiencia del proceso se encuentra ligada de manera estrecha al control del pH ya que determina la especiación del cobre en el agua a tratar. Asimismo, la concentración inicial de cobre, desempeña un papel fundamental en lo que al tratamiento se refiere ya que actúa como fuerza impulsora que permite vencer a las resistencias de transferencia de masa entre la solución y los flóculos generados [27].

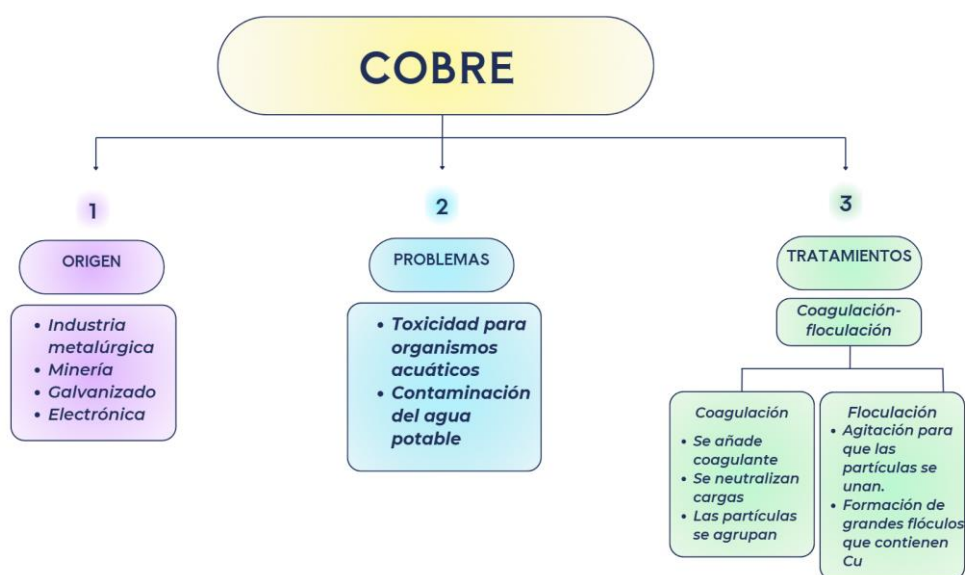


Figura 2-7 Cobre como contaminante. (Elaboración Propia con Canva)

2.3 Normativa y marco legal en el tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas está regulado en Europa por un amplio conjunto de normativas destinadas, no solo a indicar cómo se han de tratar las aguas, sino también a enfocar este tratamiento en proteger la salud pública y los ecosistemas acuáticos. En estas normas se especifican requisitos de recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas e industriales, además de definirse límites para

contaminantes específicos, en especial nutrientes, materia orgánica y metales pesados. Entre toda la normativa existente al respecto, destaca la Directiva de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas [10].

El principal fin de esta es proteger al medio ambiente de los efectos negativos derivados de la descarga de aguas sin tratar. En esta normativa, se establecen los parámetros de calidad del agua entre los que se pueden destacar: la materia orgánica, los nutrientes como nitrógeno y fósforo y determinados contaminantes químicos [28]. Para ello, se establecen diferentes niveles de tratamiento por los que las aguas han de pasar antes de ser vertidas finalmente. Los niveles de tratamiento incluyen:

- Tratamiento primario: eliminación de sólidos en suspensión mediante procesos físicos como por ejemplo la sedimentación.
- Tratamiento secundario: eliminación de materia orgánica biodegradable mediante procesos biológicos.
- Tratamiento terciario o avanzado: eliminación de contaminantes en específico como nutrientes o metales.

El objetivo de cada uno de estos niveles es eliminar diferentes tipos de contaminantes presentes en el agua para ir poco a poco y de manera progresiva llegando a unos niveles de contaminación aceptables de cara al vertido. En el caso del cobre, la OMS establece el límite seguro en 2 mg/L en el agua del grifo [25], el consumo en adultos tiene un límite de 5 mg/día según la European Food Safety Authority (EFSA) [29]. Con respecto a los nitratos, el nivel máximo se establece en 50 mg/L [30]. Con respecto al fosfato, las cantidades superiores a 0,09 mg/L son consideradas críticas [31].

En esta normativa se establecen los parámetros de calidad del agua, entre ellos se pueden destacar: la materia orgánica, los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, entre otros contaminantes químicos [28]. Además, la OMS contempla metales pesados como el cobre que pueden ocasionar riesgos para la salud (Figura 2-8).



Figura 2-8 Normativa. (Elaboración Propia con Canva)

2.4 Papel de la coagulación-floculación en el tratamiento de aguas contaminadas

El tratamiento de aguas residuales es un proceso fundamental para reducir la contaminación del medio y poder así garantizar mayor protección de los ecosistemas y de la salud. Las aguas, como ya se ha visto, contienen una gran variedad de contaminantes, debido a ello, su tratamiento se basa en una combinación de diferentes tipos de procesos: físicos, químicos y biológicos que permiten reducir, eliminar o transformar los diferentes compuestos antes de su vertido.

Entre los diferentes procesos y tecnologías que se emplean en los tratamientos, los procesos de coagulación-floculación ocupan un papel esencial debido a su capacidad para eliminar sólidos coloidales, materia orgánica y contaminantes químicos.

2.4.1 Coagulación-floculación en el proceso de tratamiento

La coagulación-floculación es uno de los procesos químicos más empleados en el tratamiento de aguas residuales y aguas potables. Este se basa en desestabilizar las partículas coloidales presentes en el agua para más tarde adherirlas a flóculos de mayor tamaño, desde 0,1 a varios milímetros, que se puedan desechar mediante sedimentación o filtración [33]. Las partículas que se encuentran en el agua suelen tener cargas eléctricas debido a las fuerzas de repulsión electrostáticas existentes entre ellas. La adición de coagulantes metálicos permite que se neutralicen estas cargas eléctricas y favorece la formación de agregados.

Entre las sales que más se suelen emplear se encuentran las sales de aluminio y hierro, por ejemplo, el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) o el cloruro de aluminio (AlCl_3). Cuando se añaden al agua en cuestión, reaccionan formando hidróxidos metálicos que actuarán como agentes adsorbentes que captarán los diferentes contaminantes presentes en el agua. Durante la primera etapa, la de coagulación, se produce una rápida mezcla del coagulante con el agua residual. Esto permite que el reactivo se disperse y las partículas coloidales se desestabilicen. Más tarde, en la etapa de floculación, se aplica una agitación más suave que favorece el crecimiento de los flóculos de mayor tamaño (de 0,1 a varios milímetros).

Entre los contaminantes que se pueden eliminar con la coagulación-floculación podemos encontrar: materia orgánica, microorganismos y algunos metales pesados. Los coagulantes metálicos reaccionan con los fosfatos formando compuestos insolubles que precipitan posteriormente y se eliminan junto con los flóculos generados durante el proceso.

De la misma manera, los hidróxidos que se consiguen generar durante todo el proceso tienen una elevada capacidad de adsorción que permite eliminar contaminantes como el cobre. Por ello, este proceso es el más adecuado de cara a realizar el tratamiento de aguas contaminadas con nutrientes como el nitrato y fósforo y metales pesados como el cobre. Entre estos, los nitratos presentan una mayor dificultad de eliminación mediante este tipo de procesos por la alta solubilidad que este presenta. Si bien otros procesos como la electrocoagulación resultan más útiles para su eliminación, resulta interesante comprobar los niveles de reducción que se consiguen empleando la coagulación-floculación. Diversos estudios muestran diferencias de hasta un 60% de eficiencia de eliminación de diferencia, viéndose la gran eficacia de la electrocoagulación en comparación. En relación con los nitratos, estos son compuestos muy solubles, por ello no tienden a adherirse a los flóculos químicos tradicionales [34].

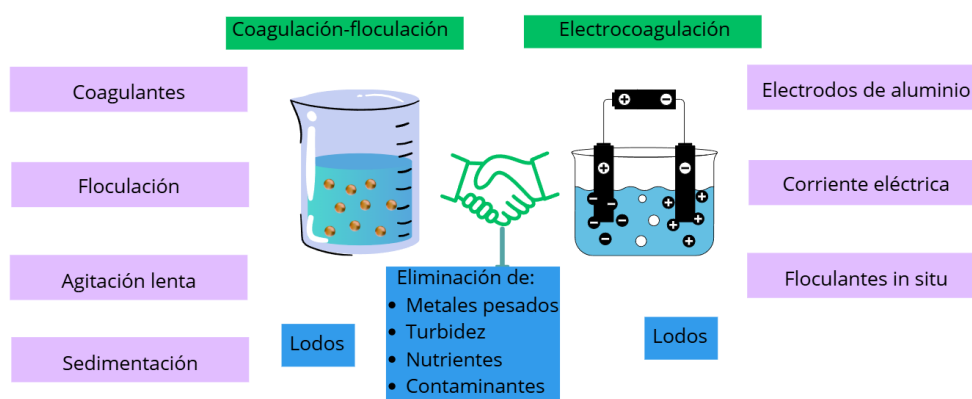


Figura 2-9 Cooperación entre procesos. (Elaboración Propia con Canva)

La ventaja principal que presenta la electrocoagulación (Figura 2-9) frente a otros métodos convencionales es la posibilidad de generar coagulantes *in situ* mediante la oxidación de un ánodo permitiendo la eliminación de las partículas de menor tamaño sin necesidad de añadir reactivos químicos externos. Resulta interesante estudiar qué sucede si a este proceso le sumamos la coagulación-floculación y en qué rango aumenta la cantidad de las diferentes sustancias eliminadas. El objetivo que

se busca es ver cómo los lodos pueden ser reutilizados para otros tratamientos y en el caso de la electrocoagulación, minimiza su producción [35].

2.4.2 Electrocoagulación como fuente de lodos

La electrocoagulación, proceso en el que un electrodo metálico se oxida liberando iones metálicos en el agua es una parte fundamental del presente trabajo ya que es la tecnología con la que se obtiene el aluminio que se empleará para la síntesis de los coagulantes. Cuando se emplean dos electrodos de aluminio se liberan iones Al^{3+} [36]. Estos iones reaccionarían con el agua formando hidróxidos de aluminio que actuarán posteriormente como coagulantes capaces de realizar la adsorción de contaminantes presentes en las aguas que se traten [37], en el caso de este Trabajo Fin de Grado, de nutrientes como los fosfatos y de metales pesados como el cobre [38].

Los lodos empleados en estos procesos contribuyen al cuidado del medio ambiente. Con ellos se cumple la idea fundamental de la economía circular que busca reducir la cantidad de residuos, maximizando a su vez, la recuperación de metales valiosos [23].

Debido a esto, en los últimos años, las líneas de investigación han avanzado hacia el estudio de reutilización de lodos como adsorbentes o coagulantes secundarios en procesos de tratamiento. En el caso del presente trabajo, esto es especialmente relevante ya que se pretende evaluar la eficacia de estos lodos como floculantes secundarios en el proceso de coagulación-floculación.

2.5 Lodos: generación, caracterización y reutilización

Los procesos de tratamiento generan productos sólidos entre los cuales destacan los lodos (Figura 2-10). En la electrocoagulación estos lodos contienen hidróxidos metálicos, agua y contaminantes que se han capturado durante el proceso de tratamiento. Estos, considerados a menudo como residuo eran deshidratados y eliminados. Hoy en día los avances en estudios sobre la economía circular y el cuidado del medio ambiente han conducido a una valorización de los mismos para reducir el volumen de residuos y fomentar la reutilización de residuos como aportes en procesos posteriores de tratamiento [23].

En el caso de los lodos ricos en aluminio, el interés es creciente y notablemente alto debido a que los hidróxidos generados durante el tratamiento poseen una elevada capacidad de interacción con partículas coloidales, fósforo y metales pesados [23]. Debido a esto, en el presente trabajo se busca estudiar la efectividad de los lodos de aluminio en el proceso de coagulación-floculación evaluando su comportamiento frente a los contaminantes que más se encuentran en el agua: nitratos, fosfatos y cobre.

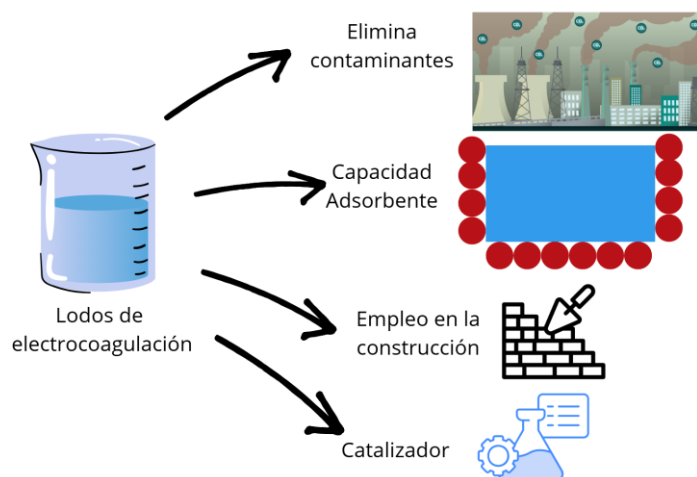


Figura 2-10 Empleos de los lodos. (Elaboración Propia con Canva)

2.5.1 Naturaleza de los lodos ricos en aluminio

Los lodos (Figura 2-11) que se generan con coagulantes de aluminio o en procesos de electrocoagulación con electrodos de aluminio comparten como principal característica la gran cantidad de hidróxidos de aluminio presentes en ellos. Estos compuestos se forman a medida que el aluminio que se libera al medio acuoso se precipita creando una sólida matriz capaz de atrapar partículas, adsorber especies disueltas y favorecer la coprecipitación de contaminantes. Los lodos conservan, por lo tanto, la capacidad de eliminar contaminantes [33].

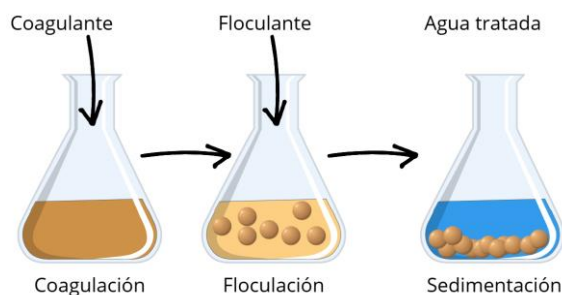


Figura 2-11 Formación de lodos. (Elaboración Propia con Canva)

En trabajos previos sobre el tratamiento de aguas [39] se describe la capacidad de los lodos para retener fósforo, materia orgánica y metales, lo que supone una ventaja y al mismo tiempo una desventaja. El aspecto positivo de estos materiales es que si el material es afín a los contaminantes se puede emplear como adsorbente o ayuda a la coagulación. La limitación que presenta es que esa carga retenida puede suponer un riesgo bajo ciertas condiciones fisicoquímicas como por ejemplo en cambios de pH. Debido a esto, cualquier método de reutilización debe partir de una cuidada y rigurosa caracterización del lodo, así como de ensayos de su comportamiento en medio acuoso [33].

La gran riqueza en aluminio de estos lodos da respuesta a su uso como tratamiento de fosfatos. El fósforo presenta una enorme afinidad con las superficies de sólidos e hidróxidos de aluminio. Además, existe algún trabajo [40] que se ha centrado en investigar el uso de residuos ricos en aluminio para inmovilizar y remover el fósforo de aguas contaminadas. Por el contrario, el nitrato tiene un comportamiento muy distinto, su alta solubilidad y su dificultad a la hora de precipitar con aluminio en condiciones habituales de tratamiento hacen su eliminación y tratamiento con este tipo de materiales sea, por lo general, mucho menos eficiente.

2.5.2 Caracterización de lodos

La reutilización de los lodos no se puede plantear sin entender su composición y propiedades. La mayor parte de trabajos y estudios sobre este tema tratan una caracterización fisicoquímica que permite relacionar la naturaleza de los lodos con su comportamiento en lo que al tratamiento de aguas se refiere [23]. Entre las principales técnicas (Figura 2-12) destacan:

- Microscopía electrónica de barrido con análisis elemental: es una técnica que emplea un fino haz de electrones que, al incidir con una muestra, genera señales que se convierten en imágenes digitales de alta resolución [41].
- Difracción de rayos X: se emplea para identificar las diferentes fases minerales y cristalinas. Se usa para identificar compuestos confirmando la presencia de fases similares a la magnetita en lodos de hierro o estructuras cuando se busca la valorización del lodo como fertilizante. Además, permite verificar la pureza de los materiales obtenidos.
- Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier: técnica que identifica grupos químicos funcionales en la superficie del lodo.
- Fluorescencia de rayos X: esta técnica se emplea para determinar metales en matrices sólidas.
- Análisis químicos de contenido metálico, humedad, cenizas y materia orgánica: este conjunto de pruebas permite conocer el origen y composición exacta del lodo para decidir

su uso final. Los estudios miden elementos como el aluminio, hierro, magnesio, silicio y calcio. Así mismo, también se analizan parámetros como la densidad y la resistencia a la compresión cuando el lodo se emplea mezclado con cemento en la industria de la construcción.



Figura 2-12 Técnicas de análisis. (Elaboración Propia con Canva)

Estas técnicas permiten identificar la morfología del sólido, presencia de aluminio y otros elementos lo cual permite decidir su uso final en lugar de ser un desecho más. La valorización de estos lodos depende de manera directa de la calidad del sólido generado, que está condicionada por la composición del agua tratada y por las condiciones en las que se lleve a cabo el proceso de tratamiento. Del mismo modo, algunos trabajos sobre la recuperación y reutilización de los lodos de tratamiento [33] hacen especial hincapié en que la composición química del residuo es fundamental para determinar la posibilidad de su reaprovechamiento sin que se comprometa la seguridad del medio ambiente.

2.5.3 Recuperación de coagulante desde lodos

En la actualidad, además de la reutilización de manera directa de los lodos como material existen otras líneas de investigación que estudian la recuperación del coagulante contenido en el residuo. Esta estrategia puede reducir el volumen del lodo final y el consumo de reactivos a pesar de mostrar dificultades técnicas y de calidad del coagulante recuperado. Esta línea de investigación busca, en resumen, extraer aluminio del lodo para usarlo de nuevo como coagulante líquido [33]. La extracción de este lodo se puede llevar a cabo siguiendo dos caminos principalmente (Figura 2-13):

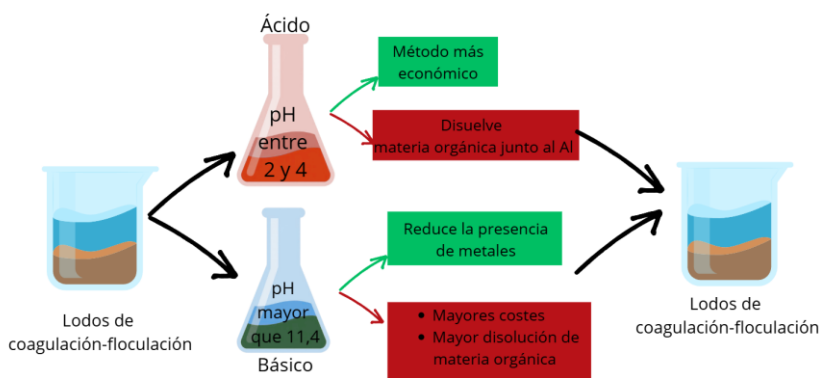


Figura 2-13 Extracción de lodos. (Elaboración Propia con Canva)

- Vía ácida: la acidificación es el método más común y económico, generalmente empleando ácido sulfúrico (H_2SO_4). El aluminio se va solubilizando a medida que baja el pH,

alcanzando una recuperación efectiva con un pH de entre 2 y 4. El principal inconveniente que presenta esta técnica es que disuelve tanto el aluminio presente como la materia orgánica y metales pesados presentes.

- Vía básica: la alcalinización puede llevar a una obtención del aluminio con pH superiores a 11,4. Esta técnica reduce la presencia de metales pesados, pero su principal inconveniente es el precio y el hecho de que disuelve más la materia orgánica que el método ácido.

El principal inconveniente respecto al uso de coagulantes recuperados radica en la materia orgánica disuelta y los contaminantes acumulados. En caso de que el coagulante contenga esta materia orgánica, al introducirlo de nuevo en el proceso de tratamiento y añadir cloro, se pueden generar trihalometanos que son potencialmente cancerígenos [33]. Para poder hacer frente a estos problemas de calidad, la investigación busca tecnologías que separen el metal de los contaminantes como (Figura 2-14):

- Membranas de Donnan: que emplean el propio potencial electroquímico para mover los iones de aluminio a través de una membrana de cationes, lo que rechaza la materia orgánica por su tamaño o carga negativa.
- Ultrafiltración: que separa por tamaño permitiendo recuperar el aluminio dejando pasar a su vez una cantidad considerable de materia orgánica. Esto puede dar lugar a que se deban emplear posteriores etapas de purificación.
- Resinas de intercambio iónico: ofrecen una mayor pureza que las anteriores pero el precio de los productos para generar estas resinas es mucho más elevado que el valor del coagulante que se recupera con este proceso.

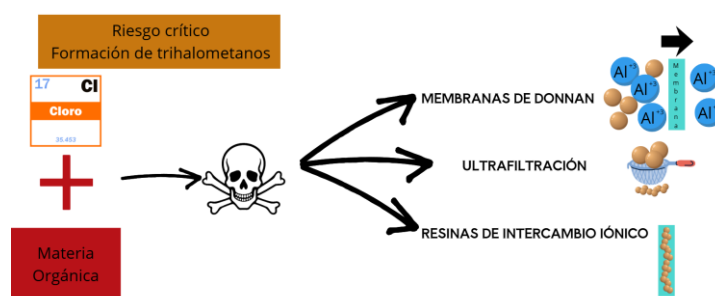


Figura 2-14 Separación de contaminantes. (Elaboración Propia con Canva)

Este estudio de recuperación del coagulante está en constante estudio debido a que la normativa para el tratamiento de aguas residuales es mucho menos estricta que el de agua potable, por ello, emplear este método supone una ventaja notable.

2.6 La economía circular en el tratamiento de aguas residuales

Se entiende por economía circular (Figura 2-15) un modelo de producción y consumo que busca mantener los recursos en uso durante el mayor tiempo posible, reduciendo en la medida de lo posible la cantidad de residuos generados y favoreciendo a su vez la reutilización y reciclaje de materiales.

En la actualidad la gestión del agua ha evolucionado de manera significativa pasando de un enfoque en la eliminación de contaminantes a un modelo basado en la sostenibilidad y aprovechamiento de los recursos para el cuidado del medio ambiente. Este nuevo enfoque es completamente diferente a la tradicional economía lineal en que los recursos se extraen, se usan en el proceso que se requieren y se desechan. En nuestro ámbito de estudio, el del tratamiento de aguas, la aplicación de esta economía circular implica un cambio en las plantas de tratamiento, transformándolas en sistemas capaces de depurar el agua y, al mismo tiempo, recuperar recursos valiosos presentes en las corrientes de residuos [32].

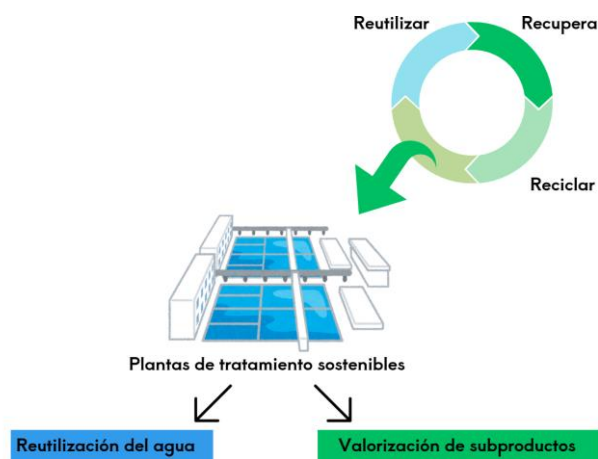


Figura 2-15 Economía circular. (Elaboración Propia con Canva)

Uno de los principales objetivos de la economía circular es la reutilización del agua tratada. Esta reutilización es fundamental en zonas en las que la disponibilidad del agua es limitada. En la Unión Europea, esta reutilización del agua es una herramienta clave para mejorar la resistencia frente al cambio climático y garantizar la seguridad de las aguas a largo plazo [42]. En el caso del tratamiento de aguas, la economía circular va más lejos de la reutilización de las aguas tratadas, un aspecto fundamental, es la valorización de los subproductos generados durante los tratamientos.

La economía circular se encuentra íntimamente ligada a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (Figura 2-16). En particular, esta se encuentra relacionada con el presente trabajo en el objetivo 6 de agua limpia y saneamiento.



Figura 2-16 ODS Agenda 2030 (Tomada de [43])

2.6.1 Valorización de subproductos en el sector del agua

La valorización de subproductos (Figura 2-17) es uno de los pilares fundamentales en lo que, a economía circular aplicada al tratamiento de aguas, se refiere. Se busca identificar usos alternativos para materiales que, de manera tradicional eran considerados residuos y desechados, para transformarlos de esta manera en recursos útiles de nuevo. En el caso de los lodos generados en procesos de electrocoagulación resulta especialmente útil su reutilización debido a las propiedades que les puede conferir como adsorbentes o coagulantes que pueden emplearse en posteriores procesos ambientales. Los generados con aluminio, debido a que en su composición contienen hidróxidos metálicos, reaccionan posteriormente con diversos contaminantes presentes en el agua [23].



Figura 2-17 Valorización de lodos. (Elaboración Propia con Canva)

2.6.2 Recuperación de recursos en aguas residuales

Enfocando la economía circular al ámbito de estudio del presente trabajo, esta se centra en la recuperación de subproductos como los fosfatos. Su recuperación es uno de los pilares más avanzados en este sector ya que el fósforo es un nutriente esencial y considerado una materia prima crítica por la Unión Europea [44]. A pesar de ser un nutriente, su uso en la agricultura de forma masiva puede llevar a problemas ambientales graves lo que ha llevado a impulsar proyectos como el MAGNYFOS, que emplea subproductos industriales para recuperar el fósforo [45]. En España, por ejemplo, la planta Edar Sur, en Madrid ya opera a escala industrial (Figura 2-18) llevando a cabo la recuperación de hasta 260 kg de fósforo al día, obteniendo un fertilizante granulado de alta calidad, libre de patógenos [46].

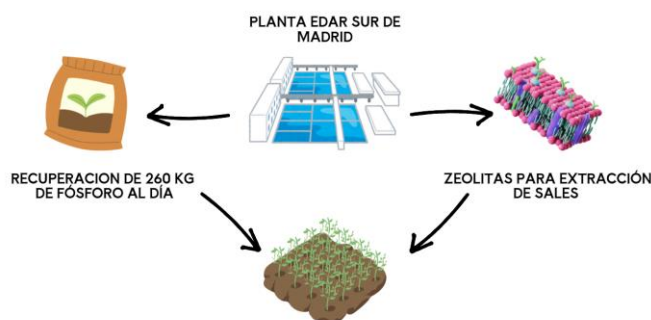


Figura 2-18 Ciclo de nutrientes P y N. (Elaboración Propia con Canva)

En lo que se refiere a los nitratos, objeto también de estudio del presente trabajo, su recuperación resulta de vital importancia para reducir el gran impacto ambiental de su producción, cumpliendo a su vez con normativas como la Directiva de Nitratos. Iniciativas como el proceso LIFE ENRICH demuestran que recuperar nitrógeno y fósforo de manera simultánea, integrándolos de manera simultánea en la cadena de valor agrícola como fertilizantes [47]. Tecnologías innovadoras que emplean zeolitas y contactores de membrana hacen posible la extracción de sales de amonio de las corrientes de residuos, haciendo que un residuo que antes causa obstrucciones en las tuberías sea ahora un recurso valioso para el mercado de materias primas secundarias.

La recuperación de metales como el cobre se enmarca en el deseo de la Unión Europea de duplicar su tasa de circularidad y crear un mercado único de materiales reciclados [48]. Los residuos de cobre son de las pocas corrientes que poseen criterios de fin de condición de residuo, que son los que permiten que residuos sean considerados como productos o materias primas secundarias aptas para su comercialización, esto favorece su reintroducción en el ciclo productivo como material competitivo frente a la minería tradicional. Uno de los principales objetivos que se buscan conseguir en el año 2026 (Figura 2-19) es escalar las tecnologías de separación para lograr que los metales alcancen la calidad y volumen precisos para poder asegurar el suministro industrial, reduciendo de esta manera la huella de carbono asociada a la extracción de minerales [49].



Figura 2-19 Recuperación y metas para 2026. (Elaboración Propia con Canva)

Esta transición hacia la economía circular mejora además la sostenibilidad económica de las estaciones depuradoras reduciendo el consumo de reactivos químicos y los costes de disposición de los lodos [46]. Integrar estos recursos recuperados en sectores como la nutrición vegetal o animal resulta fundamental para una transición alimentaria justa y sostenible. El éxito de este modelo reside en la eliminación de las barreras legales y de la inversión en I+D+i para consolidar los productos reutilizados como fertilizantes dentro del reglamento europeo (Figura 2-20) garantizando, de esta manera, su seguridad y eficacia en el campo [47].



Figura 2-20 Valorización de Subproductos y Materias Primas Secundarias. (Elaboración Propia con Canva)

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Esquema general del trabajo

El presente Trabajo de Fin de Grado sigue la distribución que se puede ver a continuación (Figura 3-1). En los siguientes apartados se explican uno a uno los diferentes procesos llevados a cabo.

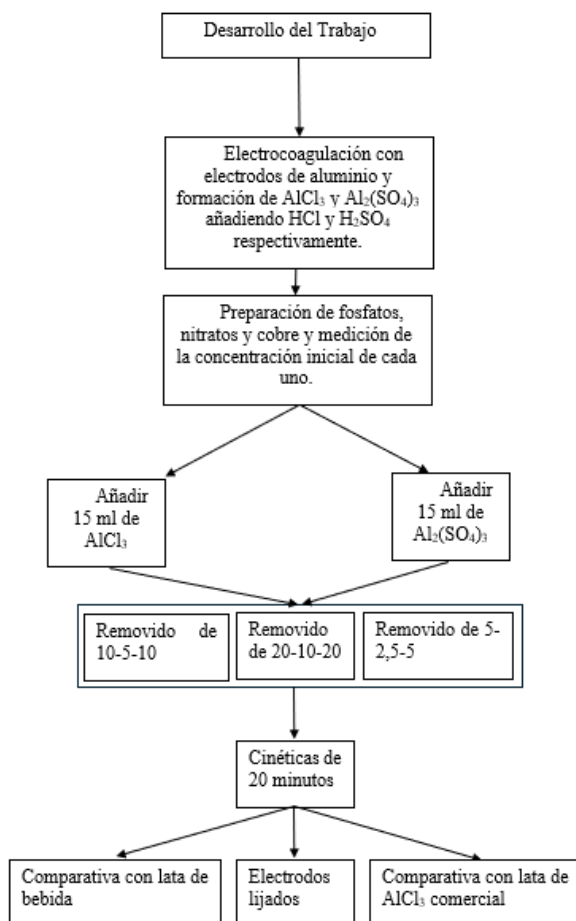


Figura 3-1 Esquema general del trabajo. (Elaboración Propia)

3.2 Electrocoagulación con electrodos de aluminio

3.2.1 Fundamento

La electrocoagulación (Figura 3-2) es el principal método que empleamos para la obtención del aluminio con el que, posteriormente, se llevará a cabo el tratamiento de aguas mediante la coagulación-floculación. En este experimento se utilizará una disolución salina, como medio conductor, para la electrocoagulación con el objetivo de obtener aluminio, minimizando otras interferencias.

3.2.2 Procedimiento

Tras realizar en un vaso de precipitados una disolución de NaCl de 10 mg/L en peso, se procede a introducir en ella dos electrodos de aluminio que actuarán como ánodo y cátodo y se hace pasar por ellos una corriente eléctrica de 2 Amperios durante 10 minutos. Se obtienen de esta forma, tras un proceso de filtración (Figura 3-3), los lodos que se emplearán posteriormente para generar los coagulantes para el tratamiento de las aguas.

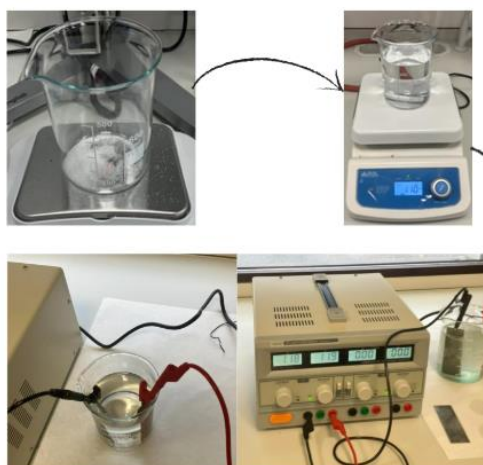


Figura 3-2 Proceso de electrocoagulación con Aluminio. (Elaboración Propia con Canva)

3.2.3 Materiales y reactivos

Para este proceso se han empleado los siguientes materiales:

- NaCl (Labkem)
- Agua destilada
- Electrodos de aluminio (80 x 25 x 1mm)
- Fuente de alimentación (Velleman)
- Vaso de precipitados
- Embudo
- Papel de filtro

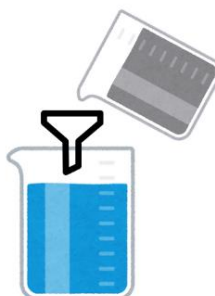


Figura 3-3 Filtración. (Elaboración Propia con Canva)

3.3 Determinación de Al en agua

3.3.1 Fundamento

Se busca estudiar la cantidad de aluminio presente en el agua (Figura 3-4) sometida a un proceso de electrocoagulación. Se utiliza una variación del método del aluminón, por el que los iones aluminio presentes reaccionan con el reactivo aluminón (sal amónica del ácido aurintricarboxílico) formando un compuesto coloreado que se relaciona de forma directa con la concentración de aluminio presente.

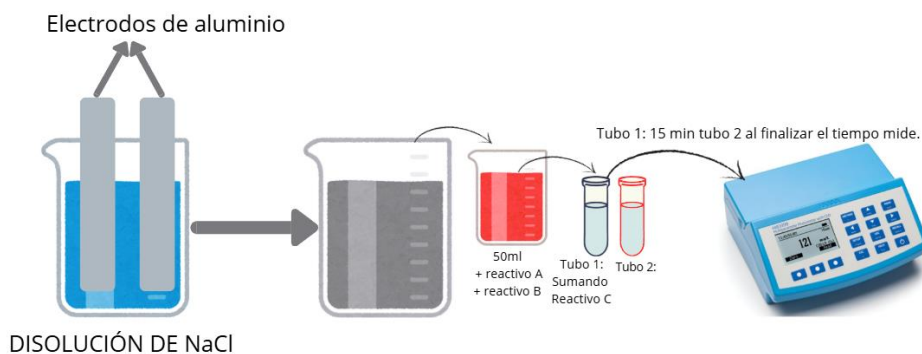


Figura 3-4 Proceso de determinación de aluminio. (Elaboración Propia con Canva)

3.3.2 Procedimiento

El análisis se realizó mediante un fotómetro multiparamétrico para aguas residuales de la empresa Hanna (Figura 3-5).



Figura 3-5 Fotómetro Multiparamétrico. (Tomada de Hanna instruments)

En este equipo se encuentra la posibilidad de realizar el análisis de diferentes elementos presentes en las aguas objeto de estudio. En el caso del aluminio, la muestra retirada se mezcla con los reactivos clasificados como A y B (Figura 3-6). Se dividen las muestras en dos cubetas (Figura 3-7) con una cantidad de 10 ml de muestras. La primera de ellas se mezcla con el reactivo C y se introduce en el instrumento de medición donde se deja durante 15 minutos ajustándose al análisis de aluminio. Transcurrido dicho tiempo se introduce la segunda muestra retirando previamente la primera y se realiza la lectura.



Figura 3-6 Reactivos aluminio. (Elaboración Propia)

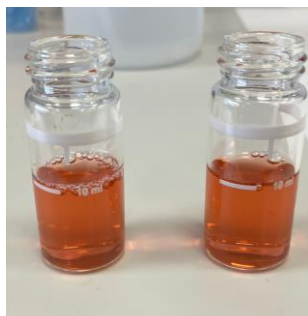


Figura 3-7 Cubetas con Aluminio listo para medir. (Elaboración Propia)

3.3.3 Materiales y reactivos

Para la determinación mencionada previamente se han empleado:

- Fotómetro multiparamétrico de la empresa Hanna para la determinación del aluminio.
- Reactivos A, B y C para la reacción con el aluminio.
- Disolución de NaCl 10 mg/L tratada con electrocoagulación con electrodos de aluminio.

3.4 Preparación de coagulantes

3.4.1 Fundamento

Para poder emplear los lodos generados como coagulantes se mezclan con HCl y H₂SO₄ obteniendo así AlCl₃ y Al₂(SO₄)₃ que posteriormente se emplearán para el tratamiento de coagulación-floculación.

3.4.2 Procedimiento

Una vez obtenida el agua sometida a la electrocoagulación, se procede a añadir al medio los reactivos necesarios para formar el cloruro y sulfato de aluminio, que actuarán en este estudio como coagulantes recuperados. Para ello, en dos vasos de precipitados diferentes, añadimos HCl y H₂SO₄ de esta manera obtendremos AlCl₃ y Al₂(SO₄)₃ respectivamente (Figura 3-8). Se realizó el estudio con volúmenes crecientes de ácido clorhídrico y ácido sulfúrico hasta observar la ausencia de aluminio libre en disolución. Este hecho se comprobó experimentalmente por medio del fotómetro Hanna y se produjo tras la adición de 100 ml de los ácidos mencionados. La ausencia de aluminio en la disolución se comprobó mediante el análisis descrito en la sección 3.3.

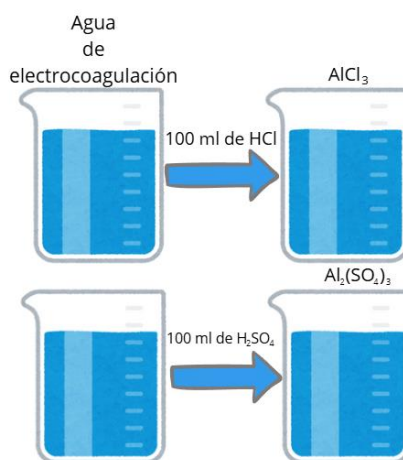


Figura 3-8 Preparación de coagulantes. (Elaboración Propia con Canva)

3.4.3 Materiales y reactivos

Para este proceso se han empleado los siguientes materiales:

- Agua sometida a electrocoagulación con electrodos de aluminio.
- 100 ml de HCl 1M
- 100 ml de H₂SO₄ 1M
- Fotómetro multiparamétrico de la empresa Hanna.

3.5 Procedimiento de coagulación-floculación del fosfato y su determinación

3.5.1 Fundamento

El objetivo del trabajo es el tratamiento de las aguas residuales, por ello se procede a la elaboración de fosfatos para comprobar la eficacia de eliminación de este en ella empleando los coagulantes que previamente se han preparado (Figura 3-9).

3.5.2 Procedimiento

Se preparan 100 ml de fosfatos con una concentración de 10 mg/L. Posteriormente se añaden 15 ml del Al₂(SO₄)₃ recuperado en la etapa anterior en un vaso de precipitados y 15 ml del AlCl₃ también recuperado en otro y se procede a realizar medidas de las cantidades que se consiguen eliminar. Las muestras se sometieron a un proceso de agitación de tiempos diversos comenzando por tiempos intermedios de 10 minutos a 120 rpm, 5 minutos a 80 rpm y 10 minutos en reposo, se continuó con tiempos altos del doble de los anteriores y se finalizó con tiempos bajos, iguales a la mitad de los intermedios. Se midieron según el procedimiento de fosfatos descrito en el manual de Hanna. Tras añadir estos coagulantes, remover y dejar reposar se introduce al fotómetro y se somete al análisis de fosfatos, por el que se añaden 10 gotas de reactivo A y 1 sobre de reactivo B a 10 ml de muestra de fosfatos.

3.5.3 Materiales y reactivos

Para este análisis se han empleado los siguientes materiales.

- Muestra de 100 ml de fosfatos de concentración 10 mg/l
- 15 ml de Al₂(SO₄)₃ recuperado
- 15 ml de AlCl₃ recuperado
- Reactivos A y B de fosfato (PO₄³⁻) HR de la empresa Hanna
- Cubetas y fotómetro de la empresa Hanna Instruments
- Agitador magnético

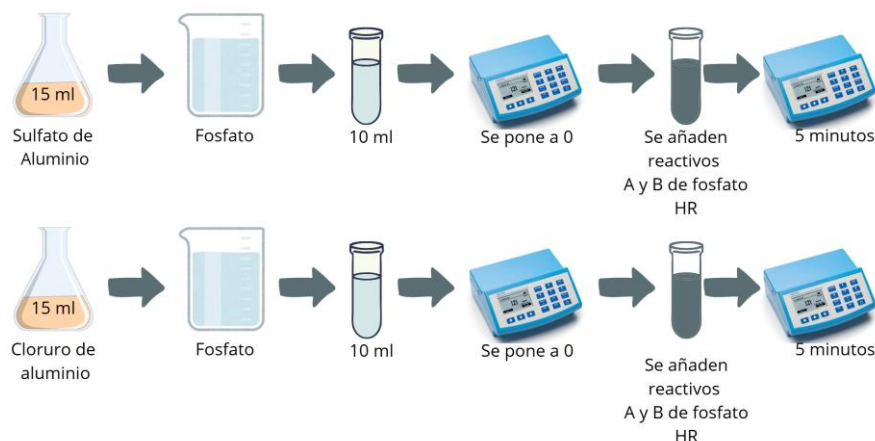


Figura 3-9 Proceso de análisis de fosfatos. (Elaboración Propia con Canva)

3.6 Procedimiento de coagulación-floculación del nitrato y su determinación

3.6.1 Fundamento

Continuando con el análisis de la eficacia de eliminación se preparó una disolución de nitrato de sodio (NaNO_3) de 10 mg/L, para comprobar la eficacia de eliminación del nitrato presente mediante el empleo de los coagulantes producidos (Figura 3-10).

3.6.2 Procedimiento

Una vez la disolución ha sido preparada se mide con el fotómetro multiparamétrico de Hanna la concentración de nitrato en mg/L y posteriormente se divide en dos vasos de precipitados en los que se añaden 100 ml de disolución. En uno de ellos se añaden 15 ml de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y en el otro 15 ml de AlCl_3 . Se agitan a 120 rpm durante 10 minutos y a 80 rpm durante 5 minutos seguida de una etapa de reposo de 10 minutos. Al finalizar el tiempo de reposo se introducen 10 ml de la disolución en una cubeta y se introduce en el fotómetro pulsando posteriormente cero. Cuando marca 0,0 mg/L se retira y se le añade el sobre de reactivo de nitrato y se mezcla agitando verticalmente de manera enérgica durante 10 segundos y, posteriormente de lado a lado durante unos 50 segundos para luego medir dejando un tiempo de espera de 4,5 minutos.

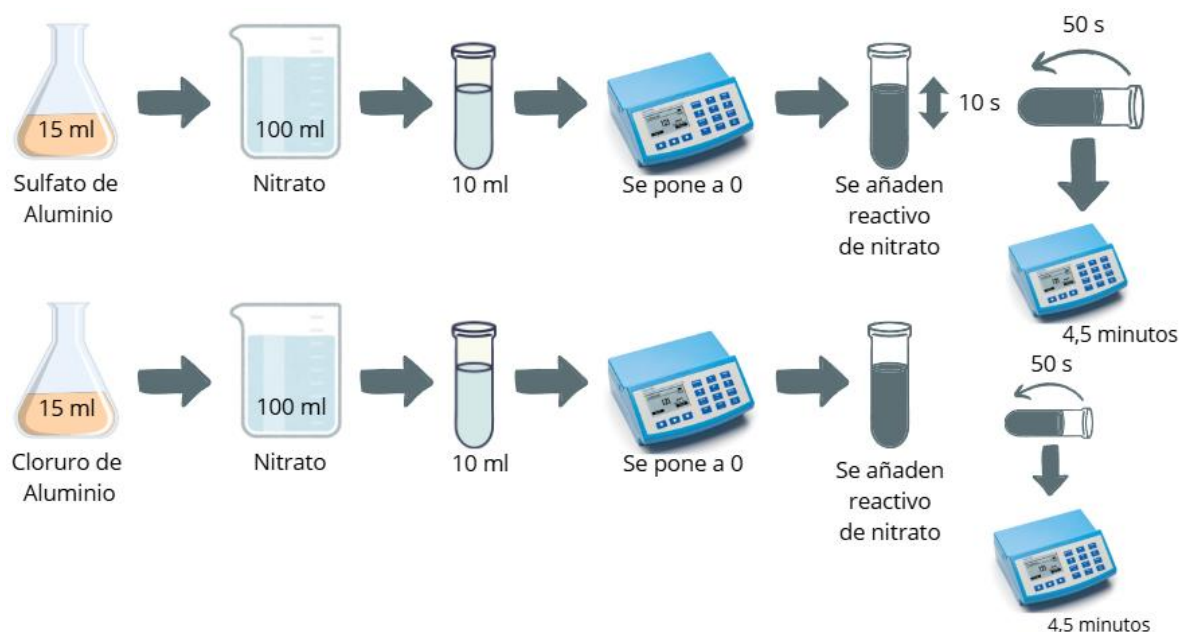


Figura 3-10 Proceso de análisis de Nitrato. (Elaboración Propia con Canva)

3.6.3 Materiales y reactivos

Los materiales empleados en este análisis han sido los siguientes:

- Disolución de nitrato de sodio de 10 mg/L
- 15 ml de AlCl_3 producido en laboratorio
- 15 ml de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ producido en laboratorio
- Reactivo Nitrato (Figura 3-11)
- Fotómetro multiparamétrico de la empresa Hanna Instruments
- Equipo de prueba de jarras



Figura 3-11 Reactivo de nitrato. (Elaboración Propia)

3.7 Procedimiento de coagulación-floculación del cobre y su determinación

3.7.1 Fundamento

El cobre es uno de los metales pesados más presentes en las aguas residuales industriales y urbanas, ya que se emplea en diferentes actividades como la metalurgia o la fabricación de componentes electrónicos. Este metal también se puede incorporar al agua debido a la corrosión de las paredes internas de las tuberías. Por ello se prepara una disolución de cobre de 10 mg/L para comprobar cómo se reduce al ser tratado (Figura 3-12).

3.7.2 Procedimiento

Una vez la disolución está preparada, se mide la concentración inicial con el fotómetro multiparamétrico de Hanna Instruments. Para ello, se retiran 10 ml que se introducen en una cubeta que, a continuación, se deposita en la máquina para hacer el cero. Tras ello, se retira la cubeta y se vierte en ella el reactivo de cobre HR, removiendo hasta su completa disolución. Tras ello se retiran dos muestras de 100 ml cada una de cobre y se le añade $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y AlCl_3 para posteriormente mezclar y medir. Se remueven a 120 rpm durante 10 minutos y a 80 rpm durante 5 minutos para, posteriormente, dejar que la mezcla repose durante 10 minutos. Posteriormente, se lleva a cabo de nuevo la comprobación para poder ver la reducción de la concentración.

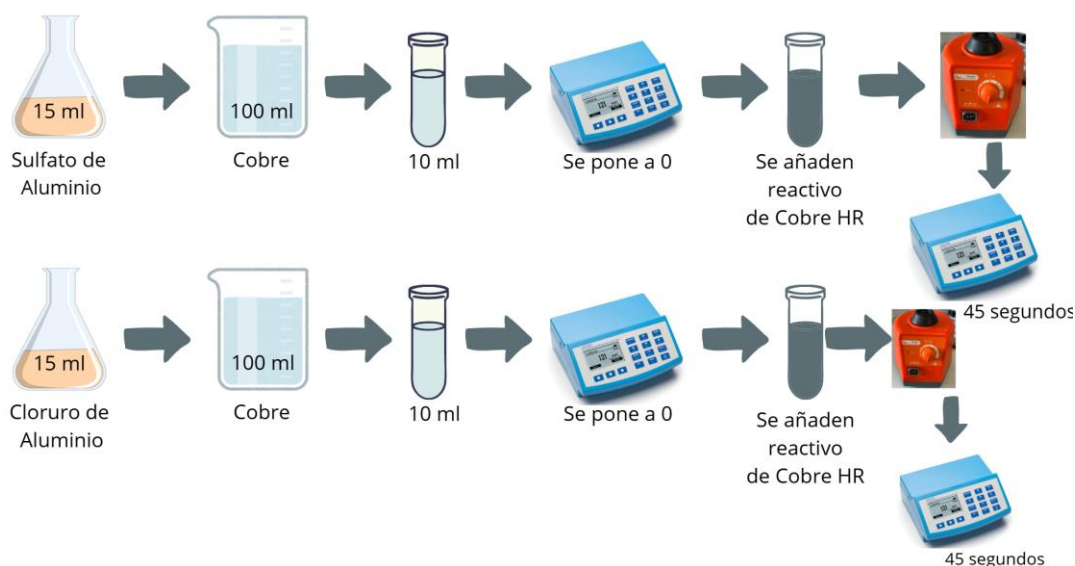


Figura 3-12 Análisis de Cobre. (Elaboración Propia con Canva)

3.7.3 Materiales y reactivos

Los materiales empleados en este proceso han sido los siguientes:

- Disolución de Cu de 10 mg/L

- 15 ml de AlCl_3 producido en laboratorio
- 15 ml de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ producido en laboratorio
- Fotómetro multiparamétrico de la empresa Hanna Instruments
- Balanza analítica
- Reactivo de cobre HR
- Equipo de prueba de jarras

3.8 Procedimiento empleando electrodos lijados

3.8.1 Fundamento

El uso prolongado de electrodos en los experimentos de electrocoagulación produce la aparición de una capa pasiva que reduce la transferencia de carga. Como resultado, el proceso requerirá del uso de voltajes más altos para mantener los niveles de eficacia. Con este objetivo, se procedió a lijar electrodos usados para comprobar la eficacia del tratamiento y comprobar que no se producen desgastes del material que lleven a una pérdida de la efectividad del electrodo.

3.8.2 Procedimiento

Se procedió al lijado de las dos caras de dos electrodos de aluminio empleando una lija para poder eliminar todas aquellas sustancias o residuos que, tras las continuas electrocoagulaciones pudieran quedarse en la superficie de los electrodos. Tras dejar de nuevo la superficie lisa, sin rugosidad ni residuos se procedió de nuevo con la electrocoagulación y se continuó con los procesos descritos anteriormente para el tratamiento.

3.8.3 Materiales y reactivos

Los materiales empleados en el proceso son los siguientes:

- Electrodos de aluminio lijados
- Disolución de NaCl al 10% en peso
- Fuente de alimentación
- HCl 1 M
- H_2SO_4 1 M
- Disoluciones de fosfatos, nitratos y cobre 10 mg/l
- Fotómetro multiparamétrico de Hanna Instruments
- Agitador magnético

3.9 Procedimiento empleando aluminio reciclado

3.9.1 Fundamento

La utilización de latas de aluminio reciclado se presenta como uno de los principios de la química verde, donde el material de la lata puede emplearse dada su gran concentración de aluminio, si bien debe tenerse en cuenta la presencia de lacas, polímeros y otras impurezas, así como la fina capa del material, que puede suponer una limitación en su tiempo de vida.

3.9.2 Procedimiento

Se empleó una lata de bebida como ánodo para la nueva electrocoagulación. Esta lata no contiene únicamente aluminio, por ello, para poder eliminar la capa de plástico interna, así como los residuos derivados del grabado externo se procedió a su lijado por ambas caras. Tras ello se realizó de nuevo la electrocoagulación y se continuó con el proceso realizado previamente de análisis de cantidades y tratamiento para comprobar la eficacia de eliminación.

3.9.3 Materiales y reactivos

Los materiales empleados en el proceso son los siguientes:

- Trozos de lata de bebida lijados
- Disolución de NaCl al 10% en peso
- Fuente de alimentación
- HCl 1 M
- H₂SO₄ 1 M
- Fosfatos
- Nitratos
- Cobre
- Fotómetro multiparamétrico de Hanna Instruments
- Reactivos de cada compuesto
- Agitador magnético

3.10 Estudio de las cinéticas de reacción

3.10.1 Fundamento

El estudio cinético permite analizar la evolución temporal de la concentración de los contaminantes durante el proceso, permitiendo obtener información sobre la velocidad de reacción y el mecanismo que estamos empleando, lo cual nos permite ver el orden de reacción que mejor describe el proceso, calcular la constante cinética, evaluar la eficiencia del tratamiento en función del tiempo y facilitar un posible diseño posterior a nivel industrial.

3.10.2 Procedimiento

En primer lugar, se realizaron de nuevo las electrocoagulaciones y de nuevo se le aplicaron los tratamientos durante un tiempo de 20 minutos retirando y analizando muestras en los tiempos: 0, 3, 7, 11, 15 y 20. Posteriormente, estos datos se trataron en una hoja Excel indicando el tiempo, la concentración (Ct), el logaritmo de la concentración (Ln(Ct)) y la inversa de la concentración (1/Ct). Con ello se obtuvieron las gráficas de las cinéticas de primer y segundo orden, empleando para primer orden el logaritmo en relación con el tiempo y, para el segundo orden, la inversa del logaritmo con respecto al tiempo.

Para este proceso se emplearon diferentes ecuaciones para los diferentes modelos cinéticos. En el caso del primer orden, la ecuación (Ecuación 1) es la siguiente:

$$\ln(Ct) = \ln(Co) - k_1 t \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- Ct: concentración con el paso del tiempo.
- Co: concentración inicial.
- k₁: constante cinética.

En el caso del segundo orden se empleó la siguiente ecuación (Ecuación 2):

$$\frac{1}{Ct} = \frac{1}{Co} + k_2 t \quad \text{Ecuación 2}$$

En la ecuación se incluyen los mismos datos que en el caso anterior siendo la k_2 la constante cinética del segundo orden.

Con ello se obtiene el valor de la constante cinética (k) con la que analizar la velocidad de la eliminación. Con valores elevados de k , la eliminación es rápida y con valores de k bajos, la eliminación es lenta.

Posteriormente, para comprobar el ajuste se extrajo también el valor de R^2 , que permite determinar la bondad del ajuste en función de su proximidad a la unidad.

3.10.3 Materiales y reactivos

Los materiales empleados han sido los siguientes:

- Aguas sintéticas elaboradas en el laboratorio
- $AlCl_3$ y $Al_2(SO_4)_3$
- Agitador magnético
- Fotómetro multiparamétrico de Hanna Instruments
- Hojas de cálculo

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis previo de las aguas

El análisis inicial de las aguas es un proceso fundamental para poder analizar posteriormente la eficacia del proceso de tratamiento a emplear. En el caso del presente trabajo, se preparan disoluciones de fosfatos, nitrato de sodio y cobre a 10 mg/L.

Los datos que se adjuntarán en las tablas posteriores muestran los porcentajes de eliminación con respecto a la concentración inicial que en cada momento corresponda.

4.2 Fosfatos

4.2.1 Análisis de la eliminación de fosfatos con coagulantes producidos en laboratorio

A continuación, se muestran los resultados del tratamiento de los coagulantes sintetizados en el laboratorio con la disolución 10 mg/l de fosfatos, usando un protocolo de agitación de 10 minutos a 120 rpm, 5 minutos a 80 rpm y 10 minutos, obteniéndose los siguientes datos (Tabla 4-1):

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Fosfatos	6,78 mg/L	-
Fosfatos + AlCl_3	2,39 mg/L	64,74%
Fosfatos + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	2,51 mg/L	62,97%

Tabla 4-1 Fosfatos con tiempos de 10-5-10. (Elaboración Propia)

Como se puede ver en los resultados, el porcentaje de eliminación ronda entre el 62% y el 65%. A continuación, se procedió a reducir los tiempos de tratamiento a la mitad, con el objetivo de comprobar la influencia del tiempo de tratamiento en la coagulación-floculación (Tabla 4-2).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Fosfatos	6,78 mg/L	-
Fosfatos + AlCl_3	5,66 mg/L	16,52%
Fosfatos + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	4,50 mg/L	33,63%

Tabla 4-2 Fosfatos con tiempos de 5-2,5-5. (Elaboración Propia)

Como se puede observar en la Tabla 4-2, al reducir a la mitad el tiempo de tratamiento, la cantidad de fosfatos se reduce en menor medida, con porcentajes de eliminación que oscilan entre el 16% y el 30% de eliminación. Además, se muestra el doble de eliminación con el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ que con el AlCl_3 lo que podría demostrar su mayor eficacia de eliminación.

Para finalizar la evaluación de la influencia del tiempo de tratamiento, se procedió a tratar las muestras con el doble del tiempo inicial (esquema 20-10-20) (Tabla 4-3).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Fosfatos	2,2 mg/L	-
Fosfatos + AlCl_3	6,64 mg/L	-200%
Fosfatos + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	4,9 mg/L	- 122,73%

Tabla 4-3 Fosfatos con tiempos de 20-10-20. (Elaboración Propia)

En este caso, podemos ver que la cantidad de fosfatos presentes en lugar de disminuir aumenta. Esto puede deberse a diversos motivos. Uno de los más probables es que el tiempo de agitación excesivo puede romper los flóculos y producir que se vuelvan a suspender las partículas, pudiendo incluso producir la ruptura de compuestos, produciendo un aumento de concentración más elevado que el inicial. Por eso es necesario optimizar el tiempo de agitación.

Además, se añadieron 15 ml de AlCl_3 y la misma cantidad de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para comprobar una mayor eficacia de eliminación. Por ello, se realizaron de nuevo los análisis empleando ahora filtración tras la electrocoagulación y haciendo las muestras una a una empleando como elemento para la mezcla el agitador magnético.

Se obtuvieron, de esta manera, los resultados que se pueden ver en las tablas adjuntas a continuación (Tabla 4-4).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Fosfatos	2,82 mg/L	-
Fosfatos + AlCl_3	1,96 mg/L	30,50%
Fosfatos + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	1,78 mg/L	36,90%

Tabla 4-4 Fosfatos con tiempos de 10-5-10. (Elaboración Propia)

Como se puede ver, los porcentajes de eliminación se aproximan y se encuentran en torno al 30% en el caso del cloruro de aluminio y en torno al 37% en el caso del sulfato de aluminio.

Por ello, se procede como anteriormente aumentando los tiempos al doble de los tiempos intermedios empleados inicialmente y reduciéndolos a la mitad para comparar los resultados y ver cuál de ellos es mejor y cómo interfiere el tiempo en los resultados.

A continuación, se puede ver la reducción con el doble de tiempo (Tabla 4-5).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Fosfatos	1,96 mg/L	-
Fosfatos + AlCl_3	1,79 mg/L	8,70%
Fosfatos + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	1,83 mg/L	6,63%

Tabla 4-5 Fosfatos con tiempos de 20-10-20. (Elaboración Propia)

Como se puede ver en este caso, el porcentaje de eliminación es mucho menor. En ambos casos, el porcentaje de eliminación ronda en torno al 7%. Por ello ahora continuamos con la mitad de tiempo y al finalizar podemos analizar, para el caso de los fosfatos, cuál es el mejor de los tiempos (Tabla 4-6).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Fosfatos	1,61 mg/L	-
Fosfatos + AlCl ₃	1,42 mg/L	11,80%
Fosfatos + Al ₂ (SO ₄) ₃	1,47 mg/L	8,70%

Tabla 4-6 Fosfatos con tiempos de 5-2,5-5. (Elaboración Propia)

En este caso, el porcentaje de eliminación se encuentra entre 8% y 11%. Por lo que se puede ver en las tablas, para el caso de los fosfatos, el mejor método es, añadiendo 15 ml de AlCl₃ y 15 ml de Al₂(SO₄)₃ dejando un tiempo de 10 minutos a 120 rpm, 5 minutos a 80 rpm y 10 minutos de reposo ya que es el caso en el que más porcentaje de eliminación se puede apreciar.

4.3 Nitratos

4.3.1 Análisis de la eliminación de nitratos con coagulantes producidos en laboratorio

A continuación, se muestran los resultados del tratamiento de la disolución de nitratos con el protocolo de tratamiento 10-5-10. En el primer tratamiento realizado se añadieron 5 ml de cloruro y sulfato obteniéndose los resultados que se muestran a continuación (Tabla 4-7).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Nitratos	2,90 mg/L	-
Nitratos + AlCl ₃	0 mg/L	100%
Nitratos + Al ₂ (SO ₄) ₃	1,40 mg/L	51,72%

Tabla 4-7 Nitratos con tiempos de 10-5-10. (Elaboración Propia)

Como se puede ver en la tabla anterior, en el caso del cloruro se elimina por completo la concentración de nitratos presente. En el caso del sulfato, consigue eliminar un 51% de los nitratos presentes.

Por ello se procede a comprobar el doble y la mitad de los tiempos. A continuación, se muestran los resultados para la mitad de tiempo (Tabla 4-8).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Nitratos	2,90 mg/L	-
Nitratos + AlCl ₃	0,70 mg/L	75,86%
Nitratos + Al ₂ (SO ₄) ₃	3,90 mg/L	-34,48%

Tabla 4-8 Nitratos con tiempos de 5-2,5-5. (Elaboración Propia)

Ya en este caso, al igual que en el caso de los fosfatos, se puede ver que, a pesar de que el cloruro elimina hasta un 75% de los nitratos, con el sulfato, comienza a aumentar la concentración en lugar de reducirse.

Por ello se continúa con el doble de tiempo para mostrar si este tiempo corto puede influir en el resultado (Tabla 4-9).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Nitratos	1,90 mg/L	-
Nitratos + AlCl ₃	1,34 mg/L	29,47%
Nitratos + Al ₂ (SO ₄) ₃	2,82 mg/L	-48,42%

Tabla 4-9 Nitratos con tiempos de 20-10-20. (Elaboración Propia)

En este caso se sigue comprobando que, el cloruro sigue eliminando, en este caso, un 32% y en el caso del sulfato vuelve a subir la concentración un 41,7%. Debido a esto, como se hizo en el caso de los fosfatos, se añaden 15 ml de cloruro y 15 ml de sulfato y se comprueban de nuevo todos los tiempos.

A continuación, se muestran los resultados intermedios como en el anterior caso (Tabla 4-10).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Nitratos	1,90 mg/L	-
Nitratos + AlCl ₃	1,10 mg/L	42,11%
Nitratos + Al ₂ (SO ₄) ₃	1,50 mg/L	21%

Tabla 4-10 Nitratos con tiempos de 10-5-10. (Elaboración Propia)

Como se puede apreciar, el porcentaje de eliminación se encuentra, en el caso del cloruro en 42% y en el caso del sulfato en 21,1%. Se puede ver que ahora parece que las concentraciones bajan y que, aparentemente, no hay interferencias tras haber realizado el filtrado y cambiado las cantidades de cloruro y sulfato.

A continuación, se muestran los resultados cuando se deja la mitad de tiempo para analizar, en el caso de los nitratos, cuál es el mejor tiempo de operación (Tabla 4-11).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Nitratos	1,80 mg/L	-
Nitratos + AlCl ₃	0,60 mg/L	66,7%
Nitratos + Al ₂ (SO ₄) ₃	0,00 mg/L	100%

Tabla 4-11 Nitratos con tiempos de 5-2,5-5. (Elaboración Propia)

En este caso, al añadir el cloruro se consigue un porcentaje de eliminación del 66,7% y en el caso del sulfato, se elimina el 100% de los nitratos. Se continúa con el doble de tiempo (Tabla 4-12).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Nitratos	1,90 mg/L	-
Nitratos + AlCl ₃	0,90 mg/L	52,6%
Nitratos + Al ₂ (SO ₄) ₃	1,40 mg/L	26,3%

Tabla 4-12 Nitratos con tiempos de 20-10-20. (Elaboración Propia)

En este caso, se puede ver cómo el cloruro lleva a un porcentaje de eliminación del 52,6% y en el caso del sulfato, el porcentaje es del 26,3% por ello aparentemente, el cloruro es la mejor opción en este caso.

Tras haber visto los tres procesos, se puede ver que el mejor caso para los nitratos es dejando como tiempos 5 minutos a 120 rpm, 2,5 minutos a 80 rpm y 5 minutos en reposo. Posteriormente se analizará el cobre para poder decidir, en conjunto, cuál es el mejor de los procesos y tiempos analizados.

4.4 Cobre

4.4.1 Análisis de la eliminación de cobre con coagulantes producidos en laboratorio

Una vez realizada la disolución, se mide la concentración inicial y posteriormente, se añaden 5 ml de AlCl_3 y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y se procede a analizar el porcentaje de eliminación.

Se comienza, al igual que en los casos anteriores, con tiempos de 10 minutos a 120 rpm, 5 minutos a 80 rpm y 10 minutos de reposo obteniendo los siguientes resultados (Tabla 4-13).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Cobre	7,06 mg/L	-
Cobre + AlCl_3	4,91 mg/L	30,45%
Cobre + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	4,78 mg/L	32,29%

Tabla 4-13 Cobre con tiempos de 10-5-10. (Elaboración Propia)

En ambos casos, el porcentaje de eliminación de cobre se encuentra en torno al 30% por ello se continúa con la mitad de tiempo obteniendo los siguientes resultados (Tabla 4-14).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Cobre	7,06 mg/L	-
Cobre + AlCl_3	4,88 mg/L	30,87%
Cobre + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	4,98 mg/L	29,46%

Tabla 4-14 Cobre con tiempos de 5-2,5-5. (Elaboración Propia)

Como se puede ver, los porcentajes de eliminación no muestran diferencias significativas con respecto a los tiempos anteriores ya que, el porcentaje de eliminación en ambos casos permanece en torno al 30%.

Por ello, se procede a analizar el doble de tiempo para comprobar si puede dar mejores resultados (Tabla 4-15).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Cobre	9,76 mg/L	-
Cobre + AlCl_3	9,68 mg/L	0,81%
Cobre + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	12,40 mg/L	-27,04%

Tabla 4-15 Cobre con tiempos de 20-10-20. (Elaboración Propia)

En el caso del cobre, se puede ver en este último caso que, al igual que en los casos anteriores, las posibles interferencias existentes por falta de filtración pueden haber dado lugar al aumento de concentración.

Por ello, se filtra el agua de electrocoagulación y posteriormente se añaden de nuevo 15 ml de cloruro y sulfato de la misma manera que para los fosfatos y nitratos.

A continuación, se muestran los resultados de los tiempos intermedios (Tabla 4-16).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Cobre	9,16 mg/L	-
Cobre + AlCl ₃	8,76 mg/L	4,36%
Cobre + Al ₂ (SO ₄) ₃	2,1 mg/L	77,07%

Tabla 4-16 Cobre con tiempos de 10-5-10. (Elaboración Propia)

En este caso, ambas concentraciones se reducen, mostrando una mayor eficacia el sulfato de aluminio que reduce un 77,1% de la concentración inicial frente al 4,4% que consigue eliminar el cloruro de aluminio. A continuación, se continua con la mitad de tiempo (Tabla 4-17).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Cobre	14,28 mg/L	-
Cobre + AlCl ₃	9,16 mg/L	35,85%
Cobre + Al ₂ (SO ₄) ₃	7,22 mg/L	49,44%

Tabla 4-17 Cobre con tiempos de 5-2,5-5. (Elaboración Propia)

En este caso, el cloruro consigue eliminar un 35%, mientras que, el sulfato consigue un 49,4% de eliminación. Para comprobar si este es el mejor tiempo, se duplica el tiempo inicial al igual que en el tratamiento del resto de aguas (Tabla 4-18).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Cobre	9,16 mg/L	-
Cobre + AlCl ₃	8,66 mg/L	5,46%
Cobre + Al ₂ (SO ₄) ₃	0,80 mg/L	91,27%

Tabla 4-18 Cobre con tiempos de 20-10-20. (Elaboración Propia)

Este es un caso decisivo, ya que se aprecia que, en el caso del sulfato, consigue eliminarse el 91% de la concentración inicial de cobre por lo que, para este caso podría considerarse el tiempo con el que se consigue un tratamiento más eficaz.

4.5 Comparativa con electrodos lijados

Los casos anteriores se llevaron a cabo empleando electrodos de aluminio sin lijar. Tras realizar las sucesivas electrocoagulaciones durante la fase experimental, se observaban sustancias en la superficie de los electrodos.

Se considera que estas sustancias pudieron dar lugar a resultados adversos y, por ello, resulta necesario realizar de nuevo una electrocoagulación con los electrodos lijados para poder realizar una comparativa en comparación con los mismos sin lijar.

Se realizó entonces el mismo tratamiento que anteriormente con unos tiempos de 10 minutos a 120 rpm, 5 minutos a 80 rpm y 10 minutos en reposo, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación (Tabla 4-19).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Fosfatos	6,2 mg/L	-
Fosfatos + AlCl_3	4,1 mg/L	33,87%
Fosfatos + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	1,17 mg/L	81,13%
Nitratos	7,64 mg/L	-
Nitratos + AlCl_3	1,88 mg/L	75,39%
Nitratos + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	4,56 mg/L	40,31%
Cobre	7,20 mg/L	-
Cobre + AlCl_3	0,09 mg/L	98,75%
Cobre + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	1,25 mg/L	82,64%

Tabla 4-19 Análisis de eliminación con electrodos lijados. (Elaboración Propia)

Como se puede apreciar en los datos obtenidos en esta fase del trabajo, con electrodos sin lijar, hay en la mayor parte de los casos un mayor porcentaje de eliminación. Esta mejora se considera debido a que, al no presentar residuos previos, estos no interfieren en el proceso de tratamiento y, por lo tanto, este tiene unos mejores resultados.

De esta manera se observa que los fosfatos se eliminan un 64% con el cloruro de aluminio y un 63% con el sulfato de aluminio. En el caso de los nitratos, estos se eliminan un 100% con el cloruro de aluminio y un 51,70% con el sulfato de aluminio.

Finalmente, en el caso del cobre, este se elimina un 30,50% con el cloruro y un 32,30% con el sulfato de aluminio, siendo este el que menos diferencia muestra siendo eliminado en porcentajes similares a los conseguidos con los electrodos sin lijar.

4.6 Comparativa con aluminio reciclado

Como se ha visto en diferentes partes del trabajo, otro de los grandes retos que se plantean con el presente proyecto es conseguir analizar el tratamiento de las aguas de una forma respetuosa con el medio ambiente. Para ello, se impulsa la ya mencionada economía circular, no solo en la reutilización de los lodos sino en todo lo que se pueda incluir en el proceso de tratamiento. Una buena manera de hacerlo es con el reciclaje.

Por ello, una buena forma de intentar mejorar el rendimiento y reducir la cantidad de residuos es emplear una lata considerada, *a priori*, un residuo para realizar un nuevo tratamiento en lugar de desecharla directamente.

Para ello, en primer lugar, se procede a lijar la lata para eliminar el texto y dibujos impresos en la cara externa y el plástico existente en la cara interna, de manera que estos generen la menor cantidad de interferencias posibles en el proceso.

Una vez realizado se procede de nuevo con la electrocoagulación empleando, en este caso, la lata como electrodo, obteniendo, tras el tratamiento con tiempos intermedios, los siguientes resultados (Tabla 4-20).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Fosfatos	15,3 mg/L	-
Fosfatos + AlCl ₃	12,9 mg/L	15,68%
Fosfatos + Al ₂ (SO ₄) ₃	14,3 mg/L	6,53%
Nitratos	8 mg/L	-
Nitratos + AlCl ₃	7,92 mg/L	1%
Nitratos + Al ₂ (SO ₄) ₃	3,78 mg/L	52,75%
Cobre	8,38 mg/L	-
Cobre + AlCl ₃	6,72 mg/L	19,81%
Cobre + Al ₂ (SO ₄) ₃	1,40 mg/L	83,29%

Tabla 4-20 Tratamiento con lata como electrodo. (Elaboración Propia)

4.7 Comparativa con AlCl₃ comercial

Una vez realizadas las comparaciones anteriores, es necesario realizar una comparativa con el cloruro comercial 1 M para poder ver su efectividad en el tratamiento. Tras realizar la mezcla y dejar un removido de 10 minutos a 120 rpm, 5 minutos a 80 rpm y 10 minutos en reposo.

Los resultados demuestran que no existe una diferencia significativa en el uso de un comercial, por ello nuestra técnica parece efectiva. Los datos obtenidos se muestran a continuación (Tabla 4-21).

Disolución	Concentración final	Eficacia de eliminación
Fosfatos	2,83 mg/L	-
Fosfatos + AlCl ₃	2,03 mg/L	28,26%
Fosfatos + Al ₂ (SO ₄) ₃	2,62 mg/L	7,42%
Nitratos	2,42 mg/L	-
Nitratos + AlCl ₃	1,80 mg/L	25,61%
Nitratos + Al ₂ (SO ₄) ₃	1,1 mg/L	54,54%
Cobre	8,70 mg/L	-
Cobre + AlCl ₃	7,06 mg/L	18,85%
Cobre + Al ₂ (SO ₄) ₃	2,01 mg/L	76,90%

Tabla 4-21 Tratamiento con Cloruro Comercial. (Elaboración Propia)

4.8 Cinéticas de eliminación de contaminantes

Tras haber realizado los experimentos expuestos previamente, se considera que el proceso de tratamiento más eficiente es el de 20 minutos a 120 rpm, 10 minutos a 80 rpm y 20 minutos de reposo. Debido a ello, se han realizado cinéticas de este proceso tomando muestras finalizados los primeros 20 minutos, a intervalos de 3, 7, 11, 15 y 20 minutos. Se debe tener en cuenta que los resultados difieren ya que las cinéticas se han realizado sobre los 20 minutos de 120 rpm.

4.8.1 Cinéticas de fosfatos con $AlCl_3$

t (min)	Ct (mg/L)	ln(Ct)	1/Ct
0	15,8	2,76	0,06
3	13,9	2,63	0,07
7	13,2	2,58	0,08
11	12,9	2,56	0,08
15	12,7	2,54	0,08
20	12,6	2,53	0,08

Tabla 4-22 Cinéticas de fosfato con cloruro. (Elaboración Propia)

Los datos proporcionados por la tabla (Tabla 4-22) permiten realizar los gráficos de primer y segundo orden. En los datos:

- t= tiempo
- Ct= concentración
- Co= concentración inicial

Con ellos, se representan los gráficos que a continuación se muestran.

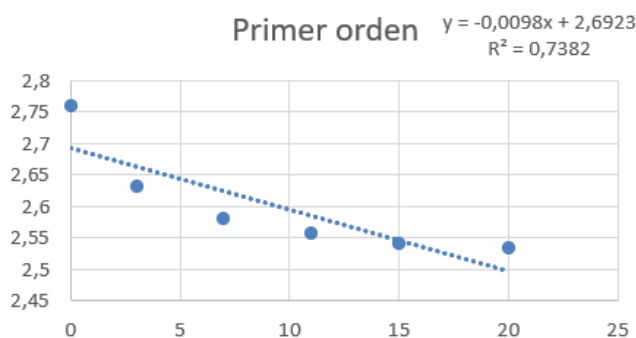


Figura 4-1 Gráfico de primer orden. (Elaboración Propia)



Figura 4-2 Gráfico de segundo orden. (Elaboración Propia)

En los dos modelos anteriores (Figura 4-1, Figura 4-2) se observa que la eliminación se ajusta de manera aceptable a ambos. Comparando los coeficientes de determinación (R^2) se ajusta mejor al modelo de segundo orden ya que este es más próximo a uno.

4.8.2 Cinéticas de fosfatos con $Al_2(SO_4)_3$

t (min)	Ct (mg/L)	ln(Ct)	1/Ct
0	14,70	2,69	0,07
3	12,60	2,53	0,08
7	11,80	2,47	0,08
11	11,70	2,46	0,09
15	11,40	2,43	0,09
20	11,30	2,42	0,09

Tabla 4-23 Cinéticas de Fosfatos con Sulfato de Aluminio. (Elaboración Propia)

Con estos datos (Tabla 4-23), al igual que para el cloruro de aluminio, se obtienen las siguientes gráficas.

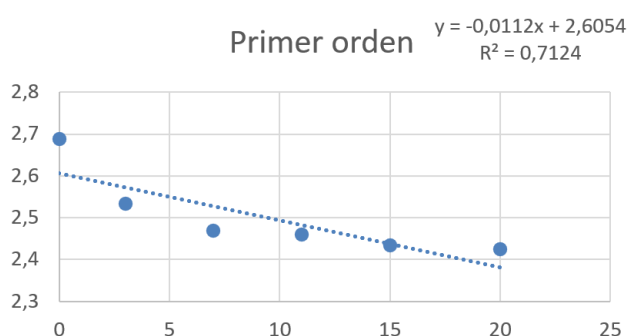


Figura 4-3 Gráfico de primer orden. (Elaboración Propia)



Figura 4-4 Gráfico de Segundo Orden. (Elaboración Propia)

Al igual que en el caso anterior, observando las gráficas y comparando el valor de R^2 (Figura 4-3, Figura 4-4) el modelo que más se ajusta es el modelo de segundo orden, donde R^2 es de 0,7393. Este valor siendo inferior a 0,90 no puede considerarse aun así un buen ajuste.

4.8.3 Cinéticas de Nitratos con $AlCl_3$

t (min)	Ct (mg/L)	ln(Ct)	1/Ct
0	111,20	4,71	0,01
3	89,60	4,50	0,01
7	88,80	4,49	0,01
11	87,20	4,47	0,01
15	86,30	4,46	0,01
20	85,60	4,45	0,01

Tabla 4-24 Cinéticas de Nitrato con Cloruro de Aluminio. (Elaboración Propia)

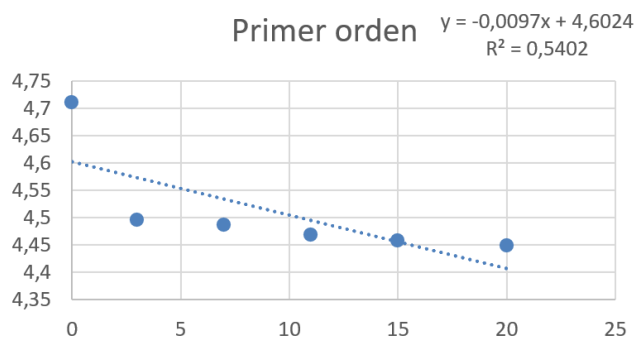


Figura 4-5 Gráfico de Primer Orden. (Elaboración Propia)

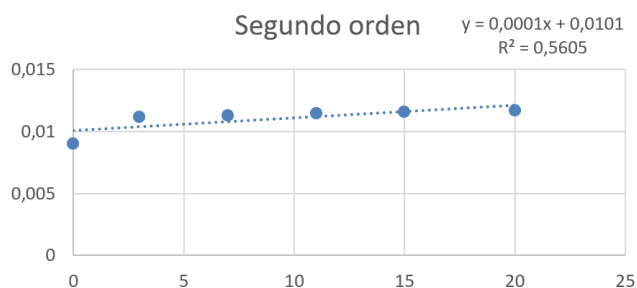


Figura 4-6 Gráfico de Segundo Orden. (Elaboración Propia)

En este caso (Tabla 4-24), los valores de R^2 (Figura 4-5, Figura 4-6), son muy próximos entre sí, además, el valor de estos está mucho más alejado de la unidad que en los casos anteriores, lo que demuestra que se ajusta menos a los modelos matemáticos. El R^2 de valor 0,5 nos indica que no es un buen ajuste.

4.8.4 Cinéticas de Nitratos con $Al_2(SO_4)_3$

t (min)	Ct (mg/L)	ln(Ct)	1/Ct
0	111,20	4,71	0,01
3	48,00	3,87	0,02
7	46,80	3,85	0,02
11	46,00	3,83	0,02
15	45,60	3,82	0,02
20	43,20	3,77	0,02

Tabla 4-25 Cinéticas de Nitratos con Sulfato de Aluminio. (Elaboración Propia)

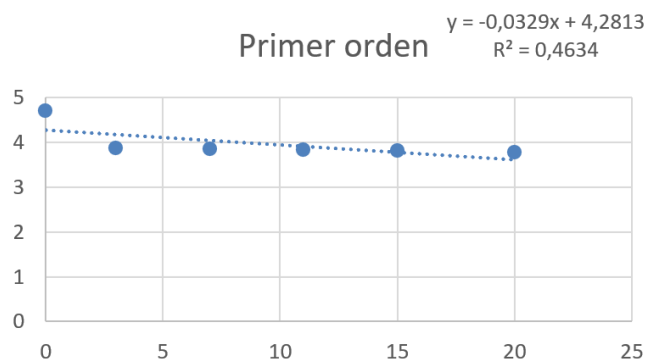


Figura 4-7 Gráfico de Primer Orden. (Elaboración Propia)

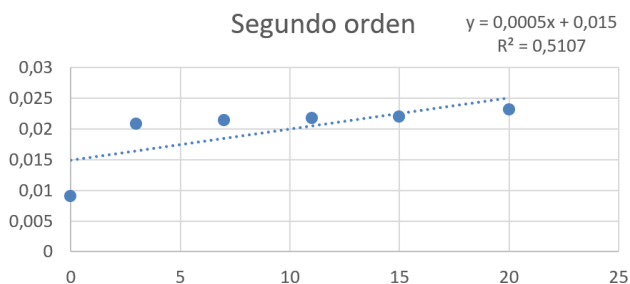


Figura 4-8 Gráfico de Segundo Orden. (Elaboración Propia)

Para los nitratos con sulfato de aluminio (Tabla 4-25) de nuevo el modelo al que más se ajusta es el de segundo orden (Figura 4-7, Figura 4-8), aun siendo un valor muy bajo lo que demuestra que no se ajusta de manera satisfactoria al modelo. En este caso, ambos se encuentran alejados de la unidad por ello se estima que existe mucha dispersión en los datos.

4.8.5 Cinéticas de Cobre con $AlCl_3$

t (min)	Ct (mg/L)	ln(Ct)	1/Ct
0	9,32	2,23	0,11
3	8,88	2,18	0,11
7	8,20	2,10	0,12
11	7,86	2,06	0,13
15	7,28	1,99	0,14
20	7,04	1,95	0,14

Tabla 4-26 Cinéticas de Cobre con Cloruro de Aluminio. (Elaboración Propia)

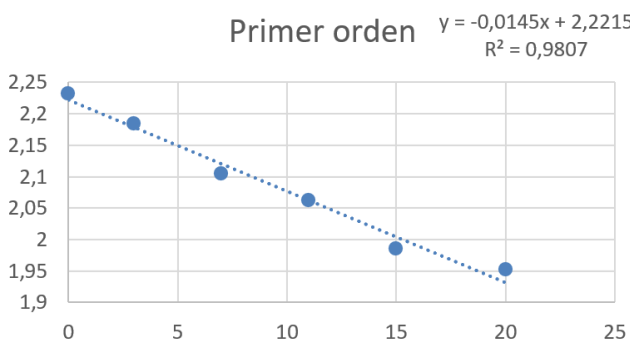


Figura 4-9 Gráfico de Primer Orden. (Elaboración Propia)



Figura 4-10 Gráfico de Segundo Orden. (Elaboración Propia)

En el caso del cobre con cloruro de aluminio (Tabla 4-26), ambos valores de R^2 son muy próximos a la unidad (Figura 4-9, Figura 4-10), esto indica que la recta representa bien los valores, ajustándose estos a los modelos matemáticos, en especial, al segundo por su mayor proximidad a la unidad.

4.8.6 Cinéticas de Cobre con $Al_2(SO_4)_3$

t (min)	Ct (mg/L)	ln(Ct)	1/Ct
0	9,32	2,23	0,11
3	4,92	1,59	0,20
7	4,84	1,58	0,21
11	4,68	1,54	0,21
15	4,16	1,43	0,24
20	2,70	0,99	0,37

Tabla 4-27 Cinéticas de Cobre con Sulfato de Aluminio. (Elaboración Propia)

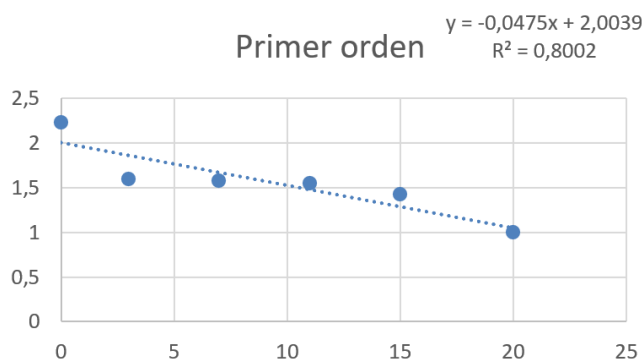


Figura 4-11 Gráfico de Primer Orden. (Elaboración Propia)

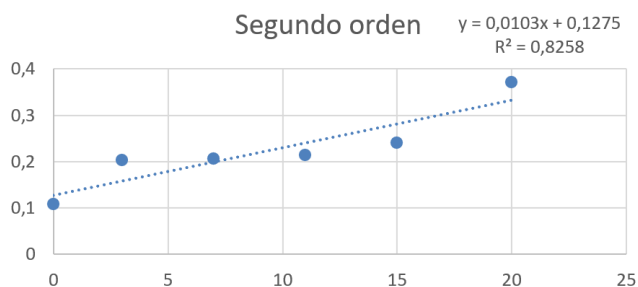


Figura 4-12 Gráfico de Segundo Orden. (Elaboración Propia)

El cobre con sulfato de aluminio (Tabla 4-27) muestra un ajuste moderado en ambos casos por su valor de en torno a 0,8 (Figura 4-11, Figura 4-12) y, de nuevo, el modelo que más se ajusta es el de segundo orden.

4.8.7 Parámetros de las cinéticas.

A continuación, se muestran todos los parámetros de las cinéticas anteriores. En la tabla adjunta (Tabla 4-28) se indican los valores de R^2 , K y Q_e .

Modelo Cinético	Parámetros Cinéticos	Fosfatos con cloruro	Fosfatos con sulfato	Nitratos con cloruro	Nitratos con sulfato	Cobre con cloruro	Cobre con sulfato
Primer orden	R^2	0,7382	0,7124	0,5402	0,4634	0,9807	0,8002
	K_1	0,0098	0,0112	0,0097	0,0329	0,0144	0,0474
	Q_e	14,7656	13,5366	99,7234	72,3344	9,2211	7,4179
Segundo orden	R^2	0,7617	0,7393	0,5605	0,5107	0,9863	0,8258
	K_2	0,0103	0,0121	0,0099	0,0333	0,0166	0,0807
	Q_e	1428,57	1111,11	10000	2000	555,56	97,0873

Tabla 4-28 Parámetros de las cinéticas

Aunque el modelo de segundo orden presenta mayores valores de R^2 , los valores obtenidos de Q_e son considerablemente superiores a los del modelo de primer orden. Esto sugiere una posible sobreestimación de este parámetro.

4.9 Comparativa de los resultados con otros trabajos

4.9.1 Comparativa en la eficiencia de eliminación de fosfatos

Comenzando con los fosfatos, en el caso del presente trabajo, el porcentaje de eliminación de estos oscila entre el 30% cuando empleamos cloruro de aluminio y el 36% cuando empleamos sulfato de aluminio. Del mismo modo, otros trabajos muestran una mayor eficiencia con el empleo de otras sustancias como el alumbre con el que se consiguen porcentajes de eliminación que rondan los 72,94% al emplearlos para el tratamiento de aguas industriales [51]. Otros estudios han demostrado una mayor eficiencia al tratar aguas sintéticas empleando ácido sulfúrico, alcanzando valores que rondan el 98,2% de porcentaje de eliminación [52].

A pesar de que estos resultados se muestran muy superiores a los obtenidos en el presente trabajo, los valores de remoción obtenidos en él, superan por ejemplo a los obtenidos al aplicar otros compuestos en el tratamiento de aguas municipales, donde el porcentaje de eliminación ronda el 21% [53].

4.9.2 Comparativa en la eficiencia de eliminación de nitratos

Este es el caso más efectivo del presente proyecto. Numerosos estudios demuestran que, a la hora de eliminar nitratos de forma aislada, el aluminio no es muy eficaz [54]. No obstante, como se ha observado en este trabajo, para unos tiempos de 10-5-10, se consiguió eliminar el 100% de los nitratos presentes en el agua. Por ello, en una última fase experimental, se aumentó la concentración de nitratos a 1 M obteniendo como resultado unos porcentajes de eliminación del 23% en el caso del cloruro de aluminio y del 61,2% en el caso del sulfato de aluminio. A pesar de ello, los resultados obtenidos siguen siendo mucho mejores a los de trabajos existentes donde el alumbre es capaz de eliminar un 74% pero empleando dosis de 150 mg/L [54].

4.9.3 Eliminación de cobre

En el caso del cobre diversos trabajos mencionan que el sulfato de aluminio resulta especialmente efectivo en el tratamiento, llevando a cabo una eliminación de metales pesados similares al cobre, como el mercurio o el vanadio, del orden del 50%. En este trabajo, con el sulfato de aluminio preparado, se consigue una eliminación que ronda el 32% unos valores inferiores a lo esperado en comparación con dichos trabajos. Esta diferencia, al igual que se mencionaba en los fosfatos podría deberse al pH.

4.9.4 Comparativa entre el sulfato de aluminio y el cloruro de aluminio

En el caso del presente trabajo, se aprecia que el sulfato de aluminio es más eficiente, con respecto al cloruro de aluminio, a la hora de llevar a cabo la eliminación de fosfatos presentes en las aguas. Esto se ve respaldado por trabajos que demuestran como, por ejemplo, el alumbre que es sulfato de alúmina

con potasio es un coagulante muy efectivo en la remoción de sólidos en suspensión y carga orgánica, a pesar de que en casos como el de aguas con poca turbidez, otros productos como el policloruro de aluminio resultan ser más efectivos [55].

Para poder aumentar el porcentaje de eliminación conseguido en el presente trabajo manteniendo el empleo del sulfato de aluminio y del cloruro de aluminio, de acuerdo con diversos trabajos, se deben tener en cuenta una serie de factores entre los cuales se puede destacar el rango de pH: para que la remoción se lleve a cabo de manera efectiva, el pH debe encontrarse en torno a 6,5-8 [56].

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

En el presente proyecto se ha analizado la caracterización y uso de los lodos obtenidos de la electrocoagulación con aluminio como agente floculante secundario en procesos de coagulación-floculación aplicados al tratamiento de aguas residuales. Esta concepción de un residuo como subproducto útil permite avanzar un paso más en lo que a economía circular se refiere, valorizando lo que a priori se podía considerar un desecho.

Los resultados experimentales obtenidos a lo largo del proyecto han permitido demostrar que la coagulación-floculación es una técnica eficiente en el tratamiento de aguas que puede dar mejores resultados que técnicas convencionales a pesar de que los valores arrojados en términos generales para fosfatos y cobre siguen las líneas de la literatura tradicional. Los contaminantes seleccionados en un inicio, el cobre, los fosfatos y los nitratos, se eligieron debido a su presencia como contaminantes mayoritarios en las aguas residuales y debido al enorme impacto para la salud y el medio ambiente que estos muestran.

Los diferentes experimentos llevados a cabo permitieron demostrar que la adición de coagulantes basados en aluminio favorece la formación de flóculos capaces de retener contaminantes. Analizando los diferentes contaminantes se han podido obtener las siguientes conclusiones.

- Los fosfatos y el cobre se eliminaron dentro de unos rangos esperables en comparación con otros trabajos de este ámbito. Su eficacia de eliminación podría haberse aumentado teniendo en cuenta el pH de las aguas empleadas durante los procesos de tratamiento.
- En el caso de los nitratos, los resultados han sido mejores de lo esperado. Los nitratos suelen ser poco propensos a ser eliminados con aluminio, no obstante, en el presente trabajo, los resultados experimentales han demostrado que es posible que el aluminio, en determinados compuestos y concentraciones resulte más eficaz de lo esperable a la hora de usar coagulantes y floculantes basados en aluminio.

De la misma manera, el análisis cinético llevado a cabo permite determinar la evolución temporal de la cantidad de contaminantes eliminados y evaluar el ajuste de datos experimentales a los diferentes modelos propuestos. La posibilidad de ajustarlo a modelos predecibles facilita un futuro diseño de reactores o plantas a escala industrial, lo que abre las puertas al uso de tecnologías de control automático para optimizar las dosis de estos subproductos en tiempo real.

Los resultados obtenidos en el presente proyecto demuestran que los lodos de electrocoagulación con aluminio presentan un gran potencial en lo que a procesos de coagulación-floculación se refiere. Su empleo no solo contribuye a la economía circular con la reducción de residuos, sino que también

favorece el desarrollo y estudio de tecnologías de tratamiento más sostenibles y económicas. El cloruro de aluminio ha mostrado un desempeño excelente en el caso del tratamiento de los residuos, en especial en el caso de los nitratos.

La valorización de los mencionados lodos permite reducir de manera directa uno de los principales problemas económicos de las depuradoras, donde la gestión de residuos, como ya se ha mencionado en partes anteriores del presente proyecto, representan entre el 30% y el 50% de los costes totales de operación. La reincorporación del aluminio al ciclo de tratamiento disminuye además la huella de carbono al evitar o reducir el consumo de reactivos, transformando la depuradora en una bio-refinería de recursos.

5.2 Líneas futuras

En vista de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se abren numerosas líneas de investigación que continúen con el desarrollo de nuevas y eficientes técnicas de tratamiento. El tratamiento llevado a cabo ha mostrado mejores resultados de lo que en un inicio se podía esperar. Para poder estudiar de manera eficaz su uso a nivel industrial se requeriría de análisis en condiciones y proporciones acordes a una planta de tratamiento. Por ello, y en mejora de los posibles efectos que han causado resultados no esperados, se plantean las siguientes líneas futuras:

- Estudio de optimización del control del pH: dados los resultados en el tratamiento de los fosfatos y cobre, inferiores a lo que se esperaba en un inicio, se podría evaluar el proceso ajustando el pH a rangos entre 6,5 y 8. Investigar cómo la variación del pH afecta a la solubilidad de los contaminantes permitiría comparar la eficiencia de remoción en diferentes casos.
- Escalado en el proceso: visto que los datos se ajustaron, por lo general, de manera satisfactoria a un modelo cinético de segundo orden, se podría llevar a cabo el análisis en reactores a escala, desarrollando sistemas de control automático que optimicen dosis de lodos en función de los modelos predictivos obtenidos.
- Caracterización avanzada de lodos: se podrían aplicar las técnicas de microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X, ya mencionadas, a los lodos generados, lo que permitiría comprender la morfología de las partículas y confirmar si la formación de fases cristalinas o estructuras porosas influye en la eficacia de eliminación, especialmente en los nitratos debido al buen resultado obtenido.
- Ampliación de los contaminantes objeto de estudio: evaluar la eficacia de los lodos con otros residuos como colorantes de la industria textil, aceites, grasas o compuestos orgánicos refractarios que no se degradan con tratamientos convencionales.
- Recuperación del coagulante: se podría investigar la viabilidad de extraer el aluminio de los lodos y comparar la pureza del coagulante con la de los recuperados con tecnologías de separación como las membranas de Donnan.
- Valorización en materiales de construcción: realizar ensayos mecánicos comprobando la viabilidad del uso de lodos como sustitutos parciales del cemento mediante el análisis de su resistencia a la compresión y estabilidad ambiental de los materiales resultantes.
- Uso de electrodos reciclados: la lata de bebida y su eficiente resultado, abren una nueva línea de investigación con respecto al uso de otros residuos de aluminio para profundizar en el modelo de economía circular y reducir los costes de generación de materia prima.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «ONU-Habitat - Comprender las dimensiones del problema del agua». Accedido: 15 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://onu-habitat.org/index.php/comprender-las-dimensiones-del-problema-del-agua>
- [2] V. M. García Nolazco, «Efectos de la contaminación generada por la actividad pesquera y acuícola sobre el ecosistema marino de la bahía de Samanco, Áncash entre el 2003 al 2019», Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Santa, Perú, 2023.
- [3] L. C. Aroucha, J. F. Lübbecke, P. Brandt, F. U. Schwarzkopf, y A. Biastoch, «River discharge impacts coastal southeastern tropical Atlantic sea surface temperature and circulation: a model-based analysis», *Ocean Sci.*, vol. 21, n.º 2, pp. 661-678, mar. 2025, doi: 10.5194/os-21-661-2025.
- [4] World Health Organization, «Agua para consumo humano». Accedido: 15 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- [5] S. Bhatia, Z. Othman, y A. L. Ahmad, «Proceso de coagulación-floculación para el tratamiento POME utilizando extracto de semillas de *Moringa oleifera*: Estudios de optimización», *Chem. Eng. J.*, vol. 133, n.º 1, pp. 205-212, sep. 2007, doi: 10.1016/j.cej.2007.01.034.
- [6] M. Y. A. Mollah, R. Schennach, J. R. Parga, y D. L. Cocke, «Electrocoagulation (EC) — science and applications», *J. Hazard. Mater.*, vol. 84, n.º 1, pp. 29-41, jun. 2001, doi: 10.1016/S0304-3894(01)00176-5.
- [7] J. Keeley, P. Jarvis, A. D. Smith, y S. J. Judd, «Coagulant recovery and reuse for drinking water treatment», *Water Res.*, vol. 88, pp. 502-509, ene. 2016, doi: 10.1016/j.watres.2015.10.038.
- [8] M. D. Nguyen, M. Thomas, A. Surapaneni, E. M. Moon, y N. A. Milne, «Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy», *Environ. Technol. Innov.*, vol. 28, p. 102651, nov. 2022, doi: 10.1016/j.eti.2022.102651.
- [9] A. M. Hernández Abadía, E. S. Olaya Escobar, H. F. Castro Silva, y D. R. Olaya Escobar, «Metodología para el desarrollo de capacidades tecnológicas y de innovación para la puesta en marcha de una planta de tratamiento de agua residual doméstica municipal. Caso Tibasosa, Boyacá», 2020.

- [10] European Commission, «Urban wastewater». [En línea]. Disponible en: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/urban-wastewater_en
- [11] M. Wu, Y. Hu, R. Liu, S. Lin, W. Sun, y H. Lu, «Electrocoagulation method for treatment and reuse of sulphide mineral processing wastewater: Characterization and kinetics», *Sci. Total Environ.*, vol. 696, p. 134063, dic. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134063.
- [12] D. F. C. Aragón y M. A. Garzón-Zúñiga, «TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES QUE CONTIENEN COLORANTES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE UN PROCESO COMBINADO DE OXIDACIÓN AVANZADA Y UN PROCESO BIOLÓGICO».
- [13] M. M. M. Campos, G. A. Espinosa, R. C. Martinez, y A. C. Villanueva, «DESARROLLO DE CARBON ACTIVADO A PARTIR DEL RESIDUO AGRICOLA DE LA MADERA DEL ÁRBOL DE GUAYABO PARA REMOCIÓN DE COLORANTES PRESENTES EN SOLUCIÓN».
- [14] Castillo García, A. S., «Diseño de un tratamiento de aguas residuales de lubricado mediante Bio-Absorción y Coagulación-Floculación.», Trabajo de titulación, Universidad de las Américas, Quito, Ecuador, 2015.
- [15] L. F. Ruiz, «CONTAMINACIÓN DE ORIGEN AGRARIO. EL PROBLEMA DE LOS NITRATOS».
- [16] Colorado State University Extension, «1620 – Fertilizantes de fosfato y la contaminación de aguas – PlantTalk Colorado». Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://planttalk.colostate.edu/planttalk-coloradotm-espaol/suelo-enmiendas-y-composta/1620-fertilizantes-de-fosfato-y-la-contaminacion-de-aguas/>
- [17] Ecologistas en Acción, «[Informe] La contaminación por nitratos y su impacto en el medio ambiente y el agua de consumo humano • Ecologistas en Acción», Ecologistas en Acción. Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/311484/informe-la-contaminacion-por-nitratos-y-su-impacto-en-el-medio-ambiente-y-el-agua-de-consumo-humano/>
- [18] Boletín Oficial del Estado (BOE), «BOE-A-2022-860 Real Decreto 47/2022, de 18 de enero, sobre protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias.» Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2022-860>
- [19] World Health Organization, *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. Génova: World Health Organization, 2017.
- [20] Herranz, M. y Clerigué, N., «Intoxicación en niños. Metahemoglobinemia», *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, vol. 26, Navarra, pp. 209-223, 2003.
- [21] S. E. Haque, «How Effective Are Existing Phosphorus Management Strategies in Mitigating Surface Water Quality Problems in the U.S.?», *Sustainability*, vol. 13, n.º 12, p. 6565, 2021.
- [22] U.S. Environmental Protection Agency, «The Effects: Dead Zones and Harmful Algal Blooms». Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/nutrientpollution/effects-dead-zones-and-harmful-algal-blooms>
- [23] K. Rajaniemi, S. Tuomikoski, y U. Lassi, «Electrocoagulation Sludge Valorization—A Review», *Resources*, vol. 10, n.º 12, p. 127, 2021, doi: 10.3390/resources10120127.

- [24] World Health Organization, «Chemical fact sheets: Copper». Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/publications/m/item/chemical-fact-sheets--copper>
- [25] ZeroWater Europe, «Cobre en el agua del grifo», ZeroWater Europe. Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.zerowaterfilter.com/es/blogs/centro-de-conocimientos-de-zerowater/cobre-en-el-agua-del-grifo>
- [26] Agency for toxic Substances and Disease, «Toxicological Profile for Copper», *US Dep. Healt Hum. Serv.*, 2004, [En línea]. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp132.pdf>
- [27] R. O. Adeeyo, J. N. Edokpayi, O. S. Bello, A. O. Adeeyo, y J. O. Odiyo, «Influence of Selective Conditions on Various Composite Sorbents for Enhanced Removal of Copper (II) Ions from Aqueous Environments», *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 16, n.º 23, p. 4596, dic. 2019, doi: 10.3390/ijerph16234596.
- [28] «Wastewater Treatment», HELCOM indicators. Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://indicators.helcom.fi/indicator/wastewater-treatment/>
- [29] «Evaluaciones del riesgo de elementos traza en alimentos consumidos por la población catalana», ELIKA Seguridad Alimentaria. Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://seguridadalimentaria.elika.eus/evaluaciones-riesgo-elementos-traza-alimentos-cataluna/>
- [30] Esfera del agua, «Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento | Esfera del Agua». Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.esferadelagua.es/agua-y-tecnologia/contaminacion-del-agua-por-nitratos-y-tecnicas-para-su-tratamiento>
- [31] J. Casalí *et al.*, «Erosión y calidad de aguas en cuencas agrarias experimentales de Navarra».
- [32] European Commission, «Economía Circular - Medio Ambiente - Comisión Europea». Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en
- [33] J. Keeley, P. Jarvis, y S. J. Judd, «Coagulant Recovery from Water Treatment Residuals: A Review of Applicable Technologies», *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 44, n.º 24, pp. 2675-2719, dic. 2014, doi: 10.1080/10643389.2013.829766.
- [34] M. K. Kunvarani y M. J. Pandya, «A Review of Techno-Economic Comparison of Chemical-Coagulation and Electro-Coagulation for Nitrate Removal», *Int. J. Innov. Res. Technol.*, vol. 1, n.º 8, pp. 118-123, 2014.
- [35] A. P. M. Hernández y L. J. S. Yepes, «EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE NITRATOS POR ELECTROCOAGULACIÓN», 2018.
- [36] T. K. C. Phu, P. L. Nguyen, y T. V. B. Phung, «Recent progress in highly effective electrocoagulation-coupled systems for advanced wastewater treatment», *iScience*, vol. 28, n.º 3, p. 111965, feb. 2025, doi: 10.1016/j.isci.2025.111965.
- [37] Q. Hu, L. He, R. Lan, C. Feng, y X. Pei, «Recent advances in phosphate removal from municipal wastewater by electrocoagulation process: A review», *Sep. Purif. Technol.*, vol. 308, p. 122944, mar. 2023, doi: 10.1016/j.seppur.2022.122944.

- [38] S. A. Bakry, M. E. Matta, A. M. Noureldin, y K. Zaher, «Performance evaluation of electrocoagulation process for removal of heavy metals from wastewater using aluminum electrodes under variable operating conditions», *Desalination Water Treat.*, vol. 318, p. 100396, abr. 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100396.
- [39] P. M. Miramontes, S. G. Pimentel, M. L. A. Couce, y E. F. Covelo, «APLICACIÓN DE LODO RESIDUAL EN DOS SUELOS FORESTALES DEGRADADOS. EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y DE LA TASA DE MINERALIZACIÓN DE NITRÓGENO».
- [40] Y. Yang, D. Tomlinson, S. Kennedy, y Y. Q. Zhao, «Dewatered alum sludge: a potential adsorbent for phosphorus removal», *Water Sci. Technol.*, vol. 54, n.º 5, pp. 207-213, sep. 2006, doi: 10.2166/wst.2006.564.
- [41] C. G. Sánchez y R. M. H. Penela, «¿Qué es la Microscopía Electrónica de Barrido?», oct. 2025, Accedido: 24 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://roble.intecca.uned.es/fez/view/intecca:VideoCMAV-68b975b062f2ba7cda003983>
- [42] European Commission, «Reutilización del Agua - Medio Ambiente - Comisión Europea». Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-reuse_en
- [43] Risk XXI, «ODS: 17 objetivos para transformar nuestro Mundo.», Risk XXI. Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.risk21.com/ods-17-objetivos-transformar-mundo/>
- [44] W. Brownlie, M.A. Sutton, K. V. Heal, D. S. Reay, y B. M. Spears, «The Our Phosphorus Future Report», 2022, doi: 10.13140/RG.2.2.17834.08645.
- [45] «Economía Circular: MAGNYFOS-Recuperación de fósforo en estaciones depuradoras de aguas residuales», CRUE. Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.crue.org/archivos-innovacion/economia-circular-magnyfos-recuperacion-de-fosforo-en-estaciones-depuradoras-de-aguas-residuales/>
- [46] «Primera planta de recuperación de fósforo en España | PDF | Sustancias químicas | Elementos químicos», Scribd. Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/420803415/Planta-Estruvita>
- [47] A. Gadea *et al.*, «Proyecto Life Enrich: Recuperación de nitrógeno y fósforo del agua residual e integración en la cadena de valor», *Tecnoaqua*, n.º 52, pp. 54-59, dic. 2021.
- [48] «Los grandes retos en circularidad del 2026 | España». Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.anthesisgroup.com/es/articulos/los-grandes-retos-en-circularidad-del-2026/>
- [49] Chemical Times, «2026 Chemical Industry Outlook: Navigating a Downcycle with Innovation and Resilience», Chemical Times. Accedido: 21 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://chemicaltimes.in/2026/01/31/2026-chemical-industry-outlook-navigating-a-downcycle-with-innovation-and-resilience/>
- [50] Hanna Instruments, «Manual de instrucciones». Rhode Island, EEUU.
- [51] N. Zaki *et al.*, «Coagulation-flocculation parameters for simultaneous removal of nitrates, nitrites, phosphates, and ammonium from wastewater: A mini review», *E3S Web Conf.*, vol. 527, p. 03015, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202452703015.
- [52] R. Bouyakhsass *et al.*, «Applicability of central composite design and response surface methodology for optimizing treatment of landfill leachate using coagulation-

flocculation», *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 197, pp. 669-684, sep. 2023, doi: 10.1016/j.cherd.2023.08.001.

[53] I. M. Ismail, A. S. Fawzy, N. M. Abdel-Monem, M. H. Mahmoud, y M. A. El-Halwany, «Combined coagulation flocculation pre treatment unit for municipal wastewater», *J. Adv. Res.*, vol. 3, n.º 4, pp. 331-336, oct. 2012, doi: 10.1016/j.jare.2011.10.004.

[54] A. A. Aghapour, S. Nemati, A. Mohammadi, H. Nourmoradi, y S. Karimzadeh, «Nitrate removal from water using alum and ferric chloride: A comparative study of alum and ferric chloride efficiency», *Environ. Health Eng. Manag.*, vol. 3, n.º 2, pp. 69-73, mar. 2016, doi: 10.15171/EHEM.2016.03.

[55] YW Putai Chemical, «What is the difference between high purity PAC and aluminum sulfate?», YW Putai Chemical. Accedido: 12 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ywputai.com/knowledge/what-is-the-difference-between-high-purity-pac-and-aluminum-sulfate->

[56] «How do different pH levels impact the coagulation performance of Al-based coagulants? - Consensus». Accedido: 25 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://consensus.app/search/how-do-different-ph-levels-impact-the-coagulation-/VQA7HP3SR2entqpp5Q2UIg/>

[57] M. Moran, «Agua y saneamiento», Desarrollo Sostenible. Accedido: 13 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, Y AMBIENTALES

El presente trabajo se fundamenta en la necesidad de desarrollar técnicas que contribuyan al cuidado y conservación del medio ambiente y de los ecosistemas acuáticos. Con él se busca conseguir la sostenibilidad en la investigación de tratamientos de aguas lo que contribuye a la economía circular. La caracterización de los lodos, así como su posterior uso, no es solamente una innovación, presenta importantes matices tanto en lo social como en lo económico y ambiental.

Desde el punto de vista social, los métodos que se han empleado para el tratamiento contribuyen de manera directa a la mejora de la salud pública y a la calidad de vida. La reutilización del aluminio presente en los lodos reduce la necesidad de tratar y gestionar grandes cantidades de residuos que afectan a comunidades próximas a plantas de tratamiento de aguas residuales. El empleo de estos residuos para posteriores tratamientos da lugar a una mayor concienciación de cuidado del medio ambiente en el sector industrial, haciendo que la responsabilidad social de las empresas gestoras de agua aumente.

En relación con la economía, la caracterización de lodos, así como su implementación, requiere de unos gastos iniciales de inversión, no obstante, sus beneficios a largo plazo tienen una gran repercusión reduciendo los costes de operación de las plantas de tratamiento. El uso de estos lodos como floculante secundario permite:

- Reducir los costes asociados al manejo y gestión final de residuos.
- Aumentar el ahorro al evitar o reducir la compra de reactivos químicos comerciales, empleando los lodos como subproductos útiles en el proceso de tratamiento.
- Mejorar la concepción de las industrias dedicadas al tratamiento de aguas, haciendo posible un modelo en que se otorguen incentivos fiscales y certificaciones de sostenibilidad a aquellas que implementen modelos que contribuyan a la economía circular y cuidado del medio ambiente.

Desde el punto de vista ambiental, la puesta en marcha del sistema planteado permite una mejora de sostenibilidad en el ciclo del agua, reduciendo las cantidades de contaminantes como nitratos y fosfatos y de metales pesados como el cobre, que son muy dañinos y se encuentran presentes en la mayor parte de las aguas residuales. La valorización de los lodos permite reducir la generación de subproductos dañinos y peligrosos y permite reducir la huella de carbono al cerrar el ciclo de vida de ese aluminio que inicialmente se desecharía como un residuo más. Esto contribuye a los esfuerzos existentes por combatir el cambio climático, lo cual está íntimamente relacionado con el objetivo 6 de la Agenda 2030 [57] sobre la garantía de agua y gestión sostenible de la misma. Al reducir la energía y recursos que se necesitan para la producción de nuevos coagulantes y productos de tratamiento de las aguas.

El presente trabajo podría relacionarse también con el objetivo 15 planteado por las Naciones Unidas en los objetivos de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible [57], que trata sobre el cuidado de los ecosistemas, contribuyendo de manera decisiva al cuidado y mejor tratamiento de los ecosistemas y de las especies que en ellos habitan, reduciendo la contaminación y el desarrollo de efectos adversos que puedan impedir la vida de dichas especies.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La investigación en lo referente al tratamiento de aguas residuales es fundamental en lo que al bienestar de la sociedad se refiere. Cualquier avance que se lleva a cabo en este campo implica reflexiones éticas y sociales en lo referente a sus posibles usos.

Uno de los factores a tener en cuenta en este sentido es la responsabilidad medioambiental enfocada a la protección y cuidado de los recursos hídricos. El agua, como ya se ha mencionado, es un recurso fundamental para la vida, su contaminación puede dar lugar a consecuencias negativas para los ecosistemas y para la sociedad. Debido a esto, el desarrollo de soluciones orientadas a la mejora de los procesos de tratamiento contribuye, de forma muy positiva a reducir el impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente.

En el presente trabajo se puede ver la preocupación por la sostenibilidad y gestión del agua y de los recursos de una manera responsable. La búsqueda de alternativas a las técnicas convencionales y al uso de químicos comerciales ya existentes responde a un uso más eficiente de los recursos naturales. Esto se relaciona directamente con la economía circular reduciendo los residuos y aumentando el uso de los recursos en la medida de lo posible.

Desde una perspectiva social, existen implicaciones directas de las innovaciones en los procesos de tratamiento en la vida de los seres humanos. La disponibilidad de agua es esencial para todo tipo de actividad humana, para la salud, la economía y la estabilidad social. Los avances en este ámbito garantizan que los recursos se puedan mantener en condiciones adecuadas para el abastecimiento de agua de los humanos, actividades agrícolas y los ecosistemas naturales. La investigación plantea además la necesidad de considerar el acceso a las tecnologías desarrolladas. Es importante que las innovaciones se puedan adaptar a diferentes contextos, teniendo en cuenta aquellas zonas en las que los recursos, tanto económicos como tecnológicos, son más limitados. Por ello, el desarrollo de estas tecnologías puede contribuir a una mejor gestión de los recursos a nivel mundial.

El presente trabajo presenta además una responsabilidad en cuanto a la rigurosidad científica y transparencia en la obtención de datos y procesos de análisis. La generación de conocimiento de manera fiable es un elemento esencial para la seguridad en los avances científicos en contextos reales.

Por todo esto, la investigación en el tratamiento de aguas no solo presenta un componente técnico, sino que también presenta una dimensión ética y social. La protección de los recursos, la reducción del impacto ambiental y la búsqueda de soluciones sostenibles representan desafíos que requieren una participación activa de la sociedad.