



**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO**

APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE  
CROMO TOTAL, DQO Y TURBIDEZ EN EFLUENTES DE CURTIEMBRE A  
ESCALA PILOTO, 2025

**Línea de investigación:**  
**Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

**Autor**

Obando Moreno, Wilfredo Samir

**Asesora**

Paricoto Simón, María Mercedes

ORCID: 0000-0002-7675-7558

**Jurado**

Martínez Cabrera, Rubén

Alvarado Pérez, Karina Milagros

Legua Terry, Alberto Israel

**Lima - Perú**

**2026**



# APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE CROMO TOTAL, DQO Y TURBIDEZ EN EFLUENTES DE CURTIEMBRE A ESCALA PILOTO, 2025

## INFORME DE ORIGINALIDAD

22%

INDICE DE SIMILITUD

20%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://repositorio.unfv.edu.pe">repositorio.unfv.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
2	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	2%
3	<a href="https://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="https://repositorio.unac.edu.pe">repositorio.unac.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
5	Submitted to ITESM: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Trabajo del estudiante	1%
6	<a href="https://repositorio.uta.edu.ec">repositorio.uta.edu.ec</a> Fuente de Internet	1%
7	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante	1%
8	<a href="https://dspace.unitru.edu.pe">dspace.unitru.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
9	Submitted to Universidad Tecnológica de los Andes Trabajo del estudiante	<1%
10	<a href="https://docs.google.com">docs.google.com</a> Fuente de Internet	<1%



Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

**VRIN** | VICERRECTORADO  
DE INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO**

APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE CROMO  
TOTAL, DQO Y TURBIDEZ EN EFLUENTES DE CURTIEMBRE A ESCALA PILOTO,

2025

**Línea de Investigación:**

Tecnología para Residuos y Pasivos Ambientales, Biorremediación

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

**Autor:**

Obando Moreno, Wilfredo Samir

**Asesora:**

Paricoto Simón, María Mercedes

ORCID: 0000-0002-7675-7558

**Jurado:**

Martínez Cabrera, Rubén

Alvarado Pérez, Karina Milagros

Legua Terry, Alberto Israel

**Lima – Perú**

**2026**

### **Dedicatoria**

A mis padres, Paulino Wilfredo Obando De La Cruz y Alejandrina Maritza Moreno León, por ser el pilar más sólido de mi vida, por su amor incondicional y su incansable esfuerzo para brindarme lo mejor. Gracias por enseñarme, con su ejemplo, el valor del trabajo honesto y la perseverancia.

A mis hermanos, Arturo, Meylen y Pamela, por su cariño constante, sus palabras de aliento y su apoyo incondicional. A cada uno de ustedes, les dedico este logro.

### **Agradecimientos**

A Dios, por darme la vida, la fortaleza y las oportunidades necesarias para llegar hasta aquí.

A la Universidad Nacional Federico Villarreal, mi alma mater, por facilitarme el acceso a las instalaciones del laboratorio, donde se llevó a cabo gran parte del trabajo experimental.

A mis padres, por su inmenso apoyo y por acompañarme en todo momento. Mi padre, con quien compartí largas madrugadas enfrentando los desafíos técnicos de esta tesis. Su compañía, comprensión y compromiso fueron fundamentales

A mi cuñado Ángel, mi hermana Pamela, mi hermana Meylen y a mi tía Cristina, por su ayuda en momentos clave y por los consejos sinceros que me permitieron seguir adelante.

A mis profesores de la UNFV que me guiaron a lo largo de mi carrera. Gracias por compartir su experiencia y enseñanzas, y por darme las herramientas para pensar y actuar con criterio profesional.

## ÍNDICE

Resumen.....	12
Abstract.....	13
I. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Descripción y formulación del problema.....	15
1.1.1. Descripción del problema.....	15
1.1.2. Formulación del problema.....	18
1.2. Antecedentes.....	18
1.2.1. Antecedentes Internacionales.....	18
1.2.2. Antecedentes Nacionales.....	21
1.3. Objetivos.....	24
1.3.1. Objetivo General.....	24
1.3.2. Objetivo Especifico.....	24
1.4. Justificación.....	24
1.5. Hipótesis.....	26
1.5.1. Hipótesis General.....	26
1.5.2. Hipótesis Específicas.....	26
II. MARCO TEÓRICO.....	27
2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación.....	27
2.1.1. Electroquímica.....	27
2.1.2. Aguas Residuales.....	46
2.1.3. Electrocoagulación.....	64

2.1.4.	Cromo .....	76
2.1.5.	Industrias de Curtiembres .....	79
2.2.	Marco Conceptual .....	90
2.3.	Marco Legal Ambiental .....	93
III.	MÉTODO .....	95
3.1.	Tipo de investigación .....	95
3.2.	Ámbito temporal y espacial.....	95
3.2.1.	Ámbito Temporal.....	95
3.2.2.	Ámbito Espacial.....	96
3.3.	Variables.....	97
3.3.1.	Variable Independiente .....	97
3.3.2.	Variable dependiente .....	97
3.4.	Población y muestra .....	99
3.4.1.	Población.....	99
3.4.2.	Muestra .....	99
3.5.	Instrumentos .....	99
3.5.1.	Técnicas .....	99
3.5.2.	Instrumentos.....	99
3.5.3.	Equipos .....	99
3.6.	Procedimientos.....	100
3.6.1.	Etapa 1: Diseño y elaboración del sistema piloto de electrocoagulación .....	101

3.6.2.	Etapa 2: Toma de muestra en campo y caracterización del efluente industrial	101
3.6.3.	Etapa 3: Ensayos de tratamiento con electrocoagulación .....	102
3.6.4.	Etapa 4: Determinación de pH, Cromo total, DQO y Turbidez.....	102
3.6.5.	Etapa 5: Análisis e interpretación de resultados finales.....	103
3.7.	Análisis de datos.....	103
IV.	RESULTADOS.....	105
4.1.	Caracterización del efluente final antes del tratamiento con electrocoagulación ...	105
4.2.	Determinación del efecto de la intensidad de corriente y tiempo de tratamiento en la concentración de cromo total, DQO y turbidez mediante electrocoagulación .....	107
4.3.	Estimación de la eficiencia óptima de remoción de Cromo total, DQO y Turbidez mediante electrocoagulación.....	114
4.4.	Determinación de la correlación no paramétrica (Spearman) entre la remoción de cromo total, DQO y turbidez .....	116
4.5.	Análisis Estadístico .....	118
4.5.1.	Análisis estadístico para la concentración de cromo total .....	119
4.5.2.	Análisis estadístico para la DQO .....	123
4.5.3.	Análisis estadístico para la turbidez.....	128
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	133
VI.	CONCLUSIONES .....	136
VII.	RECOMENDACIONES.....	139
VIII.	REFERENCIAS .....	140

IX.	ANEXOS .....	153
9.1.	Anexo A: Matriz de consistencia .....	153
9.2.	Anexo B: Mapa de ubicación .....	154
9.3.	Anexo C: Panel fotográfico .....	155
9.4.	Anexo D: Fichas de datos .....	160

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Contaminante - Efecto en el agua .....	46
Tabla 2 Ventajas y desventajas de la electrocoagulación .....	74
Tabla 3 LMP – D.S. N° 010-2023-MINAM.....	93
Tabla 4 VMA - D.S. N.º 010-2019-VIVIENDA .....	94
Tabla 5 Operacionalización de Variables de Investigación.....	98
Tabla 6 Parámetros regulados por VMA .....	105
Tabla 7 Otros parámetros.....	106
Tabla 8 Tratamiento por electrocoagulación - pH .....	107
Tabla 9 Tratamiento por electrocoagulación – Cr total (mg/L).....	109
Tabla 10 Tratamiento por electrocoagulación – DQO (mg/L) .....	110
Tabla 11 Tratamiento por electrocoagulación – Turbidez (NTU).....	112
Tabla 12 Eficiencias promedio en la electrocoagulación – Cr total .....	114
Tabla 13 Eficiencias promedio en la electrocoagulación – DQO.....	114
Tabla 14 Eficiencias promedio en la electrocoagulación – Turbidez .....	115
Tabla 15 Correlación de Spearman Cr total vs DQO vs Turbidez .....	117
Tabla 16 Prueba de Ryan-Joiner para Cr total .....	119
Tabla 17 Prueba de Levene para Cr total.....	120
Tabla 18 Prueba de Kruskal – Wallis para Cr total .....	121
Tabla 19 Prueba post hoc tipo Dunn para Cr total.....	122
Tabla 20 Prueba de Ryan-Joiner para DQO .....	123
Tabla 21 Prueba de Levene para DQO .....	125
Tabla 22 Prueba Anova para DQO .....	125
Tabla 23 Prueba Post Hoc Tukey para DQO .....	127
Tabla 24 Prueba de Ryan-Joiner para Turbidez.....	128

Tabla 25 Prueba de Levene para turbidez.....	129
Tabla 26 Prueba de Kruskal – Wallis para Turbidez .....	129
Tabla 27 Prueba Post Hoc Tipo Dunn para Turbidez .....	131

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Pila galvánica vs Celda electrolítica.....	28
Figura 2 Celda galvánica – Celda de Daniell.....	29
Figura 3 Electrolisis del cloruro de sodio fundido.....	31
Figura 4 Celda electrolítica y sus componentes.....	34
Figura 5 Potenciales de reducción estándar a 25°C .....	35
Figura 6 Electrólisis del agua.....	37
Figura 7 Electrolisis del cloruro de sodio en medio acuoso .....	39
Figura 8 Electro-refinación del cobre .....	41
Figura 9 Electrodeposición de plata.....	43
Figura 10 Primera Ley de Faraday.....	44
Figura 11 Segunda Ley de Faraday .....	45
Figura 12 Escala del pH en agua.....	50
Figura 13 Cálculo de los Sólidos Totales .....	51
Figura 14 Procedimiento para determinar Sólidos en agua .....	52
Figura 15 Cálculo para la determinación de DBO.....	52
Figura 16 Factores que influyen en la DQO .....	53
Figura 17 Bioacumulación y biomagnificación de metales pesados .....	54
Figura 18 Razones para medir y tratar la turbiedad.....	56
Figura 19 Fases del tratamiento de aguas residuales .....	59
Figura 20 Formación de poli-hidroxocomplejos de Aluminio .....	61
Figura 21 Diagrama de flujo del proceso de Coagulación y Floculación.....	63
Figura 22 Celda de Electrocoagulación .....	65
Figura 23 Reacciones típicas en la electrocoagulación.....	66
Figura 24 Reacciones específicas en electrodos de Aluminio y Hierro.....	67

Figura 25 Celda de Electrocoagulación con ánodo de Hierro .....	68
Figura 26 Zonas de predominio de especies de Hierro en función al pH .....	69
Figura 27 Electrodo monopolar y bipolares en serie y paralelo .....	71
Figura 28 Distintos tipos de reactores.....	73
Figura 29 Estados de oxidación más comunes del cromo .....	77
Figura 30 Cromo Hexavalente en efluentes industriales .....	77
Figura 31 Recepción y revisión de las pieles.....	80
Figura 32 Etapa de Ribera – Procesos de remojo y pelambre .....	82
Figura 33 Etapa de Curtido – Proceso de curtido .....	84
Figura 34 Etapa de Pre-Acabado - Proceso de secado.....	85
Figura 35 Etapa de Acabado – Proceso de planchado .....	86
Figura 36 Flujograma del proceso de producción del cuero.....	88
Figura 37 Diagrama de especiación del cromo.....	89
Figura 38 Mapa de Ubicación.....	96
Figura 39 Diagrama de flujo - Procedimientos.....	100
Figura 40 Gráfica de líneas de electrocoagulación - pH.....	108
Figura 41 Gráfica de líneas de electrocoagulación – Cr total.....	109
Figura 42 Gráfica de líneas de electrocoagulación - DQO .....	111
Figura 43 Gráfica de líneas de electrocoagulación - Turbidez .....	113
Figura 44 Gráfica de barras de las eficiencias en electrocoagulación .....	115
Figura 45 Gráfica de correlación de Spearman Cr total vs DQO vs Turbidez .....	117
Figura 46 Gráfica de probabilidades de normalidad Q-Q para Cr total.....	119
Figura 47 Gráfica de probabilidades de normalidad Q-Q para DQO .....	124
Figura 48 Gráfica de intervalos para DQO vs Pruebas.....	126
Figura 49 Gráfica de probabilidades de normalidad Q-Q para Turbidez .....	128

## Resumen

La industria curtidora genera efluentes con alta carga contaminante, especialmente en cromo total, materia orgánica y sólidos suspendidos, representando un riesgo ambiental significativo si no se tratan adecuadamente. Por ello, esta investigación tuvo como objetivo evaluar la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de cromo total, DQO y turbidez en un efluente de curtiembre a escala piloto. La metodología fue de tipo aplicada, cuantitativa, con diseño experimental y enfoque transversal. Se manipularon dos factores claves: la intensidad de corriente (2, 4 y 6 A) y el tiempo de tratamiento (15, 30 y 45 min), evaluando su efecto sobre la concentración de contaminantes. El sistema experimental consistió en un reactor cilíndrico de acrílico con seis placas de hierro como electrodos, alimentado por una fuente DC regulada. Se analizaron nueve tratamientos con dos repeticiones adicionales. Los resultados indicaron que el efluente inicial excedía los VMA establecidos, asimismo se evidenció que el aumento de la intensidad de corriente aceleró la remoción de contaminantes y elevó progresivamente el pH del sistema, favoreciendo la generación de coagulantes activos. En el tratamiento óptimo (6 A – 45 min), se lograron eficiencias de remoción de 99.80% para cromo total, 76.80% para DQO y 99.98% para turbidez, lo que evidencia una respuesta sinérgica de estos contaminantes al proceso. Se concluye que la electrocoagulación es una alternativa viable y eficiente para el tratamiento de efluentes curtientes altamente contaminados, con potencial para ser integrada a sistemas complementarios.

*Palabras clave:* electrocoagulación, cromo total, DQO, turbidez, efluente de curtiembre

### Abstract

The tanning industry generates effluents with a high pollution load, especially in total chromium, organic matter, and suspended solids, representing a significant environmental risk if not properly treated. Therefore, this research aimed to evaluate the application of electrocoagulation for the removal of total chromium, COD, and turbidity in a pilot-scale tannery effluent. The methodology was applied, quantitative, with an experimental design and a cross-sectional approach. Two key factors were manipulated: current intensity (2, 4, and 6 A) and treatment time (15, 30, and 45 min), evaluating their effect on pollutant concentrations. The experimental system consisted of a cylindrical acrylic reactor with six iron plates as electrodes, powered by a regulated DC source. Nine treatments were analyzed with two additional replicates. The results indicated that the initial effluent exceeded the established VMA. It was also evident that increasing the current intensity accelerated contaminant removal and progressively raised the system's pH, favoring the generation of active coagulants. In the optimal treatment (6 A – 45 min), removal efficiencies of 99.80% for total chromium, 76.80% for COD, and 99.98% for turbidity were achieved, demonstrating a synergistic response of these contaminants to the process. It is concluded that electrocoagulation is a viable and efficient alternative for the treatment of highly contaminated tanning effluents, with the potential to be integrated into complementary systems.

*Keywords:* electrocoagulation, total chromium, COD, turbidity, tannery effluent

## I. INTRODUCCIÓN

El uso del cuero ha sido siempre impulsado por la necesidad de la persona de contar con un abrigo que sirva de protección ante las condiciones climáticas de su localía, como también el impulso de vestir prendas lujosas según las condiciones estéticas establecidas en la época, como zapatos, carteras, billeteras, casacas, etc. (Instituto tecnologico de la Producción [ITP], 2023)

Pero a su vez, históricamente, las industrias del cuero , desde sus inicios, han sido consideradas como fuentes de contaminación debido a que para la obtención del producto resistente y estéticamente vistoso que conocemos como el cuero, las pieles del ganado ha tenido que pasar por todo un proceso que ha necesitado de insumos químicos y determinadas cantidades de agua, las cuales son desechadas como residuos (efluentes), teniendo estas alta concentraciones de materia orgánica y agentes químicos, que si no reciben un tratamiento adecuado, terminan llegando a fuentes hídricas naturales y ocasionando un impacto negativo en el ambiente. (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2023)

Hoy en día las industrias del cuero se encuentran pasando por un cambio tanto en las practicas que utilizan, como en los insumos que emplean y las tecnologías que implementan para el tratamiento de sus efluentes, con el fin de cumplir con la normativa ambiental vigente impuesta en el País en el que se encuentran. (Ministerio de la Producción [PRODUCE], y ITP, 2018)

Por ello, la presente tesis busca evaluar la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de cromo total, DQO y Turbidez en efluentes de curtiembres; puesto que, al comprobar su eficiencia y optimizarla, contribuiremos al conocimiento científico, lo cual puede ser usado como una alternativa para las industrias del cuero, incentivando un adecuado

tratamiento de sus efluentes (práctico y económico), y logrando así el empleo de buenas prácticas ambientales, respetando y cumpliendo con la normativa ambiental vigente.

## **1.1. Descripción y formulación del problema**

### ***1.1.1. Descripción del problema***

A nivel global, la industria del cuero posee una alta producción y comercialización; según el Centro de Comercio Internacional, se calcula que este sector supera los 80 000 millones de dólares cada año (SICEX, 2021). Los principales productores de cuero son China, India y Vietnam en Asia, que se caracterizan por los grandes volúmenes de producción y exportación, mayormente en el cuero curtido, siendo China el principal exportador mundial en el 2021 y 2022. En Europa, Italia se ubica en el primer puesto, por su producción y exportación en cuero de alta calidad en productos de lujo, seguido luego por Francia y Alemania. En Latinoamérica, Brasil y Argentina son importantes productores de cuero bovino. En América del norte, Estados Unidos es uno de los mayores productores del cuero del mundo, principalmente en cuero vacuno, que se exporta hacia Asia y Europa. En África, Etiopía es un gran productor de cuero de cabra y oveja de alta calidad, que exporta principalmente cuero crudo y semiacabado. (LederPiel, 2024)

A nivel nacional, se cuenta con un aproximado de 3252 industrias de producción de cuero y acabados, teniendo como materia prima a las pieles de animales. El 7% de estas industrias se encuentran dentro de las medianas empresas con un nivel de inversión y tecnología medio, los cuales emplean metodologías más eco-amigables de prevención, mitigación y reutilización de sus residuos principalmente líquidos; y el 93% restante se encuentran ubicadas dentro de las micro y pequeñas empresas, las cuales manejan procesos mayormente empíricos, con equipos y metodologías tradicionales, por lo cual, hoy en día se encuentran envuelto en casos de contaminación ambiental, debido al ineficiente o nulo tratamiento a sus efluentes. (Rendulich, 2019)

Las industrias de curtiembres se ubican principalmente en Lima, Arequipa y Trujillo, en donde encontramos tanto empresas formales como empresas informales. En el caso de Arequipa y Trujillo, estas empresas operan juntas en los denominados parques industriales (Garma et al., 2018), puesto que les resulta conveniente para el tratamiento de sus efluentes en conjunto, debido a que podrían unir esfuerzos para la construcción de plantas de tratamiento; sin embargo existen diversos problemas de índole administrativos u otros que impiden que se logre realizar estas medidas recomendadas y que, por lo tanto, los grandes perjudicados no son solo la población aledaña, la flora y fauna circundante, sino las mismas empresas que son multadas u obligadas a cerrar por organismos fiscalizadores ambientales. (Huamani et al., 2019)

Por ejemplo en Arequipa, las industrias de curtiembres se encuentran localizadas en el Parque Industrial Rio Seco (PIRS) que, en sus procesos productivos, liberan remanentes químicos como los sulfuros, sulfatos, nitrógeno amoniacal, cloruros, materia orgánica y cromo total reactivos contenidos en sus efluentes que son vertidos de manera colectiva a dos lagunas de oxidación con capacidad de 28 mil m<sup>3</sup>, que se encuentran colapsadas, pues han sobrepasado su capacidad y están en estado de colmatación, originando eutrofización de suelos y un vertimiento de agua residual sin un tratamiento efectivo, cuya carga de metales mediante procesos de lixiviación llegan a cuerpos de agua como a la Quebrada de Añashuaycoy, donde según, el informe de la Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), al seleccionar puntos de monitoreos, obtuvieron valores que no cumplen con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) – Agua, en parámetros como metales pesados: arsénico, cobre, mercurio, plomo, zinc y cromo total, proveniente de las lagunas de oxidación (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2017). Asimismo, Según Fernández bravo, director de la Autoridad Administrativa del agua, especificó que las vertientes que generan contaminación al Rio chili son: Una vertiente provocada por la municipalidad, y otra vertiente

proveniente del PIRS, cuya contaminación es producida por los efluentes del proceso productivo del cuero. Entre los contaminantes altamente tóxicos se puede encontrar el cromo hexavalente o cromo (VI). (Chirme, 2023)

Los efluentes de las curtiembres necesitan un tratamiento, debido a que en la producción de cuero se utiliza aditivos como los taninos vegetales y sales de cromo, específicamente en la etapa de curtido, en donde las pieles de los animales se convierten en cuero, lo que ayuda a hacerlos más resistentes a las condiciones ambientales. Entre estas sales de cromo empleadas tenemos el sulfato de cromo trivalente, el cloruro de cromo trivalente y el dicromato de potasio hexavalente, las cuales ayudan a estabilizar la estructura de colágeno en las pieles bloqueando reacciones químicas y degradaciones biológicas, formando lo que conocemos como el cuero (Jordi, 2021). El cromo trivalente en un medio como el agua, y con la presencia de ciertos compuestos químicos, es susceptible fácilmente a oxidarse y formar cromo hexavalente, que es altamente tóxico y cancerígeno, además de ser muy soluble en agua, lo que le permite bioacumularse en la cadena alimentaria y causar daños severos al ingresar al cuerpo humano, pues tiene la capacidad de atravesar membranas celulares. La exposición al cromo hexavalente puede provocar enfermedades respiratorias, daño hepático y renal, y cáncer (ELIKA, 2021).

Los niveles de cromo en efluentes de industrias de curtiembres en Perú se encuentran controlados, mediante el DS N°010-2023 MINAM, que actualiza los Límites Máximos Permisibles en actividades de curtido y adobo de cuero, así como adobo y teñido de pieles (MINAM y Gob.pe, 2023), en caso de descarga a cuerpos de agua naturales, y el DS N°010-2019 VIVIENDA, que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2019), en caso de descarga a un sistema de alcantarillado. Para cumplir con la normativa, es fundamental la búsqueda de tecnologías

eficientes y accesibles que permitan tratar metales pesados como el cromo. En este contexto, el presente trabajo está enfocado en evaluar la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de Cromo total, DQO y Turbidez en efluentes de curtiembre a escala piloto, 2025

### ***1.1.2. Formulación del problema***

#### **Problema General**

- ¿Cómo es la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de Cromo total, DQO y Turbidez en efluentes de curtiembre a escala piloto, 2025?

#### **Problemas Específicos**

- ¿Cuál es la caracterización fisicoquímica del efluente de curtiembre a escala piloto antes del tratamiento por electrocoagulación?
- ¿Cuál es el efecto de la intensidad de corriente y tiempo de tratamiento en la electrocoagulación?
- ¿Cuál es la eficiencia óptima de remoción de Cromo total, DQO y Turbidez en el tratamiento por electrocoagulación?
- ¿Cuál es la relación que existe entre las concentraciones de Cromo total, DQO y Turbidez durante el tratamiento por electrocoagulación?

## **1.2. Antecedentes**

### ***1.2.1. Antecedentes Internacionales***

Muñoz et al. (2022), en su artículo de investigación titulado “Electrocoagulación con electrodos de aluminio para tratamiento de aguas residuales de curtiembres en Villapinzón, Cundinamarca, Colombia” tuvo como objetivo evaluar un sistema de electrocoagulación a escala de laboratorio para remover turbiedad y DQO, mediante ensayos realizados de manera discontinua por periodos de 45 min y variaciones en la cantidad de electrodos e intensidad de corriente. teniendo como resultados la máxima remoción de turbiedad y DQO del 99.77% y

74.18% respectivamente, cuando se utilizó 4 electrodos planos. Asimismo, una remoción del 98% de turbiedad con el empleo de 2 electrodos perforados. Además, alcanzaron una eliminación del 45.89 y 48.21% de sulfuros cuando se usaron 4 y 6 electrodos respectivamente. Se llegó a la conclusión que la cantidad adecuada de electrodos en el proceso es de 4, el aumento del empleo de electrodos reduce la densidad de corriente, aumenta el área de contacto y favorece la disolución del aluminio en exceso.

Hartati et al. (2024), en su artículo de investigación titulado “Electrocoagulation Process for Chromium Removal in Leather Tanning Effluents”, tuvo como objetivo, evaluar la eficiencia del proceso de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales derivadas de la industria del cuero, centrándose en los parámetros de pH, corriente eléctrica y tiempo de detención, en relación a la remoción de la concentración del cromo, mediante una caracterización inicial en los valores del efluente, la preparación del reactor y los electrodos, y finalmente la evaluación con las muestras recolectadas, bajo un enfoque estadístico que utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR). Se realizó una variación del pH entre valores 4, 7, 10; una intensidad eléctrica de 0.5, 1 y 1.5 A; y duraciones de 1, 2 y 3 horas. Finalmente, se llegó a la conclusión que, para la mejor eficiencia en remoción de cromo, se obtuvo con un pH de 4, bajo una intensidad de corriente de 1.5 A, y durante 3 horas, lo cual representó una eliminación del cromo del 99.94%, con lo cual resaltaron a la electrocoagulación como una técnica de remediación ambiental sostenible y eficiente.

Ortiz (2024), en su tesis titulada “Evaluación del tratamiento de electrocoagulación seguido del proceso de fitorremediación de *Eichhornia crassipes* en aguas residuales de curtiembre de la provincia de Tungurahua”, tuvo como objetivo evaluar el tratamiento de electrocoagulación seguido del proceso de fitorremediación de *Eichhornia crassipes* en aguas residuales de curtiembre de la provincia de Tungurahua, mediante una caracterización inicial de parámetros fisicoquímicos con “Standard Methods for the Examination of wáter an

wastewater”, con el empleo del equipo HANNA; y un tratamiento dividido en dos fases, electrocoagulación como pretratamiento y fitorremediación con masas de crassipes, siguiendo la normativa TULSMA. Se llegó a la conclusión que la electrocoagulación logró reducciones significativas del 60 al 80% en contaminantes, y posteriormente la fitorremediación alcanzó una remoción notable del 90%, en aguas residuales de curtiembres.

Villalobos et al. (2020), en su artículo de investigación titulado “Electrocoagulation treatment of industrial tannery wastewater employing a modified rotating cylinder electrode reactor”, tuvo como objetivo demostrar la capacidad de la electrocoagulación para tratar aguas residuales de curtiembres industriales de manera eficiente, amigable con el ambiente, segura y a bajo costo, posicionándola como una alternativa sustentable a tecnologías de tratamiento convencionales; mediante el tratamiento en un reactor con electrodos cilíndricos rotatorios, usando seis ánodos de aluminio y dos tanques de sedimentación. Se evaluó cómo la densidad de corriente y la velocidad de rotación de los electrodos influyen en la eficiencia de eliminación de contaminantes. Se obtuvo que la electrocoagulación logró una reducción del 70% en la demanda química de oxígeno (DQO) y una eliminación de más del 90% de sólidos suspendidos totales, cromo (III) y turbidez, con una densidad de corriente de 6 mA/cm<sup>2</sup> y velocidad de rotación específica. Además, se observó un depósito catódico homogéneo al final de cada prueba.

Iqbal et al. (2023), en su artículo de investigación titulado “Green and Efficient Removal of Toxic Lead and Chromium from Synthetic Leather Tannery Wastewater using Electrocoagulation”, tuvo como objetivo investigar el efecto de la densidad de corriente como variable operativa, el tiempo de tratamiento y el pH en la eficiencia de eliminación de cromo y plomo de las aguas residuales de la industria de curtiduría de cuero sintético; mediante la implementación de un sistema de electrocoagulación para la eliminación de Cr y Pb del efluente de la curtiduría de cuero, la investigación de los parámetros operativos de densidad de

corriente, tiempo de tratamiento y pH en la eficiencia de eliminación, con electrodos de Fe, con dimensiones de 9.5 x 0.6 x 0.4 cm y un área de superficie efectiva de 76 cm<sup>2</sup>. Se obtuvo como resultados que la máxima eficiencia en eliminación de cromo y pb fue de 87.8% y 62.7 %, a un pH de 3.5 y densidad de corriente de 18.8 miliamperios/cm<sup>2</sup>, para un 1 litro de efluente de curtiduría de cuero sintético. Se llegó a la conclusión que el sistema de electrocoagulación trata eficazmente efluentes de curtiembres.

### ***1.2.2. Antecedentes Nacionales***

Aguirre et al. (2022), en su tesis titulada “Reducción del contenido de cromo hexavalente por electrocoagulación en las aguas residuales de una empresa de curtiembre”, tuvo como objetivo reducir el contenido de cromo hexavalente en las aguas residuales en un proceso de curtido, mediante electrocoagulación. La metodología se basó en un diseño experimental en donde se analizó la concentración de cromo hexavalente con un espectrofotómetro, presente antes y después del tratamiento con electrocoagulación en un efluente de curtiembres. Se encontró que el efluente superaba los valores permitidos, con una concentración de 3,20 mg/L. Asimismo, se utilizó 6 placas de aluminio como electrodos y una fuente de poder de 40 amperios de capacidad para optimizar el rendimiento del proceso electrolito. Se manejó valores de 2 A, 4 A, 6 A y 8 A de intensidad de corriente para 5 min, 10 min, 15 min y 20 min. Se concluyó que el método de electrocoagulación es una tecnología eficiente y una alternativa válida para una correcta remoción de cromo hexavalente, llegando a tener un porcentaje de remoción del 89.706%, para una intensidad de corriente de 8 A y 20 min.

Bravo et al. (2024), en su artículo de investigación titulada “Sustainability Prediction by Evaluating the Emergy of a Co-Treatment System for Municipal Wastewater and Acidic Water Using Intermittent Electrocoagulation”, tuvo como objetivo evaluar la sustentabilidad de un sistema de co-tratamiento que combina Aguas Residuales Municipales (ARM) y Drenaje

Ácido de Minas (DAM) mediante la técnica de electrocoagulación intermitente. La metodología se basó en el análisis de 4 escenarios de tratamiento: Tratamiento I, relación de 1/7 entre ARM y DAM; Tratamiento II, que incluye un humedal artificial; Tratamiento IIIa, que integra electrocoagulación para la remoción de sulfatos y regulación del pH; y Tratamiento IIIb, que aplica electrocoagulación y utiliza una relación 1/15 de DAM a agua eutrófica. Se obtuvo como resultados que el tratamiento IIIa mostró eficacia en la eliminación de contaminantes y el Tratamiento IIIb mejoró la sostenibilidad del sistema, reflejando menor carga ambiental. Se concluyó que la electrocoagulación intermitente, al integrarse con agua eutrófica, puede optimizar la eliminación de contaminantes y reducir la carga ambiental, incrementando la sostenibilidad en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Valle (2022), en su tesis titulada “Diseño de un sistema de remoción de cromo mediante electrocoagulación para curtiembres, Trujillo – 2022”, tuvo como objetivo diseñar un sistema de electrocoagulación para la remoción eficiente de cromo para aguas residuales de curtiembre en la ciudad de Trujillo mediante una recopilación de información bibliográfica sobre la remoción de cromo por electrocoagulación. Concluyeron que, para una mayor eficiencia en remoción de cromo, se debe de tener un pH inicial entre valores 5-8, con un tiempo de contacto de 27 minutos para concentraciones menores a 1000 ppm de cromo, y 75 minutos, para concentraciones mayores a 1000 ppm de cromo. Adicionalmente, utilizar electrodos de hierro, se obtiene una remoción del 99.15%, y que los valores de densidad de corriente, conductividad, cantidad de electrodos y material del reactor influye en la eficiencia de remoción de cromo. Finalmente presentaron un sistema de remoción de cromo teniendo como partes: Un reactor tipo batch de plexiglás de un 1 L, con 2 electrodos fijos de hierro en conexión monopolar en paralelo, con una fuente de alimentación de 1 a 30 voltios.

Cerna y Gamboa (2021), en su tesis titulada “ Condiciones técnicas del proceso de electrocoagulación para una remoción eficiente de cromo y DQO en aguas residuales

industriales de curtiembre”, tuvieron como objetivo, determinar las condiciones técnicas del proceso de electrocoagulación para lograr una remoción eficiente de cromo y DQO en aguas residuales industriales de curtiembre, mediante la recopilación de información bibliográfica sobre investigaciones de electrocoagulación aplicado para la remoción de Cromo y DQO en aguas residuales de curtiembres, y su posterior análisis en los softwares Megastat y minitab<sup>19</sup>. Finalmente se encontró un coeficiente de correlación de Spearman de 0.2, entre la remoción de Cromo y DQO, probando una relación baja entre estas variables. Asimismo, se demostró mediante regresiones lineales y pruebas estadísticas que las variables de pH inicial, intensidad de corriente, densidad de corriente, material de los electrodos, tipo de reactores, uso de agitadores magnéticos poseen una influencia alta en la eficiencia de remoción de cromo.

Tupia y Valerio (2023), en su tesis titulada “Remoción de los contaminantes en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación”, tuvieron como objetivo, remover los contaminantes de color, DQO y SST de la carga del efluente de una planta textil con un sistema de electrocoagulación. Inicialmente se realizó una caracterización fisicoquímica del efluente, encontrando valores de Color 547.6 Pt-Co, DQO 402 mg/L, SST 156 mg/L, SDT 1981.6 mg/L, Turbidez 83.3 NTU, Conductividad 3920 uS/cm y pH 7.06. Luego para el diseño del sistema de electrocoagulación, se consideró voltajes de 5, 10 y 15 V con tiempos de tratamiento de 15, 30 y 45 min, con el empleo de 3 electrodos de Fe como ánodo y 3 electrodos de Al como cátodo, con una separación de 10 mm entre placa y placa, dispuestas en paralelo y un pH neutro. Se obtuvo como resultados una remoción de DQO del 86.46%, de color de 95.74% a 15 voltios y a 45 minutos y una remoción del 82.48% a 15 V para un tiempo de 30 minutos.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. *Objetivo General*

- Evaluar la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de Cromo total, DQO y Turbidez en efluentes de curtiembre a escala piloto, 2025.

#### 1.3.2. *Objetivo Especifico*

- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos del efluente de curtiembre antes del tratamiento por electrocoagulación.
- Determinar el efecto de intensidad de corriente y tiempo de tratamiento en la electrocoagulación.
- Estimar la eficiencia óptima de remoción de cromo, DQO y Turbidez obtenida en el tratamiento por electrocoagulación.
- Analizar la relación entre las concentraciones de cromo, DQO y turbidez mediante correlación estadística en el tratamiento por electrocoagulación.

### 1.4. Justificación

La justificación teórica se basa principalmente bajo principios físicos-químicos, donde el suministro de corriente eléctrica induce reacciones químicas en un sistema de electrodos (generalmente aluminio o hierro) que generan reacciones de oxidación-reducción en el sistema. Estas reacciones liberan iones metálicos como  $Al^{+3}$  y  $Fe^{+3}$  desde el ánodo, que actúan como agentes coagulantes, neutralizando las cargas de partículas coloidales en el sistema y facilitando su aglomeración y posterior precipitación. Asimismo, se liberan hidróxidos metálicos a partir de la hidrólisis del agua que reaccionan con los iones generados y producen un aumento del pH que induce a la formación de flóculos de hidróxido metálicos, los cuales adsorben contaminantes disueltos como los metales pesados ( $Cr^{+6}$ ,  $Cr^{+3}$ ), colorantes, aceites y grasas, facilitando su remoción del medio.

La justificación práctica se basa en la necesidad de alternativas más eficientes y económicas en el tratamiento de aguas residuales de las curtiembres, como la electrocoagulación, la cual, mediante las condiciones óptimas, permitirá remover metales pesados como el cromo, disminuirá la turbiedad, aceites y grasas, y le devolverá el color transparente al agua, para que de esta manera no impacte negativamente en su descarga hacia un cuerpo natural hídrico. Esto servirá para mitigar los impactos negativos ya que reduciría en gran porcentaje la contaminación que afectan a las poblaciones y a la flora y fauna redundante.

La justificación metodológica se basa en el diseño y construcción de un sistema piloto de electrocoagulación, que permitirá tratar volúmenes controlados y fijos de efluente y ajustar variables como la intensidad de corriente, el tiempo de tratamiento y/o variaciones en las configuraciones de los electrodos (tipo, número, distribución espacial). Este enfoque es ideal para optimizar el proceso de remoción de contaminantes, como el cromo total, debido a su simplicidad operativa, menor costo y capacidad de generar datos replicables en un entorno controlado, facilitando la evaluación de la eficiencia del tratamiento.

La justificación social se sustenta principalmente en la necesidad de mejorar la calidad ambiental y proteger la salud pública. Este trabajo de investigación busca reducir la concentración de cromo total en los efluentes de curtiembres, beneficiando directamente a las poblaciones locales al proteger los cuerpos de agua como ríos y lagos, que son esenciales para la vida cotidiana. Al mitigar los impactos del cromo, un metal cancerígeno, se protege la salud de las comunidades cercanas y se promueve un entorno más saludable. La implementación de tecnologías eficientes y accesibles, como la electrocoagulación, no solo fomenta una industria más responsable, sino que también ayuda a preservar el ambiente y minimizar los efectos adversos de la contaminación, beneficiando así a la sociedad en su conjunto.

## **1.5. Hipótesis**

### ***1.5.1. Hipótesis General***

- El tratamiento mediante la electrocoagulación logra remover efectivamente Cromo total, DQO y Turbidez en efluentes de curtiembre a escala piloto, 2025.

### ***1.5.2. Hipótesis Específicas***

- Los valores de los parámetros fisicoquímicos del efluente se encuentran fuera de los Valores Máximos Admisibles, según la normatividad vigente.
- La intensidad de corriente y el tiempo de tratamiento influyen significativamente en la eficiencia de remoción de contaminantes mediante electrocoagulación.
- La eficiencia del proceso de electrocoagulación supera el 70% en remoción de cromo total, DQO y Turbidez en el efluente.
- Existe una correlación positiva fuerte entre la remoción de cromo total, DQO y turbidez durante el proceso de electrocoagulación

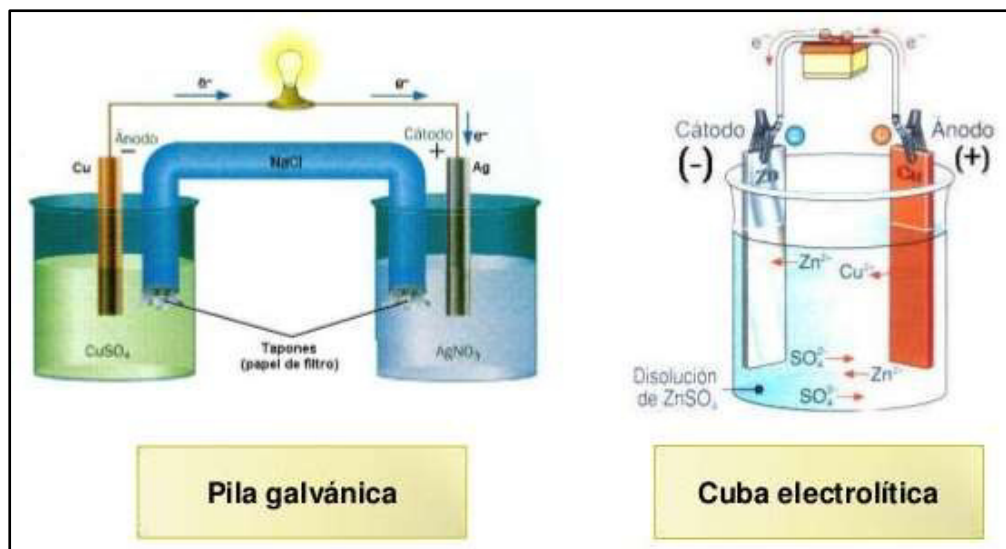
## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

#### 2.1.1. *Electroquímica*

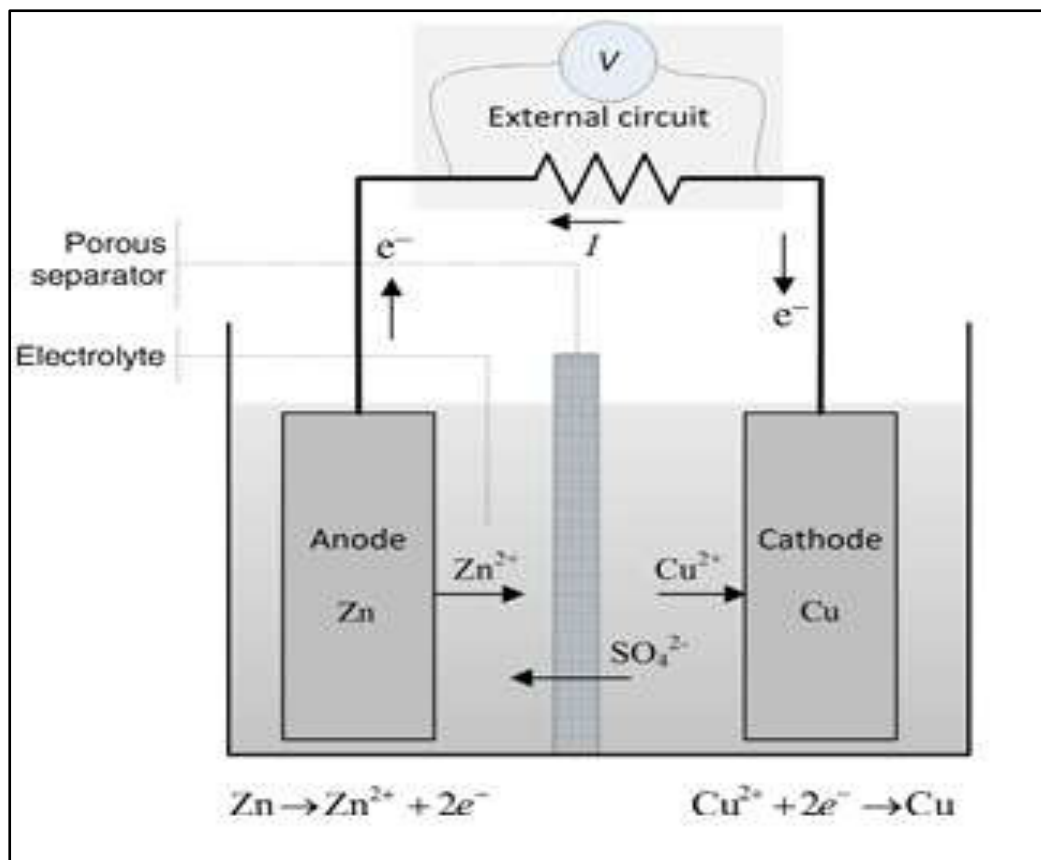
Según Lefrou et al. (2012), se puede definir a la electroquímica como una ciencia que describe las interacciones entre la química y la electricidad, o los fenómenos químicos que están acoplados a intercambios recíprocos de energía eléctrica. Es una ciencia que analiza y describe las transformaciones de la materia a escala atómica (reacciones químicas) por desplazamientos de carga electrónica a un voltaje determinado. En otras palabras, la electroquímica es la rama de la química que estudia la relación entre la electricidad y las reacciones químicas; la transformación de energía eléctrica a la energía química, y viceversa. Estos procesos son importantes en diversas aplicaciones como la electrodeposición de metales, almacenamiento y conversión de energía, sector medioambiental, corrosión, tratamiento de superficies, etc. (Britannica, 2016)

La electricidad y su paso, en forma de corriente eléctrica de manera continua, inducen reacciones químicas no espontáneas de óxido – reducción en el sistema (Electrólisis), o las mismas reacciones químicas redox se producen de manera espontánea en el sistema, lo que genera una corriente eléctrica en el sistema por el flujo de electrones que se transfieren en las reacciones químicas (Celdas Galvánicas). Un ejemplo de celdas galvánicas son las baterías de los aparatos electrónicos, que utilizan las reacciones químicas internas y suministran energía. Los sistemas electrolíticos se basan principalmente en una celda donde ocurren las reacciones de oxido - reducción, esta transferencia de los electrones que se genera se da en los electrodos (Flowers et al., 2019).

**Figura 1***Pila galvánica vs Celda electrolítica**Nota.* Obtenido de Varey (2014)

**2.1.1.1. Celdas galvánicas.** Las celdas galvánicas o celdas voltaicas son dispositivos electroquímicos que generan electricidad a partir de reacciones químicas espontáneas. Estas celdas convierten la energía química en energía eléctrica a través del flujo de electrones que se originan en las reacciones redox (oxidación - reducción), que ocurren entre los electrodos sumergidos en electrolitos. Este flujo de electrones se da desde el ánodo hacia el cátodo.

La pila galvánica está compuesta por dos compartimientos: una en donde se da la oxidación (ánodo) y la otra, la reducción (cátodo), ambas sumergidas en soluciones electrolíticas, que contienen los iones necesarios para el proceso; y el puente salino o una membrana, que separan las soluciones y suministra iones para la neutralización de cargas en exceso y mantener un equilibrio de cargas en el sistema. Se suele utilizar un voltímetro entre los dos compartimientos (Averill y Eldredge, 2012).

**Figura 2***Celda galvánica – Celda de Daniell*

*Nota.* Obtenido de Fuller y John (2018)

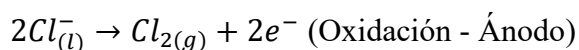
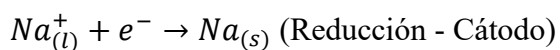
El metal ánodo (Zn) se oxida, liberando electrones al circuito externo y generando iones positivos que se disuelven en el electrolito. Al mismo tiempo, los electrones fluyen a través del circuito externo hacia el cátodo (Cu), donde se produce la reducción: los electrones son captados por los iones en la solución ( $CuSO_4$ ), que se reducen y se depositan como metal o forman productos químicos. Un puente salino o una membrana, separa ambos compartimentos, suministrando un flujo de iones para mantener el equilibrio de carga sin mezclar las soluciones, y que de esta manera no se produzca un exceso de cargas positivas (en el ánodo) o negativas (en el cátodo). (Fuller y John, 2018).

**2.1.1.2. Electrólisis.** La electrólisis es un proceso electroquímico en el cual se utiliza una corriente eléctrica para provocar una reacción química no espontánea, permitiendo la descomposición de un compuesto en sus elementos que lo componen. Este fenómeno ocurre en un medio conductor, generalmente un electrolito, que puede ser una solución acuosa o un fluido que contiene iones. Durante la electrólisis, los electrodos, que son conductores de electricidad (metales por su alta capacidad de conducir electricidad), están sumergidos en el medio (electrolito) y conectados a una fuente de corriente eléctrica, la cual, al suministrarle una diferencia de potenciales al circuito, la corriente eléctrica inducirá las reacciones químicas en la celda electrolítica (Universidad América Latina [UAL], 2011).

Cuando se aplica la electricidad, los iones en el electrolito se mueven hacia los electrodos, veamos esto con un ejemplo de electrólisis.

*a) La electrólisis del cloruro de sodio fundido.* La electrólisis del cloruro de sodio fundido es un proceso importante utilizado para la obtención de sodio metálico y cloro gaseoso. Este proceso se lleva a cabo en una celda electrolítica donde el cloruro de sodio (NaCl) se encuentra en estado fundido, mas no en solución acuosa (no hay presencia de agua), y generalmente se usan electrodos inertes, no reaccionan en el proceso, como el grafito. (Whitten et al., 2015)

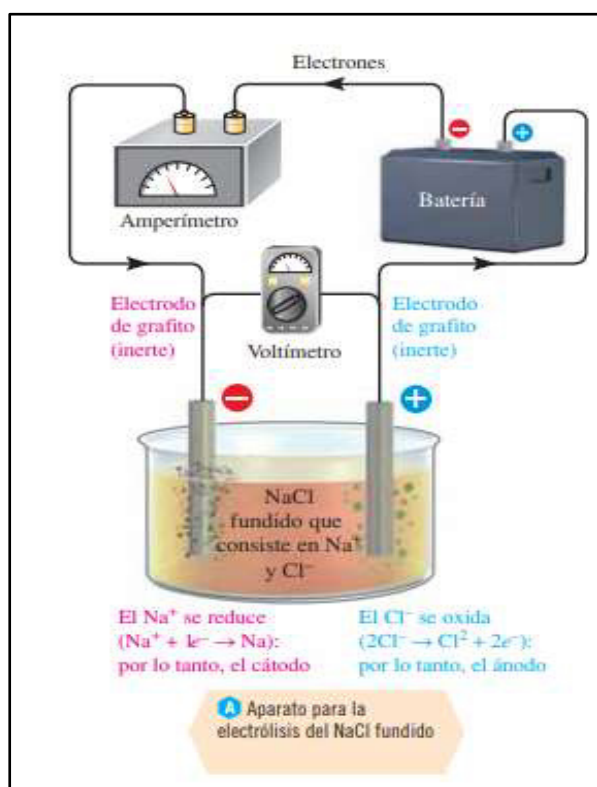
Los cationes (iones con carga positiva) son atraídos hacia el cátodo, que es el electrodo negativo, donde se reducen (ganan electrones), que en nuestro caso práctico sería: la reducción del ion sodio en nuestro cátodo negativo de grafito; mientras que los aniones (iones con carga negativa) se dirigen hacia el ánodo, que es el electrodo positivo, donde se oxidan (pierden los electrones), que en nuestro caso práctico sería: la oxidación del ion cloro en el cátodo positivo de grafito. Entonces nuestras semirreacciones son:



Este movimiento de iones y la correspondiente transferencia de electrones generan cambios químicos la solución, lo que permite la separación de elementos como metales o la producción de gases, lo cual dependerá de las sustancias involucradas en cuestión, y el medio de la celda electrolítica. (Whitten et al., 2015)

### Figura 3

#### *Electrolisis del cloruro de sodio fundido*



*Nota.* Obtenido de Whitten et al. (2015)

El sodio metálico  $\text{Na}_{(s)}$  se forma en el cátodo en estado sólido y se recoge para usos industriales; y el cloro gaseoso  $\text{Cl}_{(g)}$  se genera en el ánodo, el cual se utiliza para la producción de productos químicos como el PVC o desinfectantes. Hay que señalar que, en nuestro ejemplo, se ha utilizado electrólisis (reacciones no espontáneas) con electrodos inertes, que no

participan en el proceso de electrolisis. Cuando se da estos casos, los electrodos que se utilizan deben de ser estables, y que no reaccionen en el medio, por ello se utilizan electrodos de grafito o platino. (INEOS, 2024)

**2.1.1.3. Celda Electrolítica y sus componentes.** La celda electrolítica es el dispositivo, en donde se da el proceso de electrólisis, y está compuesta principalmente por dos electrodos: cátodo y ánodo; un electrolito que puede ser líquido o sólido y un suministro de energía eléctrica.

El cátodo, al ser electrodo negativo, es donde ocurre la reducción, mientras que el ánodo, al ser el electrodo positivo, es donde tiene lugar la oxidación. Cuando los electrodos no intervienen en dichas reacciones (es decir, ni se oxidan ni se reducen), estos son llamados electrodos inertes o pasivos, pero cuando participan se les denominan electrodos activos o de sacrificio.

Estos electrodos están conectados a una fuente de energía, como una batería o un transformador, que proporciona la corriente necesaria para impulsar la electrolisis (Moron, 2018). En otras palabras, para un proceso electrolítico, necesitamos:

- La fuente de energía eléctrica continua o un transformador de corriente alterna a corriente continua.
- Los electrodos conductores de electricidad que permitan el flujo de corriente eléctrica entre la solución o sustancia y un circuito externo. Tenemos al ánodo, donde ocurre la oxidación, y al cátodo, donde ocurre la reducción, los cuales pueden ser inertes (solo conducen la corriente eléctrica) o activos (participan en el proceso), y se encuentran en contacto con la fuente de energía, pues actúan como polos positivos y negativos.

- El Electrolito, que en otras palabras es el medio donde se conduce la corriente eléctrica mediante las fuerzas eléctricas entre los iones disueltos presentes en la solución (acuoso) o en estado fundido.
- La propia Celda electrolítica, que es en donde se realizara el proceso de la electrolisis. (Lumbreras, 2014)

Cuando son electrodos inertes y en un medio acuoso con varias sustancias, en condiciones estándar, el agente predominante que participará en el proceso de electrolisis dependerá de los potenciales de oxido-reducción, y los principios termodinámicos establecidos.

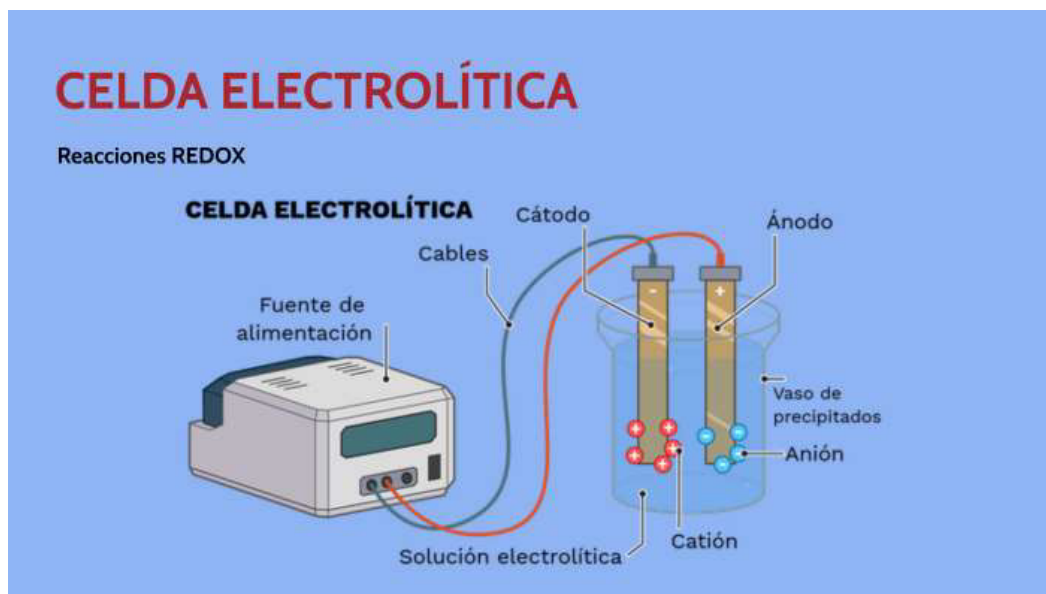
De manera práctica, tenemos: Para el caso del ánodo, en condiciones específicas, los halogenuros tienen mayor prioridad (monoatómicos), seguidos por el agua y por último los aniones poliatómicos (sulfatos, nitratos). Para el caso del cátodo, los iones de metales de transición poseen mayor prioridad (ion plata, ion cadmio), seguidos por el agua, y por ultimo los iones de metales representativos (ion sodio, ion magnesio). (Lumbreras, 2014)

Otro punto para considerar es la eficiencia del proceso que depende de varios factores, como la concentración del electrolito, movimiento de la solución, la naturaleza, forma y número de electrodos y la intensidad de la corriente aplicada. Asimismo, un control adecuado de la temperatura puede acelerar la cinética de las reacciones y aumentar la eficiencia del proceso. De igual manera, una menor distancia entre los electrodos reduce la resistencia interna de la celda, mejorando el flujo de corriente y reduciendo la cantidad de energía necesaria.

Asimismo, el diseño del sistema puede optimizar el contacto entre los electrodos y el electrolito, lo que facilita una mayor eficiencia en la transferencia de carga durante la electrólisis. Conocer estos parámetros a controlar, son necesarios para una mejor optimización del sistema a nivel industrial. (Azzouz, 2014)

## Figura 4

### *Celda electrolítica y sus componentes*



*Nota.* Obtenido de Cabrera (2023)



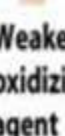
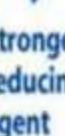
**2.1.1.4. Procesos y Reacciones químicas en Electrólisis.** Como ya se explicó, para predecir las sustancias que actuarán en las reacciones de oxidación-reducción en los procesos electrolíticos, en un medio acuoso, con diversas sustancias y electrodos activos o inertes, debemos de respetar los principios de la termodinámica y los potenciales estándar de reducción y oxidación ya establecidos universalmente, para las condiciones específicas del sistema que se tienen.

El potencial estándar mide la capacidad de una especie química de ganar o perder electrones, este se mide en relación con el electrodo estándar de hidrogeno como punto de referencia, pues su potencial redox es de 0.00V (SHE – Standard Hydrogen Electrode). Entonces, aquella sustancia con mayor potencial de reducción tendrá mayor tendencia a reducirse; y aquella sustancia con mayor potencial de oxidación tendrá tendencia a oxidarse. La suma de potenciales de las semirreacciones nos da el potencial de la celda electrolítica, que,

para una electrolisis, por ser proceso no espontáneo, es menor a cero. (Molecular Hydrogen Institute [MHI], 2023).

**Figura 5**

*Potenciales de reducción estándar a 25°C*

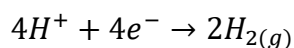
	Reduction Half-Reaction	$E^{\circ}$ (V)	
<b>Stronger oxidizing agent</b> 	$F_2(g) + 2e^- \longrightarrow 2F^-(aq)$	2.87	<b>Weaker reducing agent</b> 
	$H_2O_2(aq) + 2H^+(aq) + 2e^- \longrightarrow 2H_2O(l)$	1.78	
	$MnO_4^-(aq) + 8H^+(aq) + 5e^- \longrightarrow Mn^{2+}(aq) + 4H_2O(l)$	1.51	
	$Cl_2(g) + 2e^- \longrightarrow 2Cl^-(aq)$	1.36	
	$Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14H^+(aq) + 6e^- \longrightarrow 2Cr^{3+}(aq) + 7H_2O(l)$	1.33	
	$O_2(g) + 4H^+(aq) + 4e^- \longrightarrow 2H_2O(l)$	1.23	
	$Br_2(aq) + 2e^- \longrightarrow 2Br^-(aq)$	1.09	
	$Ag^+(aq) + e^- \longrightarrow Ag(s)$	0.80	
	$Fe^{3+}(aq) + e^- \longrightarrow Fe^{2+}(aq)$	0.77	
	$O_2(g) + 2H^+(aq) + 2e^- \longrightarrow H_2O_2(aq)$	0.70	
	$I_2(s) + 2e^- \longrightarrow 2I^-(aq)$	0.54	
	$O_2(g) + 2H_2O(l) + 4e^- \longrightarrow 4OH^-(aq)$	0.40	
	$Cu^{2+}(aq) + 2e^- \longrightarrow Cu(s)$	0.34	
	$Sn^{4+}(aq) + 2e^- \longrightarrow Sn^{2+}(aq)$	0.15	
	<b>2H<sup>+</sup>(aq) + 2e<sup>-</sup> → H<sub>2</sub>(g)</b>	<b>0</b>	
<b>Weaker oxidizing agent</b> 	$Pb^{2+}(aq) + 2e^- \longrightarrow Pb(s)$	-0.13	<b>Stronger reducing agent</b> 
$Ni^{2+}(aq) + 2e^- \longrightarrow Ni(s)$	-0.26		
$Cd^{2+}(aq) + 2e^- \longrightarrow Cd(s)$	-0.40		
$Fe^{2+}(aq) + 2e^- \longrightarrow Fe(s)$	-0.45		
$Zn^{2+}(aq) + 2e^- \longrightarrow Zn(s)$	-0.76		
$2H_2O(l) + 2e^- \longrightarrow H_2(g) + 2OH^-(aq)$	-0.83		
$Al^{3+}(aq) + 3e^- \longrightarrow Al(s)$	-1.66		
$Mg^{2+}(aq) + 2e^- \longrightarrow Mg(s)$	-2.37		
$Na^+(aq) + e^- \longrightarrow Na(s)$	-2.71		
$Li^+(aq) + e^- \longrightarrow Li(s)$	-3.04		

*Nota.* Obtenido de MHI (2023)

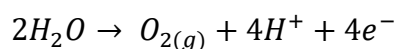
a) *Electrólisis del Agua.* La electrólisis del agua es un proceso fundamental en las celdas electrolíticas en medios acuosos, ya que permite descomponer el agua en sus componentes básicos: hidrógeno y oxígeno. Este proceso requiere el suministro de energía eléctrica para superar la estabilidad de las moléculas de agua, ya que se trata de una reacción no espontánea (Potencial o “E” de la celda es menor a 0).

En la electrólisis del agua, se utiliza una celda electrolítica con dos electrodos (un cátodo y un ánodo), sumergidos en agua, de naturaleza inerte, como el platino. Debido a la baja conductividad del agua pura, se suele añadir una pequeña cantidad de un electrolito para aumentar la salinidad, lo que mejora la conducción eléctrica. Uno de los electrolitos más comunes es el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ , 0.1M), que en concentraciones bajas aporta iones  $H^+$  y  $SO_4^{-2}$  que no interfieren con las reacciones principales. (Chang, 2002)

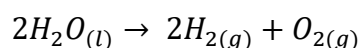
En el cátodo, se reduce el ion hidrógeno ( $H^+$ ) a gas hidrógeno ( $H_2$ ), el cual se libera en forma de burbujas.

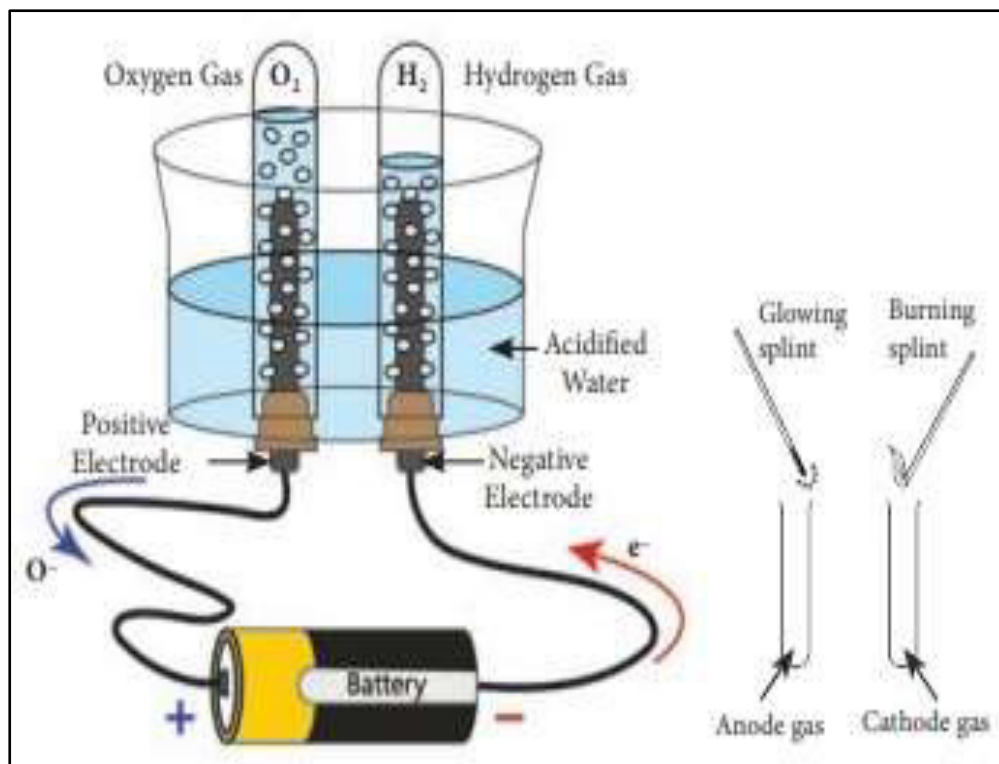


En el ánodo, el agua se oxida y se produce gas oxígeno ( $O_2$ ), que también se libera en forma de burbujas. Además, se generan protones ( $H^+$ ), que mantiene la acidez del medio.



En la ecuación global, podemos interpretar que por cada dos moléculas de agua que se descomponen, se produce dos moléculas de hidrógeno y una molécula de oxígeno.



**Figura 6***Electrólisis del agua*

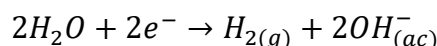
*Nota.* Obtenido de BrainKart (2021)

Se podrá observar un burbujeo en los electrodos, debido a la formación de los gases de  $H_{2(g)}$  y  $O_{2(g)}$ . No existe un consumo del  $H_2SO_4$  pues no participan en las reacciones de electrolisis debido a que el agua es más fácil oxidar que el ion sulfato, por los principios de la termodinámica ya explicados. Este proceso es importante en muchas aplicaciones industriales, pues la producción de hidrógeno se utiliza para combustibles, fuentes de energía limpia, cromatografía de gases, espectroscopia de masas, en la hidrogenación de aceites vegetales, etc. Y para la producción de oxígeno para usos medicinales, como reactante en procesos químicos; en el tratamiento de aguas residuales, como el tratamiento por oxidación avanzada, etc. (Amblab, 2023)

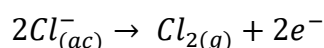
**b) *Electrólisis del cloruro de sodio en medio acuoso.*** La electrólisis del cloruro de sodio en medio acuoso es un proceso importante que se utiliza principalmente para obtener hidrógeno, cloro gaseoso e hidróxido de sodio (NaOH), también conocida como la celda cloro-álcali.

En una celda electrolítica con cloruro de sodio disuelto en agua, se aplica una corriente eléctrica para provocar las reacciones de oxidación y reducción en los electrodos. Los electrodos suelen ser inertes. El NaCl se disocia en  $Na^+$  (cationes) y  $Cl^-$  (aniones), mientras que el agua se encuentra en el medio (medio acuoso). (Lumbreras, 2014)

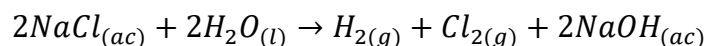
En el cátodo, se lleva a cabo la reducción, y debido a la presencia de agua, lo que predomina es la reacción de reducción del agua, en lugar de la reducción de los cationes de sodio. Esto produce hidrógeno gaseoso ( $H_2$ ) y iones hidróxido ( $OH^-$ ).

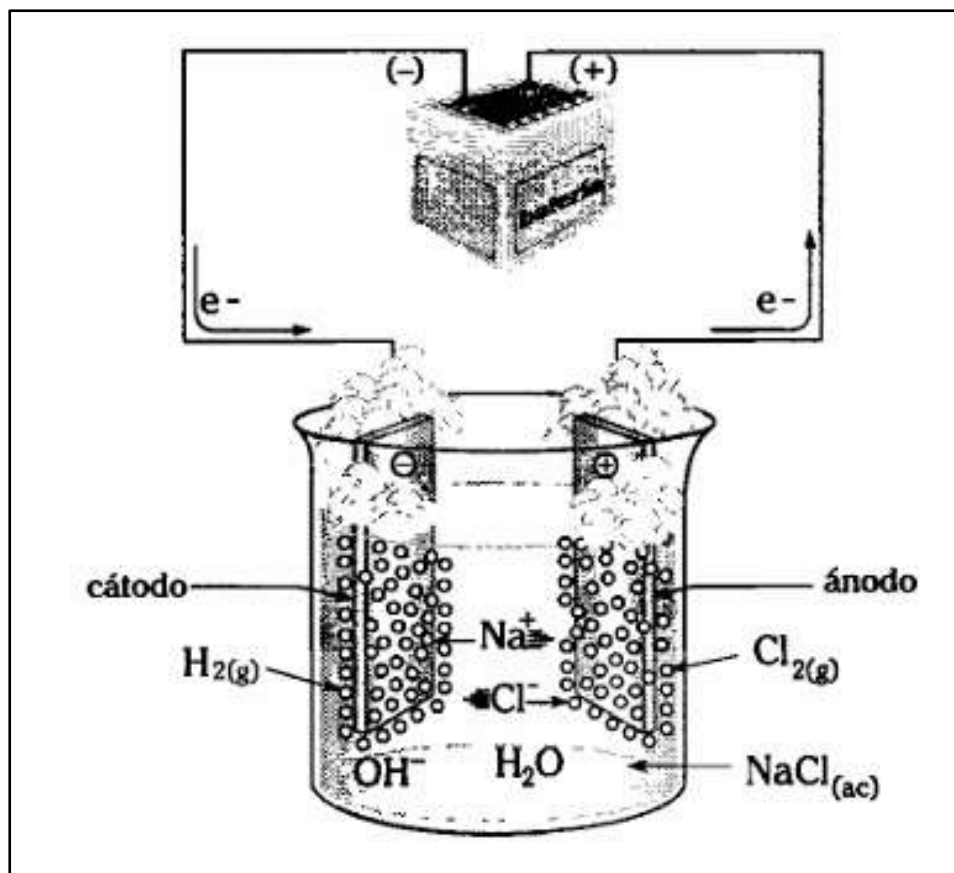


En el ánodo, los aniones de cloruro ( $Cl^-$ ) se oxidan para formar cloro gaseoso ( $Cl_2$ ). El cloro es el producto principal en este electrodo, ya que el ion cloruro se oxida con mayor facilidad que el agua.



La reacción global de la electrólisis de NaCl en agua es:



**Figura 7***Electrolisis del cloruro de sodio en medio acuoso*

*Nota.* Obtenido de Lumbreras (2014)

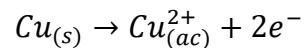
Se podrá observar un burbujeo en los electrodos, debido a la formación de los gases de  $H_{2(g)}$  y  $Cl_{2(g)}$ . En el cátodo, se forma un gas liviano, inodoro e incoloro, lo que caracteriza al  $H_{2(g)}$ . En el ánodo, se forma un gas de color amarillo-verdoso, tóxico, lo que caracteriza al  $Cl_{2(g)}$ . Este proceso electrolítico es importante en muchas aplicaciones industriales, como la producción de hidrógeno para combustibles, etc. Y la formación hidróxido de sodio (conocido como soda cáustica o lejía) para la fabricación de jabones, o reactivos de neutralización de ácidos. (OpenStax, 2012)

**c) Electro-refinación del cobre.** La electro-refinación de cobre es un proceso mediante el cual se mejora la pureza del cobre mediante la migración controlada de sus iones en una celda electrolítica, logrando un producto de alta calidad apto para el uso industrial.

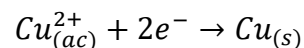
Para obtener cobre de alta pureza (99,99%), los ánodos de cobre impuro se sumergen en un baño ácido a 60-65°C, donde los iones de cobre migran hacia el cátodo, dejando las impurezas atrás. (Departamento de Ingeniería Metalúrgica [DIM], 2023)

El electrolito utilizado en este proceso es una solución acuosa de sulfato de cobre ( $CuSO_4$ ) y ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). La función de este medio es proporcionar una alta concentración de iones cobre ( $Cu^{+2}$ ), como un suministro o una reserva del ion ya establecido, facilitando las reacciones de oxidación y reducción. (Lumbreras, 2014)

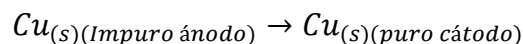
El ánodo está hecho de cobre impuro. Durante la electro-refinación, el cobre impuro se oxida, liberando iones  $Cu^{+2}$  a la solución. Este ánodo es un electrodo de sacrificio, ya que se disuelve durante el proceso, en función al tiempo transcurrido.

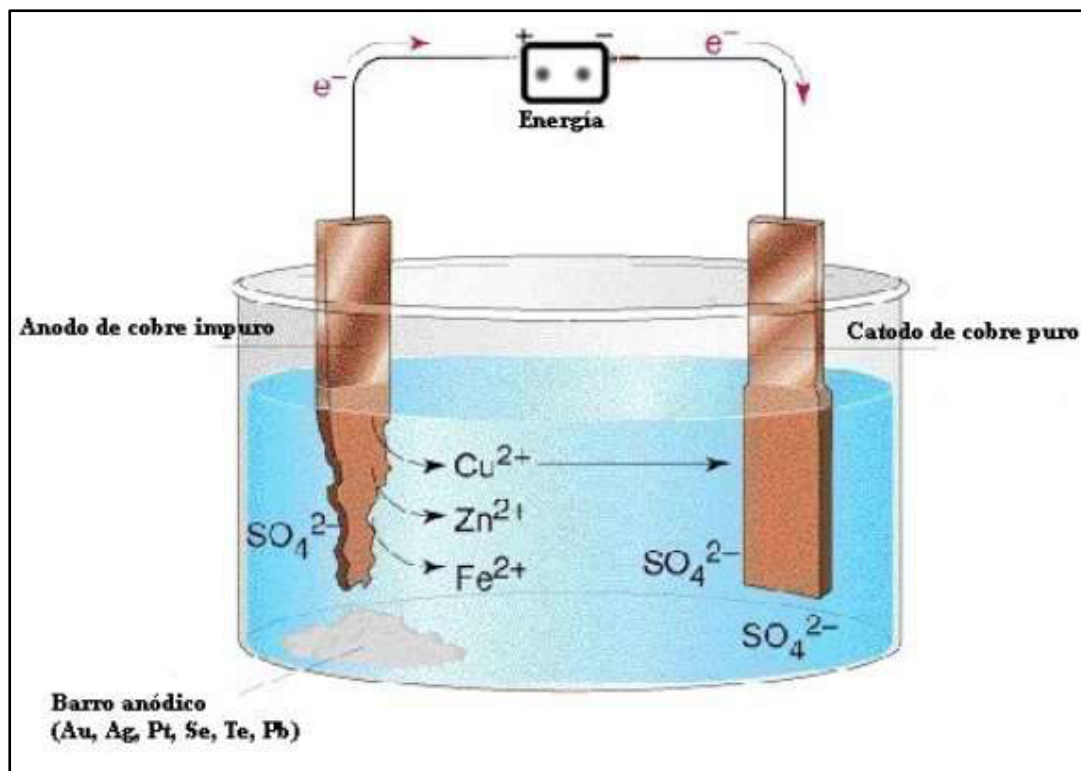


El cátodo está hecho de cobre puro sobre la cual se depositará el cobre extraído. Aquí es donde se lleva a cabo la reducción de los iones  $Cu^{+2}$ , formando cobre metálico puro (Cu).



La reacción global al sumar las semirreacciones sería:



**Figura 8***Electro-refinación del cobre*

*Nota.* Obtenido de DIM (2023)

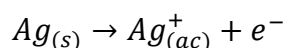
Se obtiene en el cátodo, cobre metálico de alta pureza (99.99%), también llamado cobre electrolítico o cobre de grado A, producto del cobre que se ha depositado. Este proceso es clave en la industria del cobre para obtener cobre de calidad comercial apto para aplicaciones eléctricas y electrónicas, donde se requiere una alta pureza del metal, pues son fabricados de este material, los cables eléctricos, conductores y componentes eléctricos, ya que poseen una excelente conductividad eléctrica, que es esencial para transmitir energía eléctrica y térmica de manera eficiente (B2Brazil, 2024).

En cuanto a nuestro ánodo de sacrificio, se consume, formando lodos o barros anódicos en el fondo del recipiente con las impurezas que no eran cobre, los cuales pueden ser retirados y tratados para la obtención de otros productos. (Lumbreras, 2014)

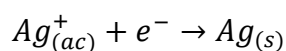
*d) Electrodeposición de plata.* Averill y Eldredge (2012) en su libro de “Principios de la Química en general v.1.0”, nos proporciona un esquema más detallado y didáctico sobre el proceso de la Electrodeposición de la plata

La electrodeposición de la plata es un proceso electroquímico en el que se deposita plata metálica a partir de una solución que contiene iones de plata. Este proceso se lleva a cabo en una celda electrolítica, generalmente utilizando un electrodo de plata, y el material q se decía recubrir, como cátodo. En este caso, la solución es acuosa y contiene nitrato de plata. Al disolverse, se disocia en iones de plata ( $Ag^+$ ) y iones de nitrato ( $NO_3^-$ ). (Averill y Eldredge, 2012)

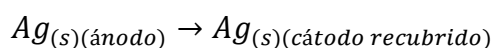
En el ánodo ocurre la oxidación, donde es el mismo ánodo (electrodo de sacrificio) de plata que se oxidara, aumentando la concentración de iones de plata en la solución, extrayendo de esta manera, plata de la implica pura (no genera lodos anódicos) o impura (genera lodos anódicos).

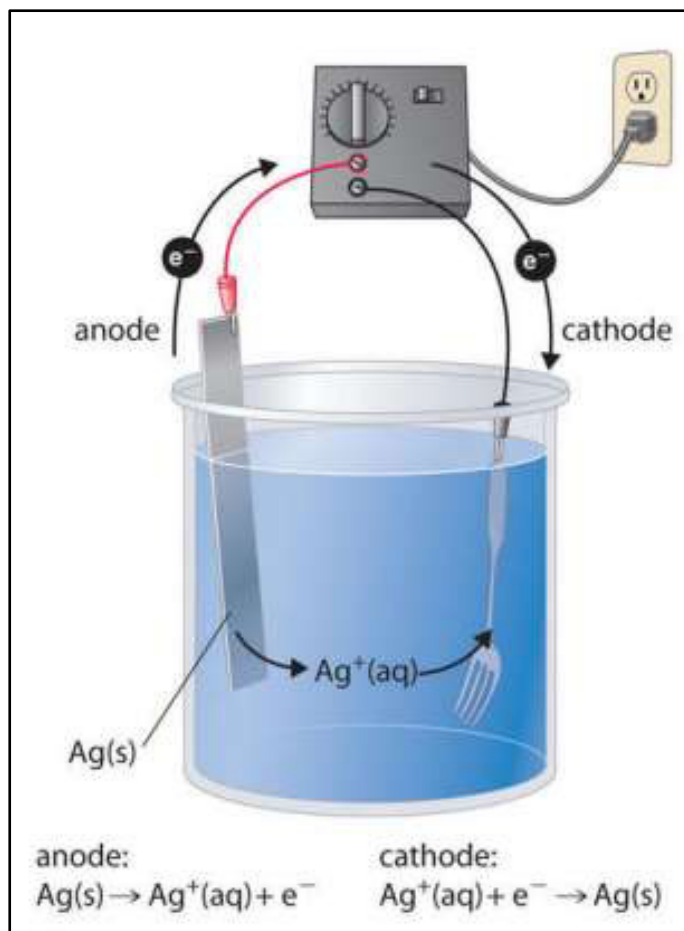


En el cátodo ocurre la reducción de los iones de plata ( $Ag^+$ ), que se depositan como plata metálica (Ag) en la superficie del cátodo, recubriendo dicho material. Por ello, a este proceso también se le denomina recubrimiento electrolítico plateado.



La reacción global



**Figura 9***Electrodeposición de plata*

*Nota.* Obtenido de Averill y Eldredge (2012)

Se obtiene un cátodo recubierto por plata pura. Nuestro ánodo de sacrificio se consume, formando lodos anódicos en el fondo del recipiente, asumiendo que no toda la placa contiene exclusivamente plata. El electro-recubrimiento o galvanizado de plata se utiliza en diversas industrias debido a sus propiedades de alta conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión y su brillo atractivo. En la industria electrónica y de telecomunicaciones, se aplica a conectores, contactos, interruptores y circuitos para mejorar la eficiencia y durabilidad. En la joyería y objetos decorativos, se usa para dar una apariencia elegante a menor costo. (JOVIAR, 2022)

**2.1.1.5. Leyes de Faraday.** Michael Faraday fue un científico reconocido, que sobresalio tanto en el campo de la física y la química a través de sus descubrimientos y aportes al conocimiento universal, en el siglo XIX. Entre estas tenemos: el descubrimiento del benceno en 1825, generación de magnetismo, luz o calor a través de la corriente eléctrica (electromagnetismo) en 1831, y sus investigaciones realizadas referente a la electroquímica en 1834, donde expuso relaciones cuantitativas, en sus llamadas “Leyes de Faraday” o “Leyes de la Electrolisis”. (Cabrera et al., 2012)

Las leyes anunciadas por Michael Faraday (1791-1867) son:

- 1) La masa que se deposita o se libera en un electrodo es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa la celda.

### Figura 10

*Primera Ley de Faraday*

$$W = \frac{I \cdot T \cdot M}{n \cdot F}$$

**Donde:**

*W* = cantidad de metal que se ha corroído o depositado [g]  
*I* = corriente [A]  
*T* = tiempo que dura el proceso [s]  
*M* = masa atómica del metal [g/mol]  
*n* = valencia del metal  
*F* = constante de Faraday = 96500 [A·s/mol]

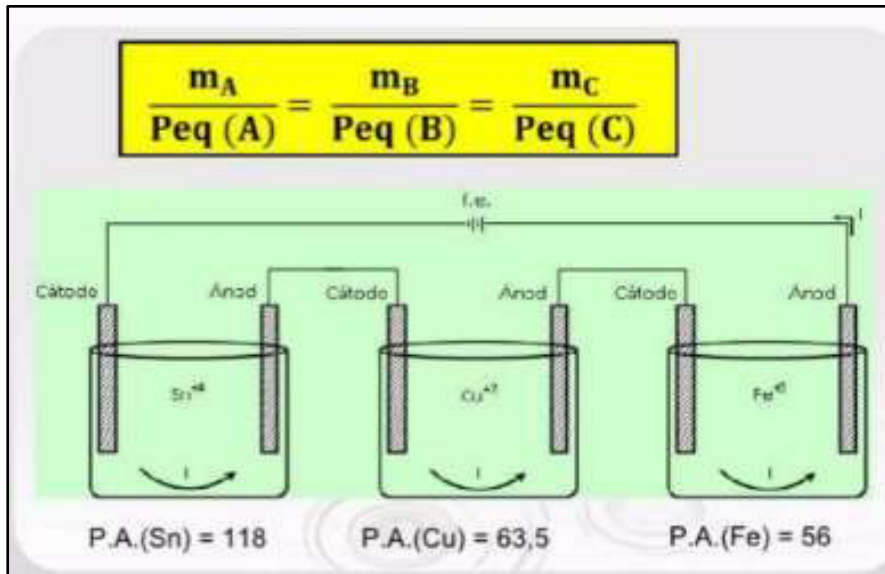
*Nota.* Obtenido de Castillo (2022)

- 2) El peso de una sustancia depositada durante la electrolisis es proporcional al peso equivalente de la sustancia cuando por el sistema pasa un Faraday.

(1 Faraday = 1 mol de electrones que se producen de la oxidación o reducción de un equivalente de sustancia).

**Figura 11**

*Segunda Ley de Faraday*



*Nota.* Obtenido de Jonathan (2017)

Las leyes de Faraday han permitido el desarrollo de tecnologías y procesos como la electrodeposición, donde se deposita un recubrimiento protector de metales como zinc o cobre sobre superficies para prevenir la corrosión, así como en la producción de baterías, celdas de combustible, productos químicos. (StudySmarter, 2022)

Además, en la actualidad, la electrocoagulación es un proceso derivado de las leyes de Faraday, para eliminar contaminantes presentes en el agua, mediante la disolución de electrodos sacrificables. Según estas leyes, la cantidad de metal disuelto en el electrodo es proporcional a la corriente aplicada, lo cual facilita la coagulación al aumentar la cantidad de iones en la solución. Esto acelera la formación de flóculos y optimiza la reacción, ya que el proceso también genera burbujas de hidrógeno en el cátodo, que ayudan a desplazar las

partículas suspendidas, reduciendo así la resistencia en el paso de corriente y mejorando la eficiencia de la coagulación. (Ojeda et al., 2012)

### 2.1.2. Aguas Residuales

Las aguas residuales son aquellas aguas cuya calidad han sido alteradas negativamente por la actividad humana, ya sea de origen doméstica, industrial, comercial, agrícola, etc. Estas aguas contienen una mezcla de compuestos orgánicos, inorgánicos y gases (componentes químicos), así como microorganismos (componentes biológicos) y contaminantes organolépticos (contaminantes físicos). Las aguas residuales requieren tratamiento antes de ser devueltas al medio natural para evitar la contaminación de cuerpos de agua y así evitar la alteración de los ecosistemas acuáticos y la transmisión de enfermedades hacia las poblaciones aledañas de los cuerpos de agua. (Lara, 2022)

**Tabla 1**

*Contaminante - Efecto en el agua*

<b>Clase de contaminante</b>	<b>Efecto</b>
Elementos traza	Salud, biota acuática, toxicidad
Metales pesados	Salud, biota acuática, toxicidad
Metales orgánicamente ligados	Transporte de metales
Contaminantes inorgánicos	Toxicidad, biota acuática
Nutrientes algales	Eutrofización
Acidez, alcalinidad, salinidad (en exceso)	Calidad del agua, vida acuática
Contaminantes orgánicos traza	Toxicidad
Bifenilos policlorados	Posibles efectos biológicos
Pesticidas	Toxicidad, biota acuática, fauna silvestre
Residuos de petróleo	Efecto sobre la fauna silvestre, estética
Aguas residuales, desechos humanos y animales	Calidad del agua, niveles de oxígeno
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	Calidad del agua, niveles de oxígeno
Patógenos	Efectos sobre la salud
Detergentes	Eutrofización, fauna silvestre, estética
Sedimentos	Calidad del agua, biota acuática, fauna

*Nota.* Obtenido de Manahan (2017)

Desde un enfoque químico - ambiental, las aguas residuales representan una preocupación crítica debido a la presencia de sustancias tóxicas, como metales pesados, compuestos orgánicos sintéticos, herbicidas e insecticidas, que contribuyen a la degradación de la calidad del agua y presentan riesgos de bioacumulación en organismos acuáticos. Además, la materia orgánica presente en estas aguas reduce el oxígeno disuelto, afectando aún más los ecosistemas acuáticos. Cuando estas aguas son vertidas al ambiente sin un tratamiento adecuado, pueden generar graves problemas de contaminación, cuya gravedad dependerá tanto de los tipos y concentraciones de contaminantes en el efluente como de los volúmenes descargados. (Manahan, 2017)

**2.1.2.1. Tipos de Aguas Residuales.** Los tipos de aguas residuales se clasifican según su origen y composición. Cada tipo de agua residual tiene características específicas que determinan los métodos más adecuados para su tratamiento. Los principales tipos de aguas residuales son:

Aguas Residuales Domésticas, son las aguas que provienen de actividades domésticas, como el uso en baños, cocinas, lavadoras, entre otros. Este tipo de agua contiene principalmente restos orgánicos (grasas, aceites, detergentes, restos de comida) y sustancias inorgánicas. Su tratamiento se enfoca en su alto contenido de microorganismos patógenos, grandes cantidades de sólidos disueltos y en suspensión, e importantes concentraciones de nitrógeno y fósforo. (Cisneros y Saucedo, 2016)

Aguas Residuales Industriales, provienen de procesos industriales y varían según la actividad específica de cada industria, que se elimina en forma de desecho. Las aguas residuales industriales pueden contener una gran variedad de contaminantes, como metales pesados, productos químicos, aceites, grasas, ácidos o bases, entre otros. La complejidad de los tratamientos depende de la industria, destacando procesos fisicoquímicos (coagulación,

floculación, neutralización) y biológicos para eliminar los contaminantes. (Cisneros y Saucedo, 2016)

Aguas Residuales Agrícolas, son aguas que provienen de actividades agrícolas y ganaderas. Contienen principalmente nutrientes como nitratos y fosfatos provenientes de pesticidas, así como fertilizantes y restos orgánicos. Estas aguas pueden causar eutrofización en cuerpos de agua si no se tratan adecuadamente, por lo que requieren de un tratamiento especializado. (OrozcoLab, 2024)

Aguas Residuales Pluviales, son las aguas provenientes de la lluvia que escurren por superficies impermeables, como techos, calles y carreteras. Estas aguas suelen arrastrar sedimentos, contaminantes orgánicos, productos químicos, aceites y restos de construcción. (OrozcoLab, 2024)

Desde una perspectiva ambiental y química, el tratamiento de cada tipo de agua residual debe adaptarse a su composición. La correcta identificación del tipo de agua residual es crucial para minimizar el impacto ambiental y garantizar la reutilización o disposición segura de estas aguas.

**2.1.2.2. Parámetros de calidad de agua.** Los parámetros de calidad de agua son indicadores que permiten evaluar el estado físico, químico, biológico y microbiológico del agua, y son fundamentales para determinar su aptitud para diversos usos, como el consumo humano, industrial o agrícola. Estos parámetros también se emplean para medir la contaminación de las aguas residuales y el éxito de los tratamientos aplicados. (InstitutoDelAgua, 2024)

Algunos de los parámetros más importantes son:

**a) Potencial de hidrógeno (pH).** El pH es un parámetro clave que mide la acidez o alcalinidad de una solución, y se define como el menos logaritmo de la concentración molar de iones hidrógeno ( $H^+$ ). Matemáticamente, el pH se expresa como:

$$pH = -\log[H^+]$$

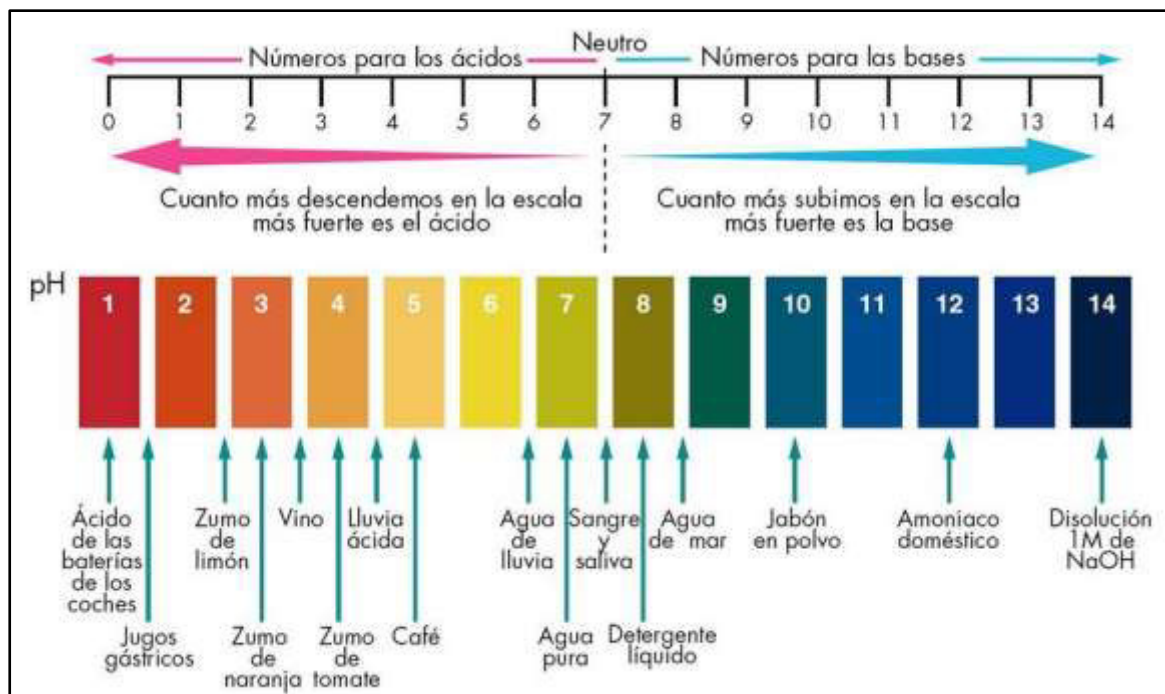
Esto significa que el pH es una medida inversa de la concentración de iones de hidrógeno en una solución. En la escala de pH, los valores van de 0 a 14, en donde un valor de pH 7 nos indica una naturaleza neutra; pH menor a 7 nos indica una naturaleza ácida (mayor concentración de iones  $H^+$ ); y un pH mayor a 7 nos indica una naturaleza alcalina o básica (menor concentración de iones  $H^+$  y mayor concentración de iones  $OH^-$ ). (ProMinent, 2021)

Los valores bajos de pH (ácidos) favorecen la proliferación de microorganismos como hongos. En medios ácidos, el uso de cloro ( $Cl_2$ ) es más efectivo porque en estas condiciones predomina el ácido hipocloroso (HOCl), que es una forma muy eficaz para la desinfección y control de patógenos.

Los valores altos de pH (alcalinos) predomina la forma no ionizada de algunos compuestos como el amoníaco ( $NH_3$ ), lo que puede resultar tóxico para la vida acuática.

El pH es un parámetro muy importante en el tratamiento de aguas residuales, pues afecta la eficiencia de varios procesos como en la desinfección por cloro, precipitación de metales, coagulación y floculación, entre otros. Para la vida acuática, el pH debe estar entre 6.5 y 8.5 para ser compatible con la mayoría de los organismos acuáticos.

En tratamientos de aguas residuales y agua potable, este rango también es el más adecuado para la mayoría de los procesos químicos y biológicos, asegurando la eficiencia del tratamiento y la protección del ambiente y la salud humana. (Romero, 2004)

**Figura 12***Escala del pH en agua*

*Nota.* Obtenido de Eurogrow (2020)

**b) Sólidos Totales (ST).** Los sólidos totales (ST) son un parámetro clave de la caracterización de aguas residuales que mide la cantidad total de materia sólida presente, tanto en forma disuelta como en suspensión. Se dividen en dos categorías principales: Los Sólidos Suspendedos Totales y los Sólidos Disueltos Totales; o por la naturaleza del contaminante, también podemos clasificarlos como Sólidos Totales Volátiles (STV) y Sólidos Totales Fijos (STF) (Quiroz et al., 2019)

Los Sólidos Suspendedos Totales (SST) son partículas sólidas que se encuentran en suspensión en el agua y no se disuelven. Su presencia puede afectar la calidad visual del agua y aumentar su turbidez. Los SST son importantes porque pueden interferir con los procesos de

desinfección, por lo que reduciría la eficiencia de algunos tratamientos. Pueden ser removidos mediante filtración. Se mide en mg/L (Montaño, 2024)

Los Sólidos Disueltos Totales (SDT) representan la cantidad de sales minerales y sustancias disueltas en el agua, en forma molecular o iónica, y no pueden ser separadas por filtración. Los tratamientos de ósmosis inversa, desionización son algunos de los métodos utilizados para reducir los SDT en las aguas residuales. Para su cuantificación, se usan métodos de evaporación o mediante la medición de la C.E. Se mide en mg/L (Montaño, 2024)

### Figura 13

Cálculo de los Sólidos Totales

$$ST \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(A - B) \times 1000}{mL \text{ de muestra}}$$

*Nota.* Obtenido de Velasquez (2020)

A: Peso de la placa con la muestra después evaporación

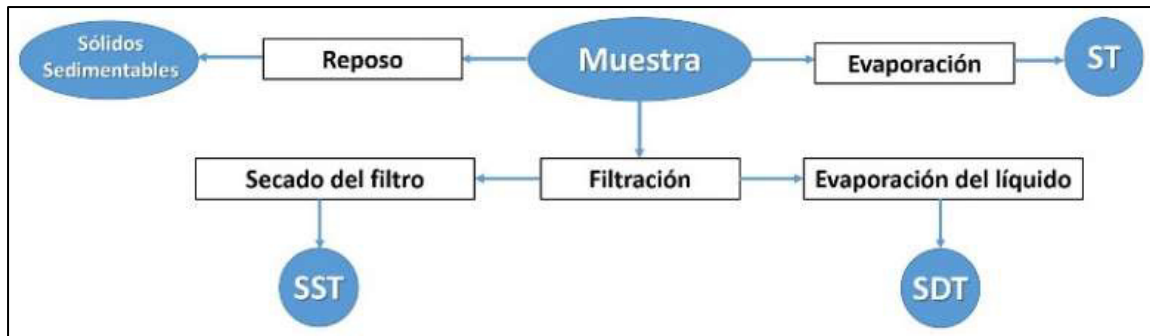
B: Peso de la placa sin la muestra

**c) Sólidos sedimentables.** El parámetro de sólidos sedimentables mide la cantidad de partículas sólidas que se depositan en el fondo de la muestra bajo condiciones de sedimentación controlada, mediante un periodo determinado de reposo. Este parámetro es importante en plantas de tratamiento de agua, pues sirve para evaluar la cantidad de lodos que se formaran de un flujo de agua residual en un sistema de tratamiento.

Se cuantifica utilizando un cono Cónico especial denominado Imhoff, donde se permite que una muestra de agua repose por un período de 1 hora, lo que permite que los sólidos más pesados se depositen en el fondo. Después de ese tiempo, se mide el volumen de sólidos acumulados en el fondo del cono. Se mide en mg/L (Velasquez, 2020)

**Figura 14**

*Procedimiento para determinar Sólidos en agua*



*Nota.* Obtenido de Velasquez (2020)

**d) Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO).** La DBO mide la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable presente en el agua, en condiciones aerobias. Es un indicador clave de la contaminación orgánica. A mayor DBO, mayor es la carga contaminante orgánica del agua, y este parámetro se utiliza frecuentemente para diseñar sistemas de tratamiento biológico, evaluar la eficiencia de los procesos de tratamientos, especialmente los biológicos; y para fijar cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras. Se mide en  $\text{mgO}_2/\text{L}$  (Romero, 2004)

**Figura 15**

*Cálculo para la determinación de DBO*

$$DBO_5 = (T_0 - T_5) * (D_0 - D_5) * (F-1)$$

$T_0$  = oxígeno disuelto inicial en la muestra.

$T_5$  = oxígeno disuelto a los 5 días en la muestra.

$D_0$  = oxígeno disuelto inicial en el blanco.

$D_5$  = oxígeno disuelto a los 5 días en el blanco.

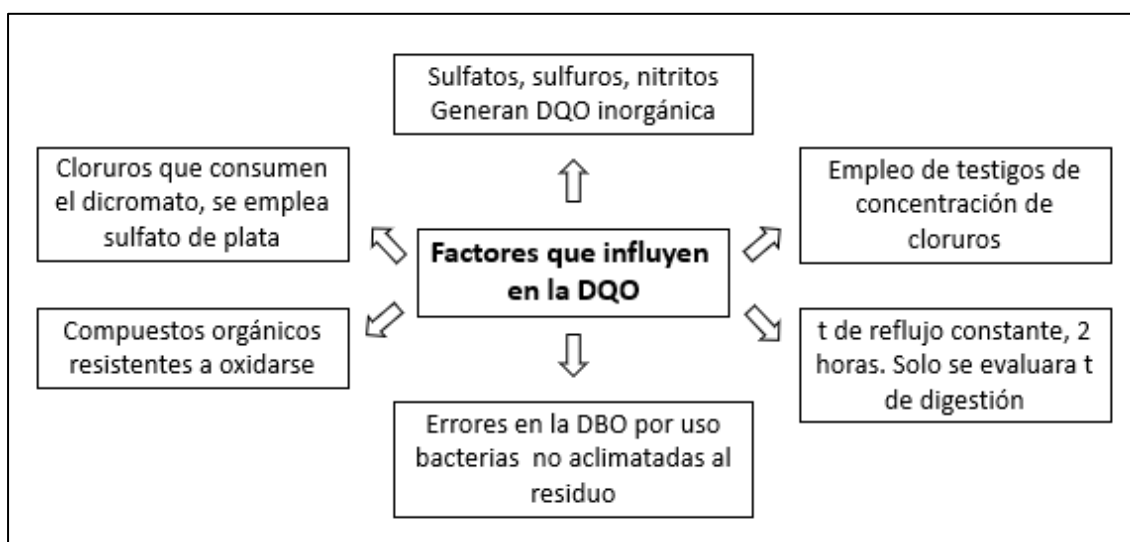
$F$  = factor de dilución.

*Nota.* Obtenido de Ambientum (2022)

**e) Demanda Química de Oxígeno (DQO).** La DQO (Demanda Química de Oxígeno) cuantifica la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica en el agua mediante un oxidante fuerte. Generalmente, se utiliza dicromato de potasio en un entorno con pH bajo, alta temperatura y un catalizador como el sulfato de plata, para tratar posibles compuestos orgánicos difíciles de oxidar. Este parámetro es crucial en el tratamiento de aguas residuales, tanto industriales como domésticas. Idealmente, el valor de la DQO debería aproximarse al de la DBO final, pero varios factores impiden esto. Se mide en  $\text{mgO}_2/\text{L}$  (Romero, 2004)

**Figura 16**

*Factores que influyen en la DQO*



*Nota.* Obtenido de Romero (2004)

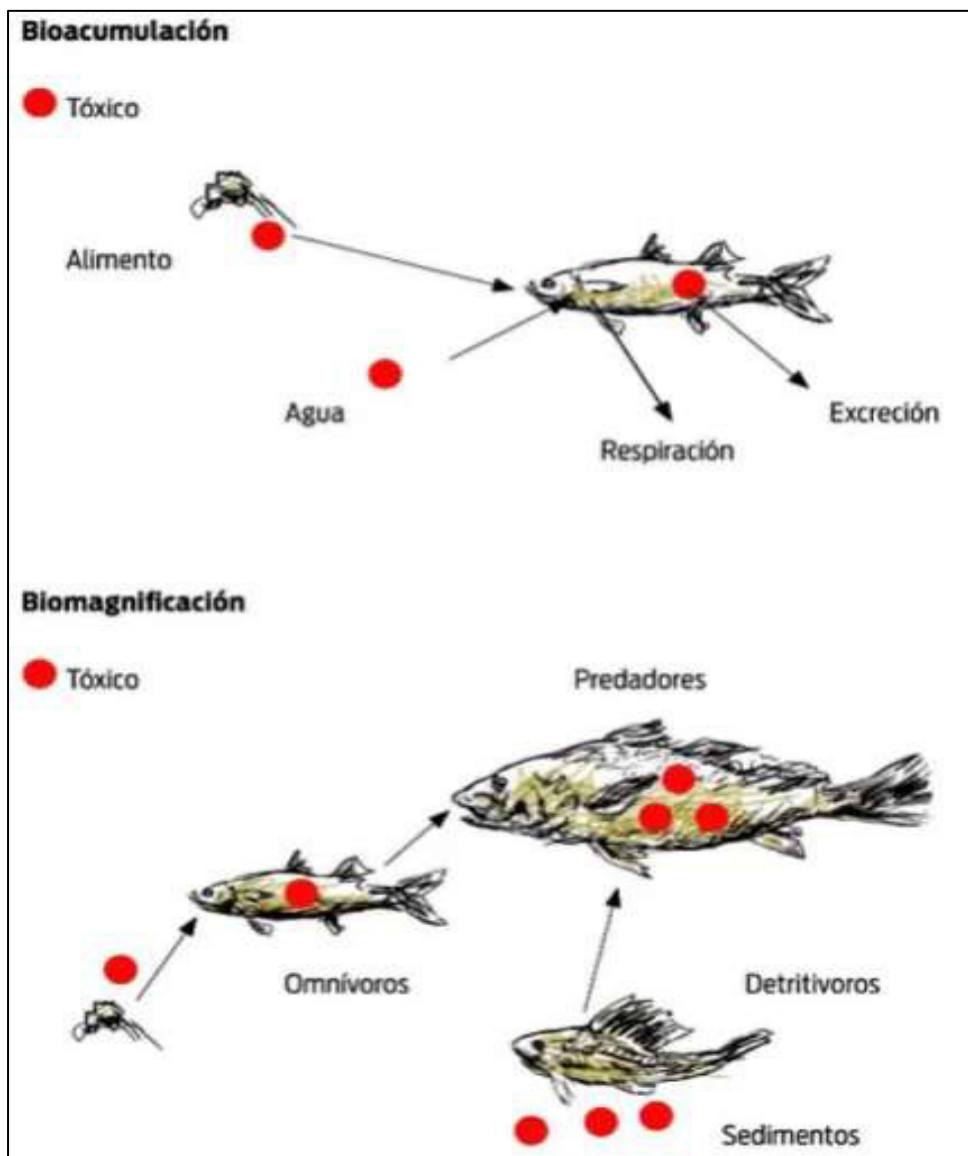
**f) Metales Pesados.** El parámetro de metales pesados en la calidad del agua se refiere a la concentración de elementos metálicos que, en cantidades elevadas, son todos tóxicos para los seres vivos. Mide la cantidad de metales pesados presentes en una muestra, como agua o suelo, expresada en miligramos por litro ( $\text{mg/L}$ ) o partes por millón (ppm). Entre los metales pesados más comunes en aguas residuales y cuerpos de agua incluyen el plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), y zinc (Zn). Estos metales no se

degradan fácilmente en el ambiente, por lo que tienden a bioacumularse en cadena alimenticia de organismos vivos (especialmente Hg, Cd y Pb) afectando la salud humana y los ecosistemas. Se mide en mg/L (Romero, 2004)

Entonces, la concentración de cromo total se refiere a la cantidad de cromo presente en una muestra, generalmente expresada en mg/L o ppm.

**Figura 17**

*Bioacumulación y biomagnificación de metales pesados*



*Nota.* Obtenido de Lagos (2018)

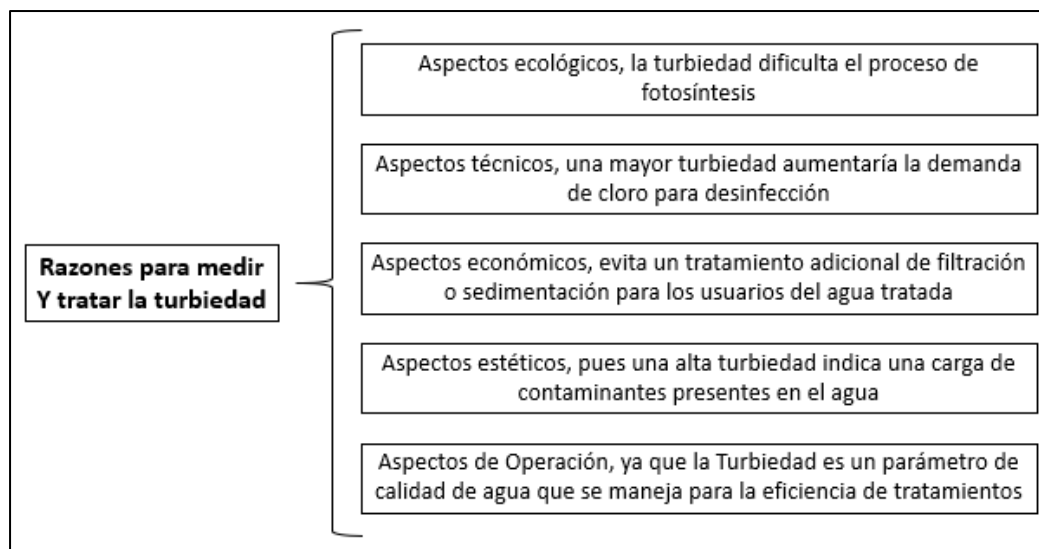
**g) Temperatura.** El parámetro temperatura en el contexto de la calidad del agua tiene una influencia significativa sobre la salud del ecosistema acuático y la eficiencia de los procesos de tratamiento de agua.

Aunque no es un indicador comúnmente utilizado para medir la calidad del agua directamente, la temperatura afecta diversos aspectos clave:

- La solubilidad del oxígeno, pues medida que la temperatura del agua aumenta, la solubilidad del oxígeno disminuye, lo que puede afectar negativamente a los organismos acuáticos
- La actividad biológica, ya que las bacterias y otros microorganismos encargados de descomponer materia orgánica o de participar en procesos de tratamiento biológico incrementan su actividad a temperaturas más altas, acelerando reacciones biológicas.
- Velocidad de reacciones químicas, generalmente, a mayor temperatura, las reacciones ocurren más rápidamente. Por ejemplo, las tasas de coagulación y floculación son más eficientes en aguas a temperatura óptima, mientras que el agua fría puede requerir mayor cantidad de productos químicos. (Drinan, 2001)

**h) Turbidez.** La turbidez se refiere a la opacidad del agua causada por la presencia de partículas suspendidas que reflejan la luz proyectada hacia sus volúmenes específicos, y lo interpretamos mediante nuestro sentido óptico. Un agua muy turbia puede ser un indicativo de contaminación por sólidos en suspensión o microorganismos.

La alta turbidez también puede interferir con los procesos de desinfección. Se mide en unidades nefelométricas de turbiedad o NTU. (Quiroz et al., 2019)

**Figura 18***Razones para medir y tratar la turbiedad*

*Nota.* Obtenido de Quiroz et al. (2019)

**i) Conductividad Eléctrica.** La conductividad mide la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica, lo cual está directamente relacionado con la concentración de sales disueltas en ella. Es un indicador útil para monitorear la contaminación por sales y otros electrolitos en el agua y varía en gran medida por la temperatura del agua. Se encuentra relacionado al parámetro de salinidad. Se mide en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (Solis et al., 2017)

**j) Salinidad.** La salinidad es un parámetro que mide la concentración de sales disueltas en el agua, principalmente de iones como sodio ( $\text{Na}^+$ ), cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Se encuentra altamente relacionado al parámetro de conductividad eléctrica. Se mide en  $\text{mg}/\text{L}$  o en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por su relación a la conductividad eléctrica. (Hanna, 2020)

**k) Oxígeno Disuelto.** El OD mide la cantidad de oxígeno disponible en el agua para los organismos acuáticos. Bajos niveles de oxígeno disuelto indican un alto grado de contaminación orgánica lo que limita la capacidad autopurificadora de los cuerpos de agua, lo

que puede provocar la muerte de la biota acuática. La concentración de saturación OD depende de la temperatura, presión atmosférica y la salinidad del agua. Esta es una variable que se maneja en el diseño, operación y control, en procesos de tratamientos de aguas, por ejemplo, en procesos aeróbicos que involucren suministro de oxígeno, como los tanques de aireación, en donde es vital conocer esta variable. Se mide en mg/L (Romero, 2004)

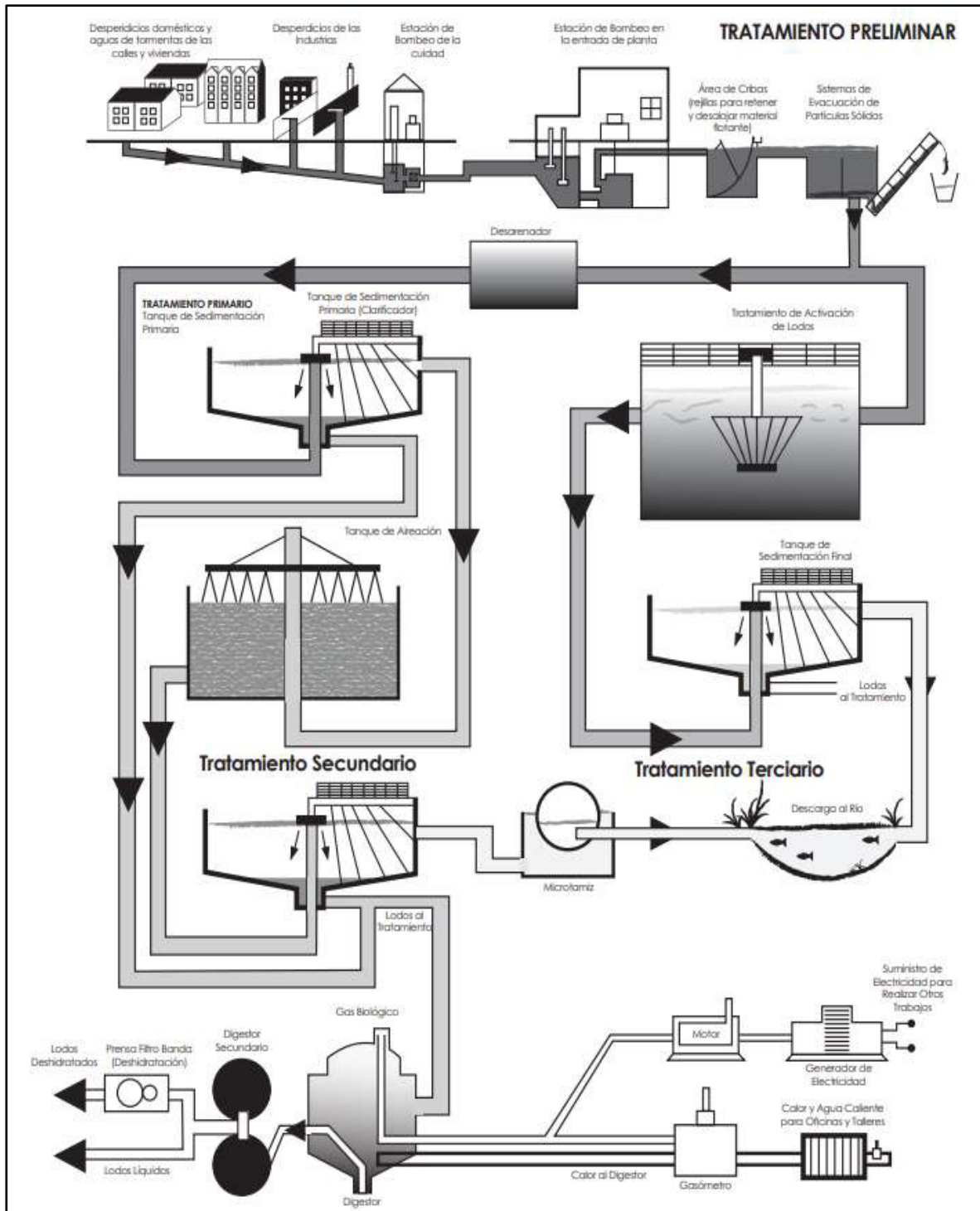
**2.1.2.3. Fases del Tratamiento de Aguas Residuales.** El tratamiento de aguas residuales es un proceso que busca eliminar o reducir los contaminantes presentes en el agua, haciéndola apta para su reutilización o vertido sin dañar el medio ambiente (Bonilla et al., 2022). Tenemos las siguientes fases:

- **Pretratamiento**, cuyo objetivo es separar material flotante que, por su naturaleza o tamaño, podrían dañar el equipo o interferir con las fases posteriores, mediante una serie de operaciones físicas y mecánicas. Incluye procesos como desbaste, tamizado, desarenado y desengrasado (Fundación Ecología y Desarrollo [ECODES], 2008).
- **Tratamiento Primario**, en donde se eliminan los sólidos suspendidos más finos y algunas grasas, aceites, partículas sedimentables y reducción de ciertos contaminantes biodegradables, debido a la materia orgánica que constituye algunos sólidos. Este tratamiento es principalmente fisicoquímico. Las aguas residuales pasan por decantadores o sedimentadores (Decantación primaria), donde las partículas más pesadas se hunden al fondo (sedimentación), por acción de la gravedad. También pueden emplearse productos químicos (coagulantes y floculantes) para aglomerar partículas pequeñas y facilitar su eliminación, lo que constituiría un proceso fisicoquímico. Los tratamientos fisicoquímicos se aplican principalmente en aguas residuales industriales cuya constitución podría afectar el tratamiento biológico. (Ecodes, 2008)

- **Tratamiento Secundario**, es una fase principalmente biológica y tiene como objetivo eliminar la materia orgánica disuelta mediante microorganismos que degradan los compuestos orgánicos en el agua mediante procesos aerobios (presencia de oxígeno) o anaerobios (ausencia de oxígeno). Entre estos tenemos lodos activos, filtros percoladores, lagunas de estabilización. (Bonilla et al., 2022)
- **Tratamiento terciario**, también conocidos como los tratamientos avanzados o complementarios, implica un proceso avanzado donde se busca eliminar contaminantes específicos que no se han eliminado en fases anteriores, como nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados, y otros contaminantes emergentes para la obtención de un efluente final de mejor calidad, que podrían ser reutilizados en el proceso productivo. Dependiendo del contaminante en específico a tratar, podemos tener membranas de ultrafiltración, osmosis inversa, desinfección por radiación UV, cloración, ozonización, entre otros. Se repiten procesos fisicoquímicos o biológicos ya utilizados anteriormente. (Ecodes, 2008)

Figura 19

## Fases del tratamiento de aguas residuales



Nota. Obtenido de Belzona (2010)

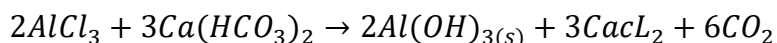
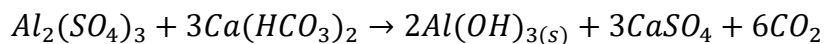
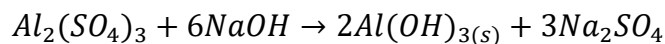
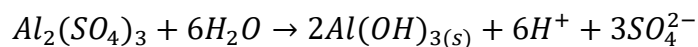
#### 2.1.2.4. Procesos Físicos y Fisicoquímicos en Tratamiento de Aguas Residuales.

Los tratamientos fisicoquímicos en el tratamiento primario de aguas residuales tienen como objetivo remover contaminantes mediante la aplicación de procesos físicos y químicos, facilitando la separación de sólidos, aceites, grasas, y algunos compuestos disueltos. A continuación, se detallan algunos de los principales procedimientos, con énfasis en aquellos relacionados con la electrocoagulación:

*a) Coagulación y floculación.* La coagulación es un proceso donde se adicionan productos químicos (coagulantes), tales como el sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  o el cloruro férrico  $FeCl_3$  (en general, sales de aluminio y hierro) para neutralizar las cargas de las partículas finas suspendidas (coloides) en el agua. Al neutralizar estas cargas, las partículas se acercan entre sí y empiezan a formar pequeños agregados. Después de la coagulación, ocurre la floculación, en este proceso, se mezclan suavemente los agregados formados durante la coagulación para que se unan en grupos más grandes y fácilmente separables, denominados flóculos. Este paso requiere agitación lenta y controlada para que los flóculos no se rompan (usualmente paletas rotantes como agitadores). Una vez que los flóculos han crecido lo suficiente, pueden ser retirados del agua por sedimentación, filtración o flotación. (Belzona, 2010)

La reacción de los coagulantes se da de la siguiente manera: Cuando se añaden las sales de hierro y aluminio, como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, reaccionan con el agua y con agentes alcalinos presentes en el medio, como el hidróxido de sodio (NaOH) o el bicarbonato de calcio ( $Ca(HCO_3)_2$ ). Estas reacciones generan hidróxidos insolubles, como el hidróxido de aluminio ( $Al(OH)_3$ ) y el hidróxido de hierro ( $Fe(OH)_3$ ), que actúan como floculantes. Estos hidróxidos ayudan a atrapar las partículas suspendidas y permiten que estas

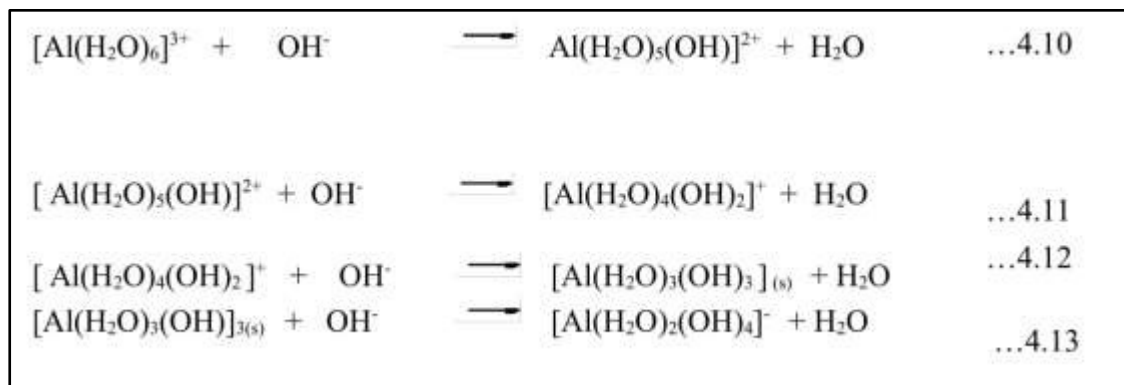
se sedimenten. Por ejemplo, en el caso del sulfato de aluminio, tenemos las siguientes reacciones (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua [CIDTA], 2021):



En caso de usar sales férricas, ocurriría las mismas reacciones, pero con el hierro. Cabe mencionar, que este puede ser la interpretación más simple pero válida que ocurre en la coagulación y floculación, pero en sí, esto se encuentra basado en la formación de dímeros, producto de la polimerización de los poli-hidroxocomplejos de aluminio o hierro que se forman por la hidratación en disolución acuosa de estos iones respectivamente, que son los responsables directos de la coagulación. (Quiroz et al., 2019)

### Figura 20

*Formación de poli-hidroxocomplejos de Aluminio*



*Nota.* Obtenido de Quiroz et al. (2019)

Según Quiroz et al. (2019), en su libro “Tratamiento de agua y aguas residuales”, los factores que influyen en la coagulación y floculación son:

- pH: Es crucial, ya que controla la solubilidad de los coagulantes y la formación de hidróxidos metálicos, los cuales ayudan a la agregación de partículas
- Tipo y concentración de coagulante: La efectividad del proceso depende del tipo de coagulante (por ejemplo, sulfato de aluminio, cloruro férrico) y de la concentración usada, que debe ajustarse según la calidad del agua a tratar y las características de las partículas en suspensión.
- Temperatura: Afecta la velocidad de las reacciones químicas y la eficiencia del proceso de coagulación, dado que a temperaturas más bajas la solubilidad y la velocidad de reacción disminuyen; y en la floculación, a temperaturas bajas, mayor tiempo de floculación y mayor dosis de coagulante o floculante.
- Características del agua: Agua con una turbiedad mayor, dificulta el proceso de floculación. En otras palabras, la cantidad de partículas en suspensión influye en la dosis necesaria de coagulante para lograr una adecuada formación de flóculos.
- Empleo de floculantes o ayudantes en el proceso: Productos químicos que facilitaran el proceso de la floculación y, por ende, en la sedimentación, filtración o flotación. (Quiroz et al., 2019)

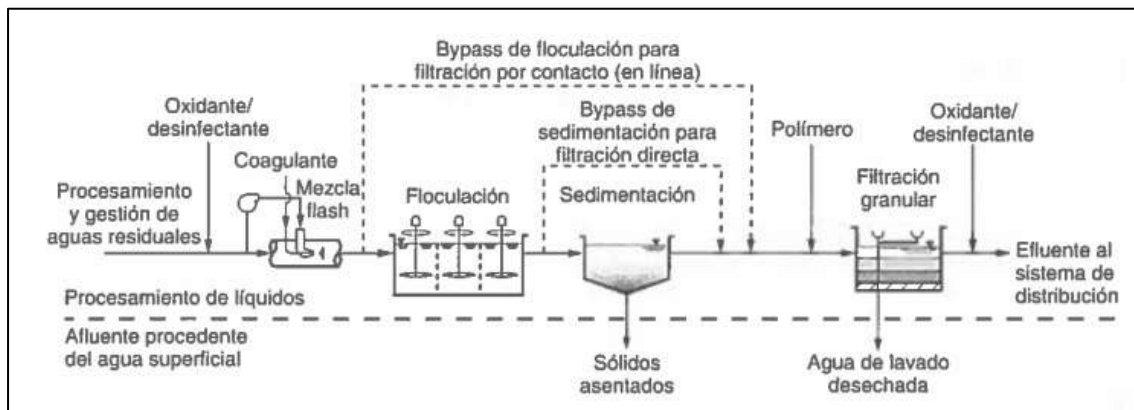
Según Howe et al. (2017), en su libro “Principios del tratamiento del agua”, los aspectos a considerar en el diseño de un sistema de coagulación-floculación son:

- Intensidad del mezclado: La coagulación requiere una mezcla rápida e intensa para dispersar bien el coagulante y que las partículas se desestabilicen.
- Tiempo de floculación: El agua debe permanecer un tiempo suficiente en los tanques de floculación para que los flóculos crezcan hasta un tamaño que pueda ser removido.

- La selección del proceso de separación líquido-sólido: Dependiendo de las características del efluente y los flocúlos formados, se selecciona el método más adecuado, como sedimentación, filtración o flotación.
- Naturaleza del coagulante: Diferentes coagulantes tienen distintas capacidades para neutralizar cargas y formar flocúlos. La elección del coagulante dependerá del tipo de agua y los contaminantes presentes. (Howe et al., 2017)

**Figura 21**

*Diagrama de flujo del proceso de Coagulación y Floculación*



*Nota.* Obtenido de Howe et al. (2017)

**b) Flotación.** La flotación es otro método fisicoquímico donde las partículas suspendidas, aceites o grasas (materia suspendida) se separan del agua al hacerlas flotar. Este proceso utiliza burbujas de aire que se adhieren a la materia suspendida, haciendo que asciendan a la superficie donde se pueden retirar. (Belzona, 2010)

**c) Sedimentación Primaria.** La sedimentación primaria es un proceso físico fundamental en el tratamiento de aguas residuales, que permite la evacuación de materia sólida presente en el agua mediante la acción de la gravedad. Durante este proceso, las partículas más densas que el agua se hunden lentamente hacia el fondo de tanques de sedimentación primaria, formando un lodo primario o un lodo crudo, que puede ser retirado y mandados hacia una

planta de asimilación de lodos. Esto puede ser complementado con un tanque de sedimentación secundaria. (Belzona, 2010)

**d) Precipitación química.** La precipitación química se utiliza para eliminar compuestos disueltos, como los metales pesados, fluoruro, sulfatos, mediante la adición de reactivos químicos que provocan la formación de sólidos insolubles, así como también para tratar la dureza del agua como técnica de ablandamiento. (Pochteca, 2022)

**e) Oxidación Avanzada.** Es un proceso fisicoquímico porque involucra reacciones químicas (generación de radicales altamente reactivos,  $OH^-$ ) que inducen cambios físicos en los contaminantes. Estas reacciones químicas permiten la eliminación de contaminantes orgánicos resistentes como contaminantes químicos orgánicos sintéticos. (Howe et al., 2017)

### **2.1.3. Electrocoagulación**

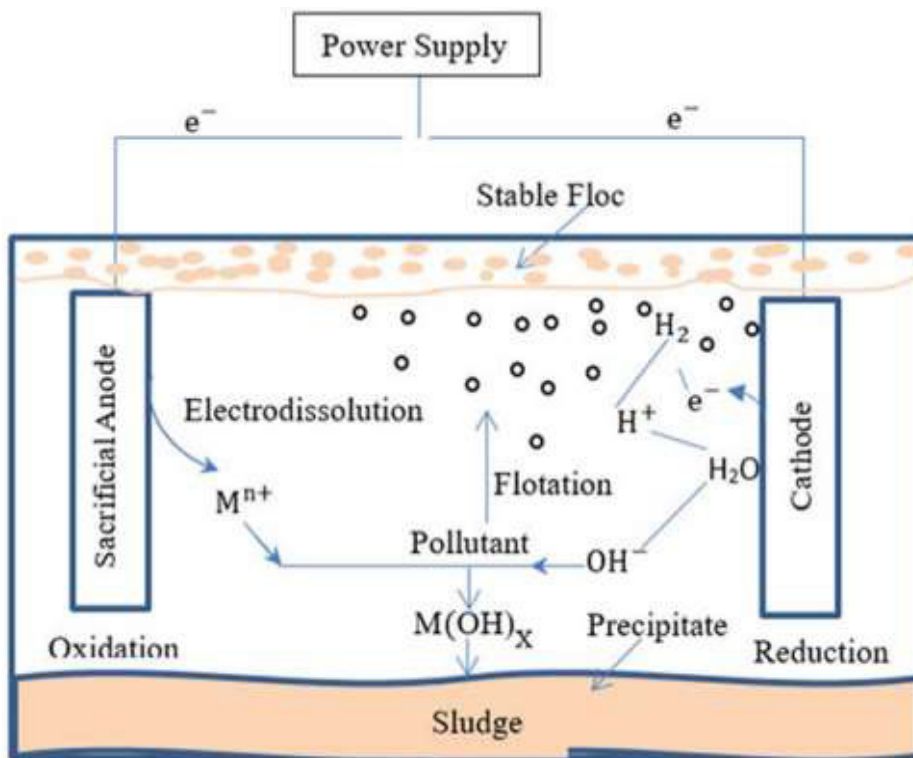
La electrocoagulación es un proceso electroquímico que combina principios de la coagulación química y electrólisis, permite la generación in situ de coagulantes mediante la disolución controlada de electrodos metálicos, sin la necesidad de agregar agentes químicos externos. Asimismo, el material floculado del agua puede ser removido por el efecto de las reacciones químicas que se dan en el proceso, como la liberación de gases que producen una flotación espontánea.

Pero estas reacciones químicas también pueden producir efectos adversos como lo sería la formación de lodos por la misma deposición de sales, que se pueden acentuar en el fondo o en los mismos electrodos, disminuyendo la eficiencia del proceso. (Vepsalainen, 2012)

**2.1.3.1. Principios de la electrocoagulación.** La electrocoagulación (EC) es un proceso electroquímico que combina principios de la coagulación química convencional con la electrolisis, basado en la disolución de un electrodo metálico – Ánodo de Sacrificio, generalmente de aluminio o hierro (u otros metales), bajo una corriente continua aplicada. Esta corriente induce la liberación de iones metálicos en el ánodo y sus especies complejadas con el ion hidróxido dependiendo de las condiciones del pH, los cuales actúan como coagulantes en la solución, desestabilizando las partículas suspendidas mediante la neutralización de cargas eléctricas, y promoviendo la formación de compuestos insolubles al reaccionar con aniones presentes. Además, la simultánea reacción catódica produce hidrógeno gaseoso (burbujas) que facilita la electroflotación de contaminantes sólidos y emulsionados, promoviendo su separación hacia la superficie. (Garcia et al., 2017)

**Figura 22**

*Celda de Electrocoagulación*

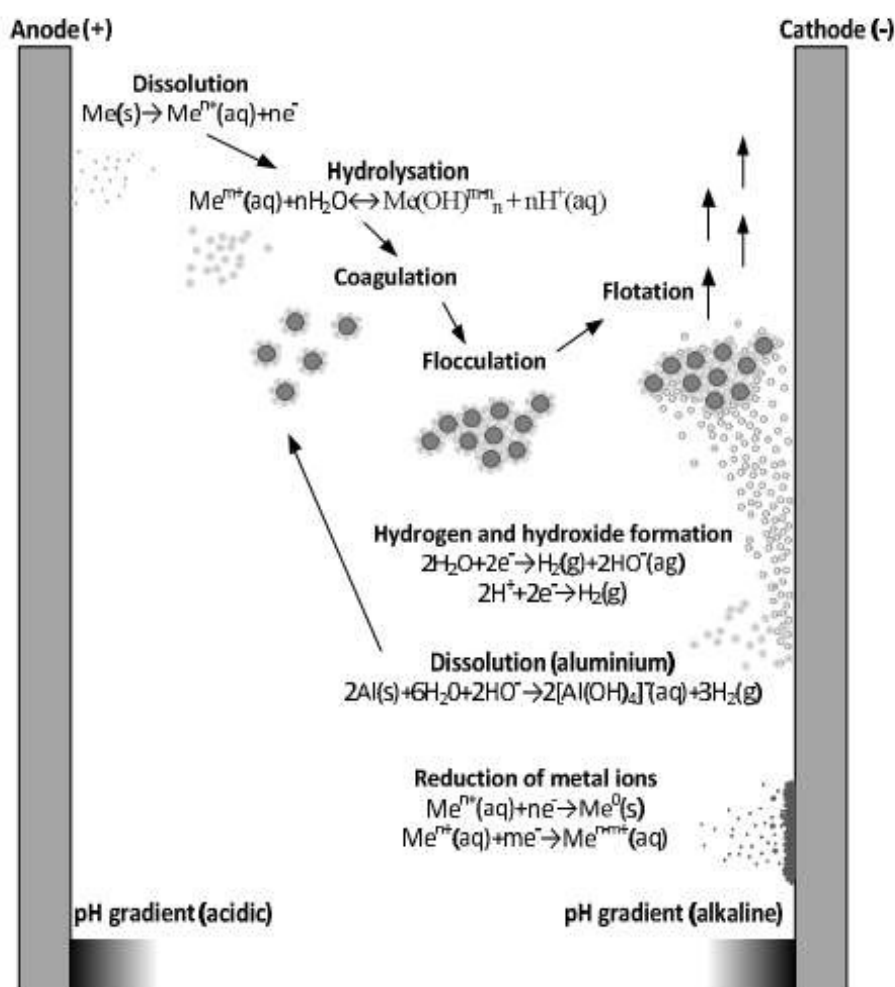


*Nota.* Obtenido de Drogui et al. (2022)

En la electrocoagulación también se genera hidróxidos de hierro o aluminio que poseen alta capacidad de sorción, los cuales permiten la eliminación de impurezas disueltas, y evita el enriquecimiento del efluente con aniones adicionales, manteniendo estable el contenido de sal en comparación con la coagulación química tradicional. Los principales mecanismos involucrados incluyen neutralización de cargas, precipitación química y flotación, haciendo de la electrocoagulación, una técnica eficaz para tratar contaminantes como metales pesados, materia orgánica e inorgánica, partículas en suspensión y compuestos orgánicos. (Droguet et al., 2022)

**Figura 23**

*Reacciones típicas en la electrocoagulación*



*Nota.* Obtenido de Vepsalainen (2012)

Figura 24

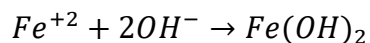
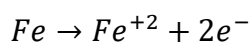
Reacciones específicas en electrodos de Aluminio y Hierro

Metal electrodes	Condition	Reactions		Overall reaction
		Anode	Cathode	
Aluminum anode (mechanism 1 or 2)	Alkaline	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	$3\text{H}_2\text{O} + 3\text{e}^- \rightarrow 3/2 \text{H}_2 + 3\text{OH}^-$	$2\text{Al} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2$
	Acid	$\text{Al}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3$ $\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$		
Iron anode (Mechanism1)	Alkaline	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	$8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow 4\text{H}_2$	$4\text{Fe} + 10\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3 + 4\text{H}_2$
	Acid	$\text{Fe}^{2+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ $4 \text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}^{3+} + 4\text{OH}^-$		

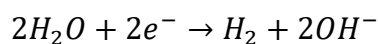
Nota. Obtenido de Drogui et al. (2022)

Según Drogui et al. (2022), el otro mecanismo que podría ocurrir para las reacciones en con Hierro ferroso, sería:

En el Ánodo:



En el Cátodo:



La reacción global sería:

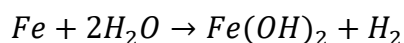
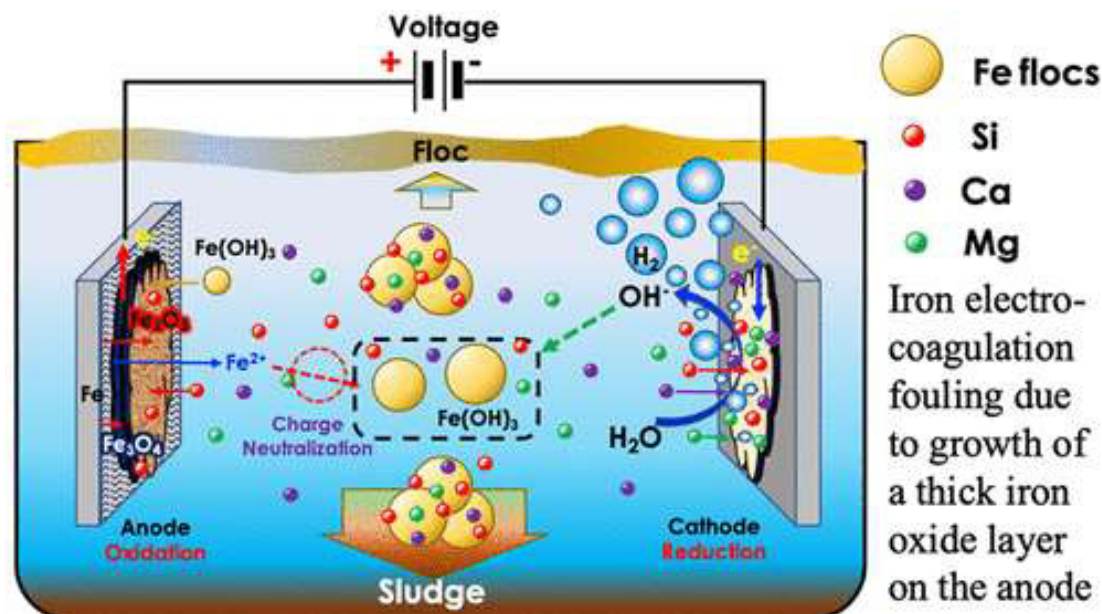


Figura 25

Celda de Electrocoagulación con ánodo de Hierro



Nota. Obtenido de Gug et al. (2024)

### 2.1.3.2. Factores que influyen en la electrocoagulación.

a) **Parámetros Operacionales.** Los parámetros operacionales incluyen aspectos como la densidad de corriente, el tiempo de tratamiento, y el pH del sistema y la Temperatura

La densidad de corriente es esencial, ya que influye directamente en la cantidad de coagulante liberado desde el electrodo. A mayor densidad de corriente, mayor cantidad de reacciones electroquímicas, mayor cantidad de iones metálicos liberados, lo que generalmente mejora la coagulación, pero también puede aumentar el consumo de energía y provocar una disolución rápida de los electrodos. (Arango, 2012)

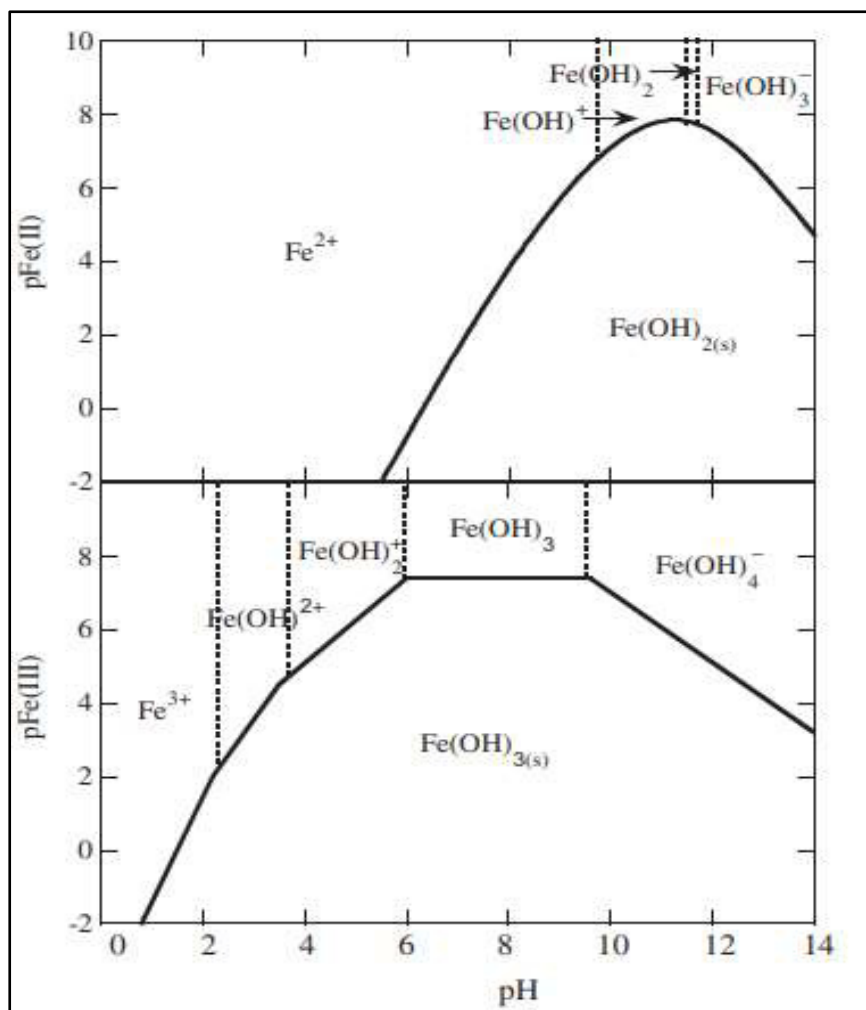
El tiempo de tratamiento está relacionado con la cantidad de coagulantes producidos y la exposición del agua a los coagulantes formados. Un tiempo insuficiente puede resultar en una baja eficiencia en la remoción de contaminantes, mientras que tiempos excesivos pueden ser innecesarios y costosos. (Vepsalainen, 2012)

El pH, por otro lado, puede afectar la solubilidad de los iones metálicos liberados y su capacidad de formar hidróxidos (hidróxidos metálicos), que son clave para la coagulación. Normalmente, un pH cercano a la neutralidad es ideal para obtener una eficiencia óptima. (Arango, 2012)

La temperatura se encuentra relacionada a la formación de flóculos, la velocidad de reacción y a la conductividad. No siempre un aumento de la temperatura producirá un aumento en la eficiencia, y hay q considerar el costo que conlleva. (Vepsalainen, 2012)

**Figura 26**

*Zonas de predominio de especies de Hierro en función al pH*



*Nota.* Obtenido de Garcia (2017)

**b) Condiciones del Agua Residual.** Las propiedades del agua residual a tratar, tales como la concentración de contaminantes o la conductividad también influyen en el proceso. Las aguas con alta concentración de contaminantes requieren una mayor cantidad de coagulantes, lo que aumenta la necesidad de energía y tiempo. Por otro lado, la conductividad del agua es crucial para la eficiencia eléctrica del proceso. A mayor conductividad, se mejora el flujo de corriente, lo que facilita la generación de coagulantes, mientras que en aguas de baja conductividad se puede requerir el uso de electrolitos adicionales como NaCl o  $Na_2SO_4$ , por lo que el control de esta variable podría significar reducción en costos y un aumento de la eficiencia del proceso. (Drogui et al., 2022)

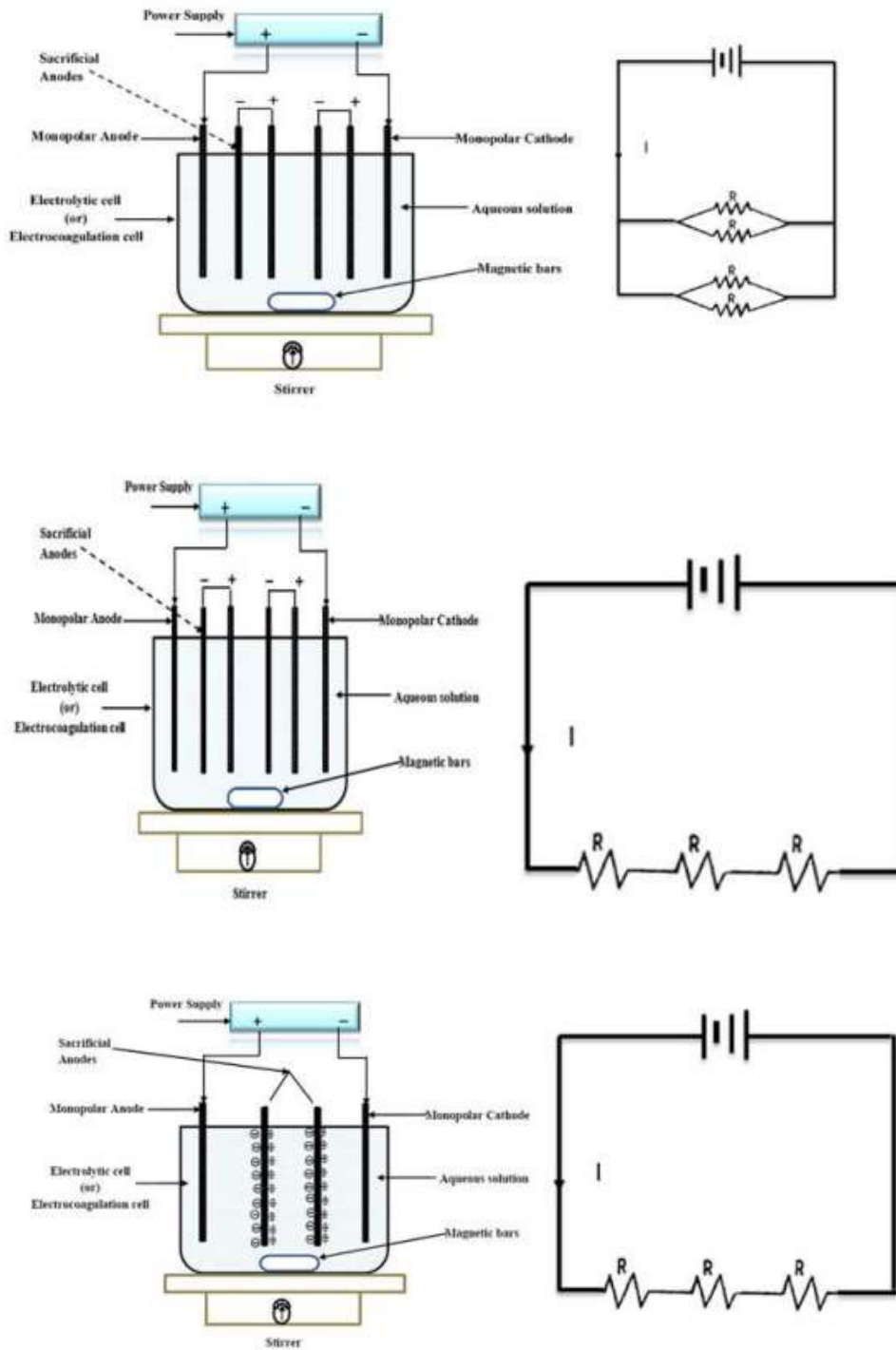
**c) Características de los Electrodo y su Configuración Espacial.** Las características del electrodo son un factor crucial, ya que determinan la eficiencia del proceso. Los electrodos comúnmente utilizados son de aluminio o hierro, debido a su capacidad para liberar coagulantes efectivos. Sin embargo, la configuración y disposición de los electrodos, así como su número, también influyen en el proceso. Un mayor número de electrodos puede aumentar la superficie de reacción y mejorar la eficiencia de la electrocoagulación. (Vepsalainen, 2012)

Otro aspecto importante es la ubicación de los electrodos dentro del sistema. La formación de burbujas de hidrógeno y oxígeno como subproducto del proceso electrolítico facilita la flotación de los contaminantes hacia la superficie del agua. Esto sugiere que, en ciertos diseños, ubicar los electrodos en la parte inferior del sistema puede maximizar la flotación y aumentar la eficiencia de remoción, como también minimizar el consumo de energía y por ende los costos. Además, la distancia entre los electrodos también es relevante, ya que una separación muy grande puede reducir la eficiencia de generación de coagulantes, mientras que una separación demasiado pequeña puede causar cortocircuitos. Asimismo, influye el uso de electrodos monopolares o bipolares, ya sea ubicados en serio o en paralelo, con sus distintas configuraciones. Algo en tomar en consideración, que una configuración de los electrodos en

serie, requiere de un mayor consumo de energía, que su ubicación en paralelo. (Garcia et al., 2017)

**Figura27**

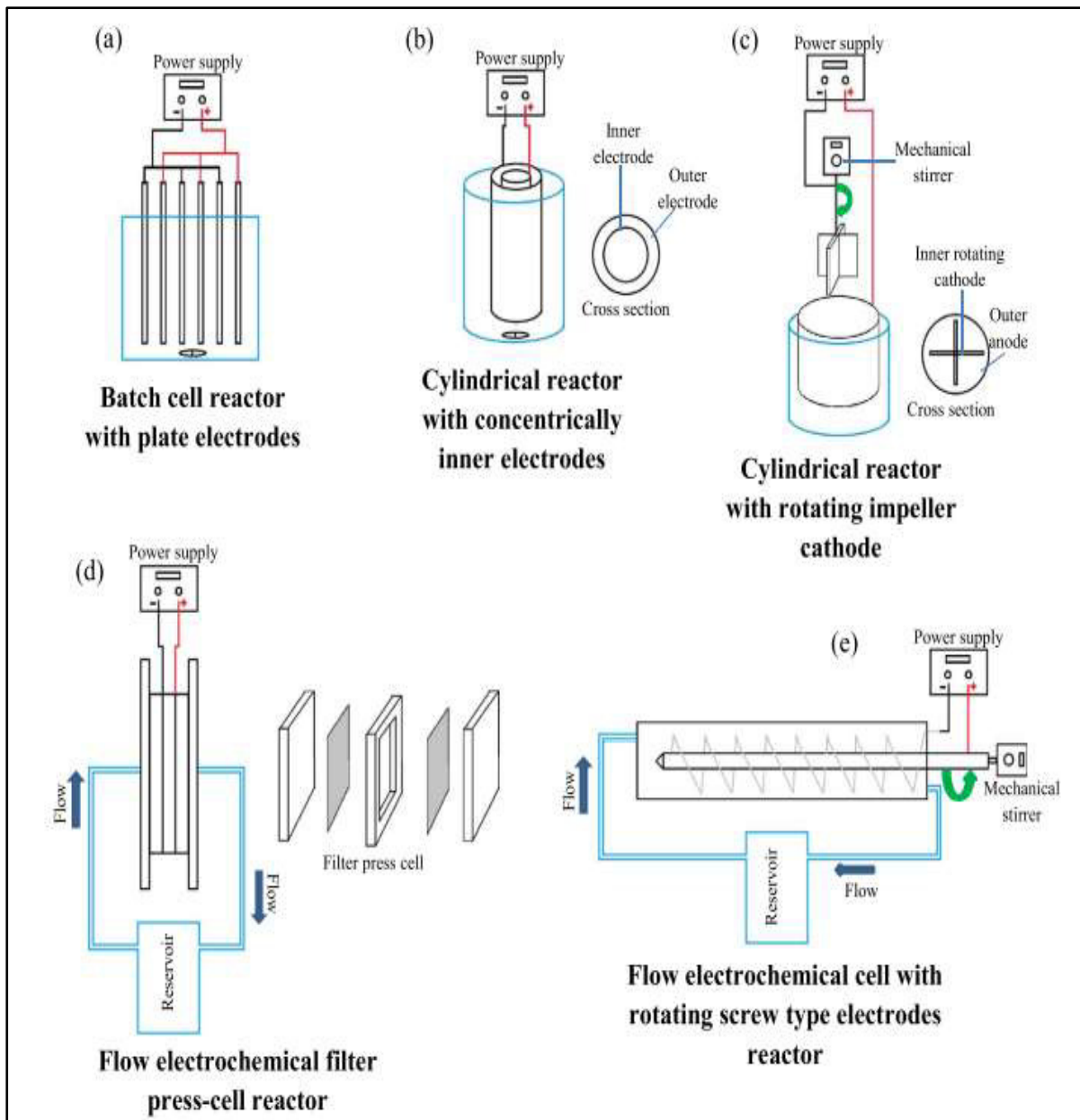
Electrodos monopolares y bipolares en serie y paralelo



*Nota.* Obtenido de Drogui et al. (2022)

*d) El diseño del reactor de electrocoagulación.* El diseño del reactor en un sistema de electrocoagulación influye significativamente en la eficiencia del proceso. Un reactor tipo Batch trata un volumen fijo de agua durante un tiempo determinado, lo que facilita el control de los parámetros operativos, como la intensidad de corriente y el tiempo de reacción. Es adecuado para estudios experimentales o pruebas piloto. Un reactor de Flujo continuo y circulatorio mejora la transferencia de masa, permitiendo un contacto más eficiente entre los coagulantes y los contaminantes. El flujo circulatorio asegura que la solución pase repetidamente por los electrodos, aumentando la oportunidad de interacción y mejorando la eficiencia de la remoción de contaminantes, ideal para aplicaciones industriales y a mayor escala. La geometría del reactor influye en la distribución del campo eléctrico y de los coagulantes, evitando zonas muertas en el sistema, como por ejemplo un reactor cilíndrico favorece una mejor distribución del campo eléctrico, lo que resulta en una generación más uniforme de coagulantes en toda la solución. La forma cilíndrica facilita la instalación de electrodos en diversas configuraciones y puede ser adecuada para optimizar el contacto entre los contaminantes y los productos generados. (Drogui et al., 2022)

Electrodos en rotación pueden mejorar el proceso de electrocoagulación al generar una mayor agitación en la solución, lo que aumenta la transferencia de masa y facilita el desprendimiento de burbujas de hidrógeno en el cátodo. Esto promueve una mejor flotación de los contaminantes, puede mejorar la eficiencia del sistema al reducir la resistencia en la interfase electrodo-solución y reduce la pasivación de electrodos al evitar acumulación de precipitados en estos. Se ha obtenido buenos resultados utilizando este arreglo, en cuanto a la eficiencia en remoción de metales de la industria textil, contaminantes no metálicos inorgánicos y contaminantes orgánicos, en comparación del sistema del tipo Batch. (García et al., 2017)

**Figura28***Distintos tipos de reactores*

*Nota.* Obtenido de Garcia et al. (2017)

**2.1.3.3. Ventajas y desventajas.** Según Drogui et al. (2022), en su tesis doctoral “Electrocoagulation in the treatment of industrial Waters and wastewaters”, las ventajas y desventajas en la aplicación de un sistema de electrocoagulación son:

**Tabla 2***Ventajas y desventajas de la electrocoagulación*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Costo relativamente bajo	Reemplazo regular de electrodos
Generación continua de coagulantes	Dependencia de la energía
Facilita sedimentación y deshidratación de lodos	Pasivación del cátodo
Mayor tasa de filtración	Influencia de las propiedades de la solución
Menor volumen de lodos	Consumo irregular del electrodo de aluminio o hierro
Eficiencia y rapidez en la separación de materia orgánica	Solubilización de hidróxidos
Reducción de sólidos disueltos totales (TDS)	
No requiere neutralización química	
Flotación de contaminantes por burbujas de gas	
Simplicidad y adaptabilidad del sistema	

*Nota.* Obtenido de Drogui et al. (2022)

**2.1.3.4. Aplicaciones de la electrocoagulación.** La electrocoagulación tiene diversas aplicaciones, y podríamos agruparlos por el contaminante en específico a tratar, para ello, Moussa et al. (2016), Garcia et al. (2017), y RACO (2023), en sus artículos de investigación, nos proporciona la lista de contaminantes que puede tratar la electrocoagulación y en q industrias se podría utilizar respectivamente:

***a) Metales pesados.***

- Cromo: En industria del cuero (curtiembres) para reducir el cromo total en efluentes.
- Níquel, cadmio, zinc: En industria de galvanoplastia para eliminar estos metales de los efluentes de procesos de recubrimiento de metales.
- Hierro, cobre, zinc: En industria minera para tratar aguas ácidas de minas y reducir la concentración de metales pesados. (RACO, 2023)

***b) Contaminantes orgánicos.***

- Grasas y aceites: En industria alimentaria y municipal para eliminar grasas, aceites y sólidos suspendidos en aguas residuales. Así como en la industria del petróleo y gas para separar emulsiones de aceite y agua en los efluentes generados.
- Materia orgánica: En aguas residuales municipales, alimentos, curtiembres y textil para la eliminación de contaminantes orgánicos que generan color, olor y carga orgánica. (Moussa et al., 2016)

***c) Contaminantes inorgánicos no metálicos.***

- Nitratos y fosfatos: Tratamiento de agua potable para eliminar estos contaminantes no metálicos y mejorar la potabilidad del agua.
- Sólidos disueltos: Industria minera y municipal para reducir la concentración de sólidos disueltos, mejorando la calidad del agua tratada. (Garcia et al., 2017)

***d) Sólidos suspendidos.***

- Sólidos suspendidos: Tratamiento de aguas residuales municipales y alimentos para reducir la turbidez y mejorar la calidad del agua. Así como en la industria alimentaria para eliminar sólidos suspendidos y reducir el impacto ambiental de los efluentes. (Moussa et al., 2016)

#### 2.1.4. Cromo

El cromo es un elemento químico de número atómico 24, ubicado en el grupo 6 de la tabla periódica. Su símbolo es Cr, y es un metal de transición caracterizado por su brillo plateado y alta reactividad. Se presenta comúnmente en 3 estados de oxidación: Cromo metálico (Cr), el cromo trivalente ( $Cr^{+3}$ ) y el cromo hexavalente ( $Cr^{+6}$ ). El cromo forma parte de diversas reacciones químicas, especialmente en procesos de oxidación-reducción, y tiene una gran afinidad por formar compuestos con oxígeno. (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], 2000)

**2.1.4.1. Cromo en el ambiente.** El cromo es un elemento natural que se encuentra en el suelo, rocas, animales y plantas, y en emisiones volcánicas, tanto en forma de polvo como de gases. Existen diferentes estados de oxidación del cromo en el ambiente, siendo los más comunes el cromo metálico (0), el cromo trivalente (III) y el cromo hexavalente (VI). El cromo (III) es la forma más estable y común en la naturaleza, además de ser un nutriente esencial para el cuerpo humano, ya que participa en la regulación de la insulina, ayudando en el metabolismo de carbohidratos, grasas y proteínas. Por otro lado, el cromo (VI) y el cromo metálico son generados principalmente por actividades industriales, como la producción de pigmentos, curtiembres, y procesos de recubrimiento metálico, siendo el cromo hexavalente particularmente tóxico (ATSDR, 2000).

El cromo se distribuye en diferentes medios como el agua, el suelo y el aire debido tanto a fuentes naturales como antropogénicas:

- El Cr en suelos es predominantemente trivalente ( $Cr^{+3}$ ), quedando inmovilizado y menos absorbible por las plantas.
- En agua, el  $Cr^{+6}$  es más móvil y persistente, infiltrándose en acuíferos, mientras que el  $Cr^{+3}$  se precipita y adhiere a partículas, limitando su movilidad.

- En el aire, el Cr proviene de actividades industriales; sus partículas se desplazan largas distancias hasta depositarse en distintos ecosistemas. (ATSDR, 2012)

**Figura 29**

*Estados de oxidación más comunes del cromo*

<b>Cromo elemental Cr (0)</b> 	<b>Cromo trivalente Cr (III)</b> 		<b>Cromo Hexavalente Cr VI</b> 
<b>Artículos metalizados cromados y acero inoxidable</b>	<b>Pigmento verde</b>	<b>Picolinato de cromo</b>	<b>Producto intermedio en metalurgia y síntesis química</b>
* resistentes a la corrosión	* insoluble, no biodisponible	* soluble	* alta solubilidad, biodisponible
* pueden estar en contacto con alimentos	* CLP (etiquetado) "no peligroso"	* oligoelemento esencial	* tóxico agudo, CMR
* se utilizan en implantes quirúrgicos		* suplemento dietario	* fuerte sensibilizador

*Nota.* Obtenido de LederPiel (2014)

**Figura 30**

*Cromo Hexavalente en efluentes industriales*



*Nota.* Obtenido de EcologíaHoy (2011)

Uno de los problemas más críticos en la gestión del cromo en el ambiente es la facilidad con la que el cromo trivalente ( $Cr^{+3}$ ) puede oxidarse a cromo hexavalente ( $Cr^{+6}$ ) bajo condiciones ambientales específicas, el cual es considerado como la segunda oxidación del cromo más estable y la más importante toxicológicamente. Factores como el pH elevado y la presencia de oxidantes en el ambiente pueden promover esta conversión, lo que aumenta el riesgo de toxicidad. (Ministerio Público Tutelar [MPT], 2019)

**2.1.4.2. Toxicología del Cromo.** El cromo presenta dos formas principales en el ambiente que difieren significativamente en su toxicidad: el cromo trivalente ( $Cr^{+3}$ ) y el cromo hexavalente ( $Cr^{+6}$ ). El cromo trivalente es el estado de oxidación más estable del cromo ( $Cr^{+3}$ ) en la naturaleza y en procesos industriales, y es considerado esencial para el metabolismo de la glucosa, grasas y proteínas en organismos vivos. A este se le considera relativamente inocuo en concentraciones normales y no presenta los riesgos tóxicos asociados al cromo hexavalente. (Del Pilar, 2023)

Sin embargo, en condiciones ambientales apropiadas, puede oxidarse a su forma más tóxica, el cromo hexavalente. Sin embargo, el mayor riesgo con el cromo trivalente es su capacidad de oxidarse a cromo hexavalente ( $Cr^{+6}$ ). El cromo hexavalente ( $Cr^{+6}$ ) es altamente tóxico y representa una seria amenaza para la salud humana. Este compuesto puede entrar al organismo a través de diversas vías, como la inhalación, la ingestión y el contacto dérmico, y sus efectos tóxicos dependen de la dosis, la vía de exposición y la duración de esta. (ATSDR, 2012)

Según Ministerio de Producción y Trabajo (2019), de Argentina, las vías de exposición a cromo son:

- **Inhalación:** Es la vía más peligrosa de exposición al cromo hexavalente, ya que puede causar graves daños al sistema respiratorio, incluyendo irritación de las vías

respiratorias, asma ocupacional, y en exposiciones prolongadas, cáncer de pulmón. De hecho, el  $Cr^{+6}$  está clasificado como un carcinógeno conocido por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC).

- **Ingestión:** La ingesta de cromo hexavalente puede generar problemas gastrointestinales, como dolor abdominal, diarrea y vómitos. En casos graves, puede causar daño renal y hepático.
- **Contacto dérmico:** La exposición cutánea prolongada al  $Cr^{+6}$  puede producir dermatitis, úlceras, y en casos graves, lesiones cutáneas irremediables. Además, la exposición repetida puede causar sensibilización, desarrollando alergias cutáneas crónicas. (MPT, 2019)

El cromo hexavalente posee una alta capacidad para penetrar las membranas celulares, donde puede inducir estrés oxidativo y dañar el ADN, lo que explica su potencial cancerígeno. Además, su acumulación en los tejidos representa un riesgo debido a que puede persistir en el organismo y aumentar las probabilidades de efectos adversos a largo plazo. Una vez dentro de la célula, el  $Cr^{+6}$  se reduce a especies intermedias como  $Cr^{+5}$ ,  $Cr^{+4}$  y  $Cr^{+3}$ , que causan aberraciones cromosómicas, alteraciones en las cromátides hermanas y reacciones cruzadas en la cadena del ADN, contribuyendo a su toxicidad. (MPT, 2019)

### **2.1.5. Industrias de Curtiembres**

Las industrias de curtiembre son aquellas dedicadas al procesamiento de pieles animales para convertirlas en cuero, un material resistente y duradero que se utiliza ampliamente en la fabricación de calzado, ropa, muebles, y otros productos. (Vinueza, 2013)

**2.1.5.1. Proceso productivo en las Curtiembres.** El proceso productivo en las curtiembres consta de varias etapas, que transforman las pieles crudas en cuero a través de tratamientos químicos y mecánicos y el uso de cantidades determinadas de agua, lo que genera

efluentes con distintas características. El proceso de producción de cuero puede presentar variaciones, según como sea la planta de producción, la tecnología y mano de obra en cuanto al orden de actividades u operaciones adicionales. (Centro de Tecnologías Ambientales [CTA], 2019)

*a) Recepción de pieles.* Se reciben y se clasifican las pieles frescas o saladas según su calidad. Pieles muy húmedas puede acarrear defectos como un deterioro, lo que conllevaría a un producto final defectuoso, por ello el operador realiza una inspección visual, y de esta manera asegurar un producto final en las mejores condiciones. (Ministerio de Salud y Protección Social [MINSALUD], 2015)

### **Figura 31**

*Recepción y revisión de las pieles*



*Nota.* Obtenido de MINSALUD (2015)

**b) Etapa de Ribera.** Etapa donde se preparará la piel para el curtido, removiendo materia orgánica, grasas, y pelo. La producción de cuero se puede realizar poco después del sacrificio animal, pero usualmente se almacenan las pieles por un tiempo determinado.

- **Salado:** Las pieles se cubren con sal (NaCl) para su conservación. Esto se realiza con el fin de dar a la piel, resistencia a los microorganismos. (CTA, 2019)
- **Remojo:** Las pieles saladas se sumergen en agua con agentes humectantes, detergentes y bactericidas para eliminar la sal y la suciedad. Esta operación se lleva a cabo en tambores rotativos, también llamados botales. Los efluentes resultantes contienen alta concentración de sales, materia orgánica y restos de pelos y grasas. (Gutierrez, 2015)
- **Pelambre:** Se eliminan los pelos y la epidermis de las pieles mediante una mezcla alcalina de cal hidratada, sulfuro de sodio y amina de pelambre. Se lleva a cabo en tambores rotativos. Se genera efluente altamente básico ( $\text{pH} > 10$ ), con una gran carga de materia orgánica. (Olivares, 2018)
- **Descarnado:** Se eliminan los tejidos subcutáneos, adiposos, musculares y sebo (grasas y carne) restante de la cara interna de la piel. Esta operación se lleva a cabo en descarnadoras. Se genera residuos orgánicos (MINSALUD, 2015)
- **Dividido:** Se separa la piel en dos capas, la capa superior (cuero) y la carnaza. Se lleva a cabo en máquinas divisoras. Se generan residuos orgánicos producto del corte, como también la denominada carnaza, el cual puede reutilizarse para otros productos. (CTA, 2019)

**Figura 32**

*Etapa de Ribera – Procesos de remojo y pelambre*



*Nota.* Obtenido de CTA (2019)

*c) Etapa de Curtido.* En esta fase, la piel se somete al proceso de curtido para estabilizarla y evitar su descomposición. Las actividades que comprenden esta etapa se realizan en un botal giratorio.

- **Desencalado y Purga:** Se elimina la cal residual usando soluciones ácidas o sales amónicas, generalmente sulfato de amonio, para neutralizar la alcalinidad residual y suavizar la piel. Se realiza en los tambores giratorios. Se generan efluentes con altos niveles de alcalinidad y trazas de sulfuro o cloruros. (CTA, 2019)
- **Piquelado:** La piel se somete a una solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y sal (NaCl) para preparar su estructura para el curtido (acidificación). Se realiza en los tambores giratorios. Se genera efluentes ácidos (pH bajo) y con altos niveles de salinidad. (Campos, 2022)

- **Curtido:** La etapa clave en la producción de cuero, donde las pieles se tratan con agentes curtientes, como las sales de cromo (generalmente sulfato básico de cromo ( $Cr_2(SO_4)_3$  o  $CrCl_3$ ) o agentes vegetales y sintéticos. El cromo trivalente ( $Cr^{+3}$ ) se fija en las fibras de colágeno de la piel, otorgándole estabilidad y resistencia, obteniendo una apariencia azulada denominada wet-blue. Se realiza en los tambores giratorios. Sin embargo, parte del cromo no se fija, y se libera en los efluentes, por lo que se genera efluentes con altos niveles de cromo trivalente, que, a determinadas condiciones de pH y Temperatura, se oxida a su forma hexavalente (Segunda oxidación más estable del cromo), que como ya hemos visto, presenta altos niveles de toxicidad. (MINSALUD, 2015)
- **Ecurrido o secado:** Se retira la humedad sobrante mediante prensas o escurridores. Esto se realiza en máquinas escurridoras. No se genera un volumen importante de efluente. (Chuquiruna, 2018)
- **Rebajado:** Se ajusta el grosor del cuero mediante una máquina de rebajado, esto en función a las medidas de espesor deseadas por el cliente. Esto se realiza en máquinas rebajadoras. Se genera grandes residuos de viruta de cuero y polvos o partículas de cuero. (Altillo, 2023)
- **Recurtido, Tintura y Engrasado:** Se somete a un nuevo proceso de curtido (wetblue) con otros agentes curtientes (resinas sintéticas como el melamina-formaldehído o el fenol-formaldehído, sales de cromo trivalente o curtientes vegetales ricas en taninos), se aplica tintura y grasas para suavizar el cuero. Se realiza en los botaes giratorios del tipo 3 y existe un consumo aproximado de un metro cúbico de agua. Se generan efluentes con alta niveles altos de cromo, tintura y grasas. (MINSALUD, 2015)

**Figura 33**

*Etapa de Curtido – Proceso de curtido*



*Nota.* Obtenido de CTA (2019)

*d) Etapa de Pre-Acabado.* En esta etapa, el cuero se somete a procesos físicos que mejoran su flexibilidad, textura y apariencia, preparándolo para el acabado final.

- **Desvenado:** Se eliminan las venas del cuero. Se realiza en las desvenadoras. Se generan pequeñas cantidades de residuos de fibras o tejido, y polvo o partículas de cuero.
- **Secado o Ecurrido:** Se seca el cuero, ya sea por secado al vacío y/o al ambiente. En el caso de secado al vacío, se realiza en una máquina de vacío.
- **Ablandado:** Se suaviza el cuero para darle flexibilidad. Esto se realiza en la moliza. Se genera residuos de polvo de cuero.
- **Lijado y desempolvado:** Se lija la superficie del cuero y se elimina el polvo. Se lleva a cabo en una lijadora y luego en una máquina desempolvadora de cepillos. Se genera residuos de polvo de cuero. (CTA, 2019)

**Figura 34**

*Etapa de Pre-Acabado - Proceso de secado*



*Nota.* Obtenido de CTA (2019)

*e) Etapa de Acabado.* El acabado es la fase final del proceso, donde se aplica color y se mejoran las características superficiales del cuero y se asegura que el producto tenga la apariencia y funcionalidad deseadas para su uso comercial.

- **Acondicionamiento:** Se hidrata el cuero si ha estado almacenado con ayuda de un aerosol levante con agua, para su hidratación.
- **Batana:** Se golpea el cuero para darle suavidad. Se realiza en un fulón seco y con la ayuda de tarugos.
- **Tesado:** Se estira el cuero con calor para alisarlo. Este proceso se realiza con la ayuda de un toggling.
- **Pintado:** Se aplica una capa de pigmentos, penetrante, cera, laca, rellenantes y ligante acrílico al cuero. Se genera emisiones de vapores de disolventes y pigmentos, los cuales contienen compuestos orgánicos volátiles.

- **Planchado:** Se alisa para una homogenización final al cuero. Se realiza en una planchadora
- **Medición:** Se mide el área del cuero para su comercialización, cuya unidad se maneja en pie cuadrado. Se utiliza una maquina medidora. (CTA, 2019)

**Figura 35**

*Etapa de Acabado – Proceso de planchado*



*Nota.* Obtenido de MINSALUD (2015)

**2.1.5.2. Contaminación en industrias de cuero.** Las curtiembres generan grandes cantidades de Efluentes, emisiones y residuos durante su proceso productivo. Los principales tipos de contaminación según Pinedo (2012), son:

a) **Efluentes.** Las curtiembres utilizan una cantidad considerable de agua en casi todas las etapas de producción, lo que resulta en efluentes con una composición variada y compleja.

- **Remojo:** Se generan grandes cantidades de agua con restos de sangre, sales, suciedad y materia orgánica, con alta DBO y DQO.
- **Pelambre:** El agua contiene sulfuro de sodio, cal y restos de queratina (pelo), lo que genera alta alcalinidad y tóxicos sulfuros.
- **Desencalado y purga:** Se produce un efluente altamente alcalino con residuos de cal, sulfuro y amonio.
- **Curtido:** Los efluentes tienen altas concentraciones de sales de cromo (Cr(III) y, en algunos casos, Cr(VI)), además de materia orgánica y sales.
- **Recurtido y tintura:** Los efluentes contienen tintes, grasas y residuos de curtientes vegetales o sintéticos, además de cromo residual.
- **Acabado:** Durante el pintado, planchado y otras etapas de acabado, los efluentes pueden contener disolventes y restos de pigmentos. (Pinedo, 2012)

#### b) Residuos Sólidos.

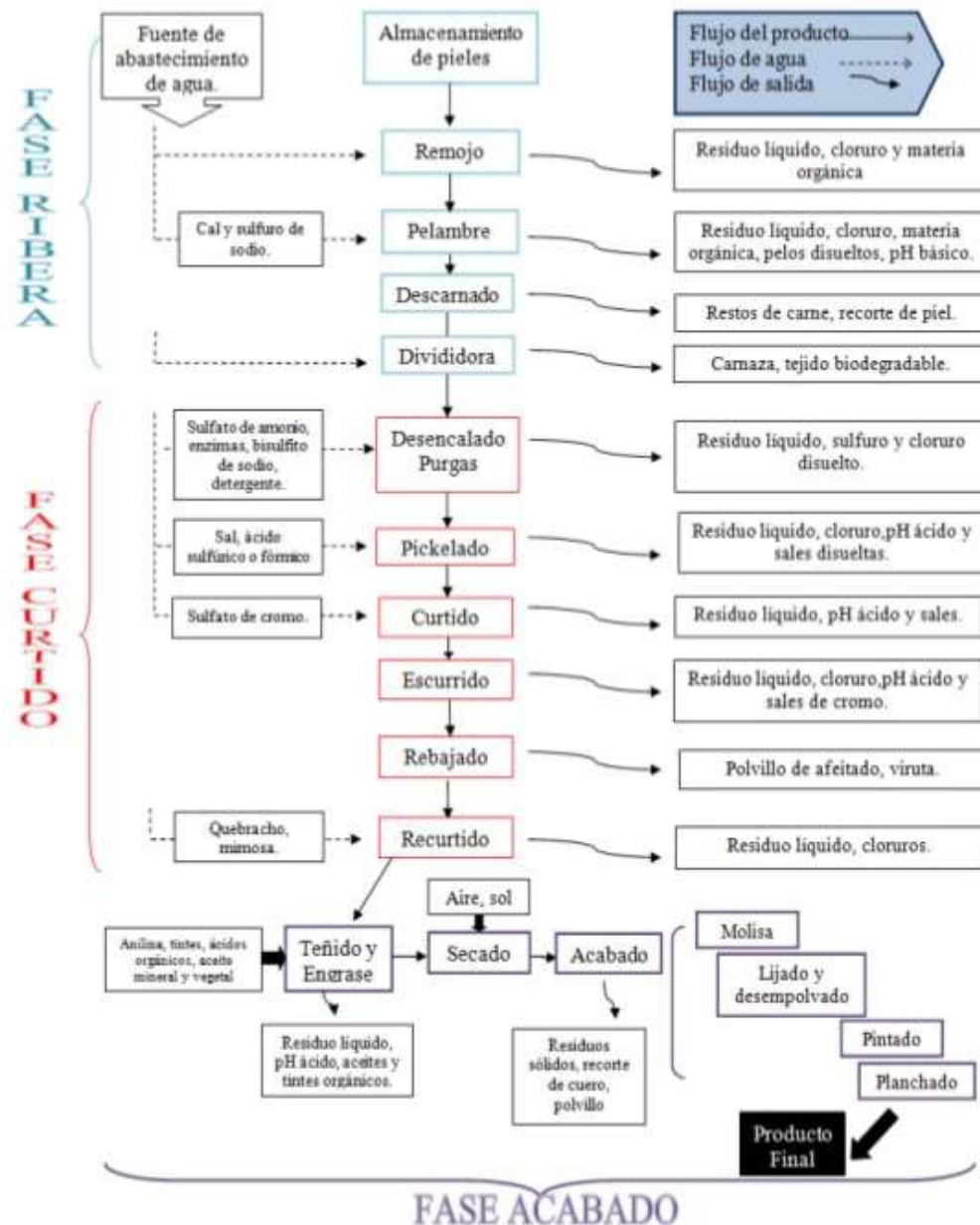
- **Remojo:** Restos de suciedad, piel, materia orgánica, y sales.
- **Pelambre:** Pelo y queratina eliminados de las pieles.
- **Descarnado, dividido, rebajado:** Grasas, restos de carne y virutas
- **Dividido/Rebajado:** Virutas de cuero, restos de piel.

#### c) Residuos Gaseosos.

- **Pelambre:** Sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) debido al uso de sulfuros.
- **Desencalado:** Emisiones de amoníaco.
- **Pintado:** Compuestos orgánicos volátiles de lacas. (Esparza y Gamboa, 2001)

Figura 36

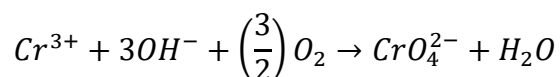
Flujograma del proceso de producción del cuero



Nota. Obtenido de Pinedo (2012)

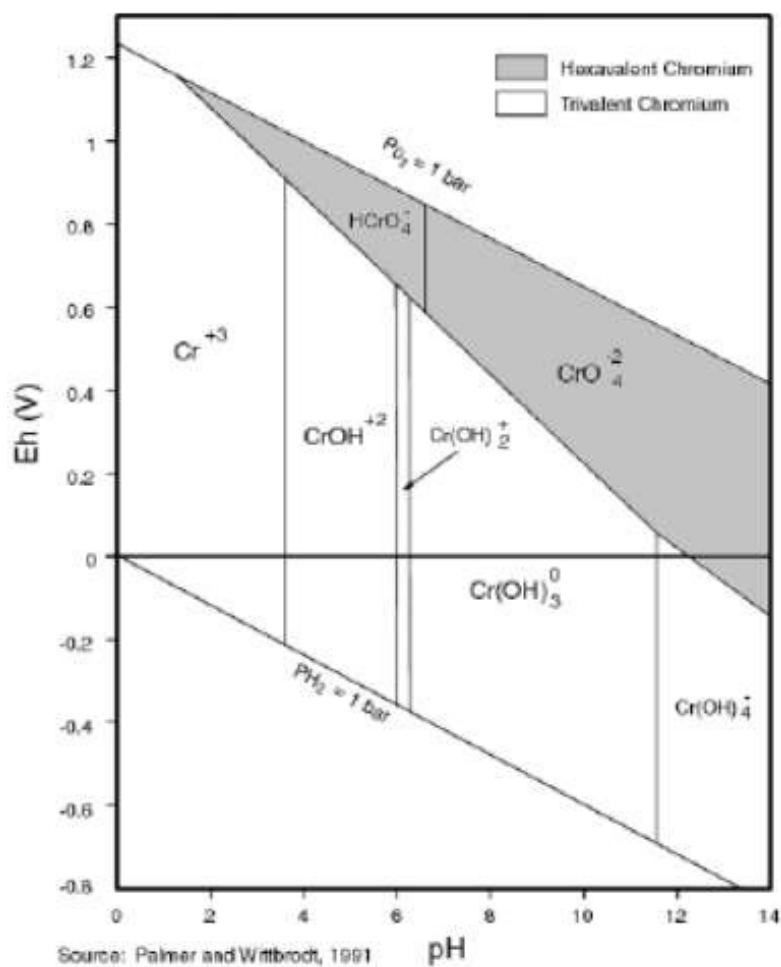
Los residuos líquidos, en particular, si no se tratan adecuadamente, pueden contaminar cuerpos de agua pues los metales pesados en el efluente, como el cromo hexavalente, son altamente tóxicos y pueden acumularse en el suelo y el agua, afectando la salud humana y animal (Tegtmeyer & Kleban, 2014). El cromo trivalente ( $Cr^{+3}$ ), si no es adecuadamente tratado, puede oxidarse fácil y espontáneamente en el ambiente en presencia de oxígeno y otros

agentes oxidantes, transformándose en cromo hexavalente ( $Cr^{+6}$ ), una forma altamente tóxica y cancerígena. Este riesgo es particularmente elevado cuando las aguas no tratadas, con pH alcalino, se vierten al ambiente, pues factores como la exposición a la luz solar, temperaturas moderadas, alta humedad y la presencia de agentes oxidantes pueden iniciar o acelerar el proceso de oxidación del cromo trivalente a su forma hexavalente. (INESCOP, 2017). Ejemplo de oxidación de  $Cr^{+3}$  a  $Cr^{+6}$



**Figura 37**

*Diagrama de especiación del cromo*



*Nota.* Obtenido de Palmer y Wittbrodt (1991)

## 2.2. Marco Conceptual

- **Electroquímica:** Es la rama de la química que estudia la relación entre la electricidad y las reacciones químicas; la transformación de energía eléctrica a la energía química, y viceversa. (Britannica, 2016)
- **Electrolisis:** Es un proceso electroquímico en el cual se utiliza una corriente eléctrica para provocar una reacción química no espontánea, induciendo reacciones químicas en el medio. (UAL, 2011)
- **Electrodos:** Son conductores de electricidad que permiten el flujo de corriente eléctrica entre una solución o sustancia y un circuito externo. En una celda electroquímica, hay dos electrodos: el ánodo, donde ocurre la oxidación, y el cátodo, donde ocurre la reducción. (Lumbreras, 2014)
- **Aguas Residuales Industriales:** Aguas que provienen de procesos industriales y varían según la actividad específica de cada industria, que se elimina en forma de desecho. Las aguas residuales industriales pueden contener una gran variedad de contaminantes, como metales pesados, productos químicos, aceites, grasas, ácidos o bases, entre otros. (Cisneros y Saucedo, 2016)
- **pH:** Es un parámetro clave que mide la acidez o alcalinidad de una solución. En la escala de pH, los valores van de 0 a 14, en donde un valor de pH 7 nos indica una naturaleza neutra; pH menor a 7 nos indica una naturaleza ácida; y un pH mayor a 7 nos indica una naturaleza alcalina o básica. (ProMinent, 2021)
- **Conductividad eléctrica:** Parámetro que mide la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica, lo cual está directamente relacionado con la concentración de sales disueltas en ella. Se mide en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (Solis et al., 2017)

- **Sólidos suspendidos totales:** Parámetro que mide la cantidad de partículas sólidas que se encuentran en suspensión en el agua y no se disuelven. Su presencia puede afectar la calidad visual del agua y aumentar su turbidez. (Montaño, 2024)
- **Sólidos disueltos totales:** Parámetro que mide la cantidad de sales minerales y sustancias disueltas en el agua, en forma molecular o iónica, y no pueden ser separadas por filtración. (Montaño, 2024)
- **Salinidad:** Parámetro que mide la concentración de sales disueltas en el agua. Presenta una relación directa con la conductividad eléctrica. (Hanna, 2020)
- **Coagulación:** Proceso donde se adicionan productos químicos (coagulantes), tales como el sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  o el cloruro férrico  $FeCl_3$  (en general, sales de aluminio y hierro) para neutralizar las cargas de las partículas finas suspendidas (coloides) en el agua. (Belzona, 2010)
- **Floculación:** proceso en donde se mezclan suavemente los agregados formados durante la coagulación para que se unan en grupos más grandes y fácilmente separables, denominados flóculos. Este paso requiere agitación lenta y controlada para que los flóculos no se rompan. (Belzona, 2010)
- **Electrocoagulación:** Proceso electroquímico que combina principios de la coagulación química y electrólisis, mediante la generación in situ de coagulantes con la disolución controlada de electrodos metálicos, sin la necesidad de agregar agentes químicos externos. El material floculado del agua puede ser removido por el efecto de las reacciones químicas, como la liberación de gases que producen una flotación espontánea (electroflotación). (Vepsalainen, 2012)
- **Cromo trivalente:** Es el estado de oxidación más estable del cromo ( $Cr^{+3}$  en la naturaleza y en procesos industriales, considerado esencial para el metabolismo de la glucosa, grasas y proteínas en organismos vivos. A este se le considera relativamente

inocuo en concentraciones normales y no presenta los riesgos tóxicos asociados al cromo hexavalente. Sin embargo, en condiciones ambientales apropiadas, puede oxidarse a su forma más tóxica, el cromo hexavalente. (Del Pilar, 2023)

- **Cromo hexavalente:** Es un estado de oxidación altamente tóxico y carcinogénico del cromo ( $Cr^{+6}$ ), asociado a efectos graves en la salud humana y ambiental. Se encuentra principalmente en aguas residuales industriales, como las generadas en el curtido del cuero, y puede entrar en contacto con la piel, los pulmones o ingerirse, causando daños irreversibles. (ATSDR, 2012)
- **Curtido:** Etapa clave en la producción de cuero, donde las pieles se tratan con sales de cromo (generalmente sulfato básico de cromo ( $Cr_2(SO_4)_3$  o  $CrCl_3$ )) o agentes vegetales y sintéticos. El cromo trivalente ( $Cr^{3+}$ ) se fija en las fibras de colágeno de la piel, otorgándole estabilidad y resistencia. Sin embargo, parte del cromo no se fija, y se libera en los efluentes, por lo que se genera efluentes con altos niveles de cromo trivalente, que, a determinadas condiciones de pH y Temperatura, se oxida a su forma hexavalente. (CTA, 2019)

### 2.3. Marco Legal Ambiental

- **Ley N° 28611 – Ley General del Ambiente:** Define los principios y herramientas para la gestión ambiental nacional, incluyendo la regulación y control de emisiones y vertimientos mediante instrumentos jurídicos vinculantes como los LMP, ECA y VMA.
- **D.S. N° 010-2023-MINAM - Límites Máximos Permisibles para efluentes de actividades de curtido y adobo de cuero:** Este decreto establece los límites máximos permisibles (LMP) de los contaminantes presentes en los efluentes líquidos generados por las curtiembres. Su principal objetivo es regular la concentración de sustancias peligrosas, como el cromo, para prevenir la contaminación del agua y garantizar la protección del ambiente y la salud pública.

**Tabla 3**

LMP – D.S. N° 010-2023-MINAM

Parámetro	Unidad de medida	LMP
pH	Unidades de pH	6 – 9
Temperatura	°C	35
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	30
Aceites y Grasas	mg/L	10
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	30
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	50
Cromo total	mg/L	0.5

*Nota.* Obtenido de Diario El Peruano (2023)

- **Ley N° 29338 - Ley de los Recursos Hídricos:** Esta ley tiene como propósito garantizar el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos del país. Busca asegurar que el uso del agua sea equitativo y eficiente, promoviendo su conservación y protección, con un enfoque de gestión integrada para prevenir su contaminación y asegurar la disponibilidad del recurso para futuras generaciones.

- **D.S. N° 001-2010-AG - Reglamento de la Ley de los Recursos Hídricos:** Este reglamento detalla las disposiciones de la Ley de Recursos Hídricos, estableciendo las reglas para la planificación y gestión del agua a nivel nacional. Incluye criterios para el uso de aguas superficiales y subterráneas, así como mecanismos para el control de la contaminación, en concordancia con los estándares de calidad ambiental.
- **D.S. N° 004-2017-MINAM - Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua:** Establece los estándares de calidad del agua, necesarios para la conservación de la vida acuática, el consumo humano y la protección de otros usos. Estos estándares buscan garantizar que los cuerpos de agua no sean contaminados más allá de los límites establecidos, asegurando así su sostenibilidad y utilidad.
- **D.S. N.º 010-2019-VIVIENDA – Valores Máximos Admisibles para vertimientos al alcantarillado sanitario:** Esta norma establece los límites máximos admisibles de contaminantes en los vertimientos provenientes de actividades industriales, comerciales y de servicios que se descargan al sistema de alcantarillado. Su finalidad es proteger la integridad del sistema de recolección y tratamiento de aguas residuales, previniendo la obstrucción, corrosión o deterioro de las redes, así como minimizar impactos negativos en el ambiente y en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

**Tabla 4**

VMA - D.S. N.º 010-2019-VIVIENDA

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>VMA</b>
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	1000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	500
Aceites y Grasas	mg/L	100
Cromo total	mg/L	10
pH	-	6-9
Temperatura	°C	<35

*Nota.* Obtenido de Diario El Peruano (2019)

### III. MÉTODO

#### 3.1. Tipo de investigación

El tipo de la presente investigación es aplicado, ya que busca aplicar conocimientos preexistentes al tratamiento de efluentes de la industria del cuero mediante electrocoagulación, con el fin de resolver problemas específicos de contaminación con cromo, generando nueva información relevante en este contexto.

El enfoque de la presente investigación es cuantitativo, dado que requiere la recolección de datos numéricos y el análisis estadístico de parámetros como la concentración de cromo total, pH, turbidez, conductividad, DQO, salinidad y SST.

El diseño de la investigación es experimental, pues implica la manipulación de variables independientes como la intensidad de corriente y el tiempo de tratamiento, para observar su efecto en la concentración de cromo total, DQO y turbidez. Asimismo, es de carácter transversal, ya que las mediciones se realizaron en un solo momento temporal bajo condiciones controladas.

#### 3.2. Ámbito temporal y espacial

##### 3.2.1. *Ámbito Temporal*

La presente investigación se desarrolló entre los meses de agosto del 2024 y Julio del 2025. Asimismo, los antecedentes seleccionados de la investigación se encuentran comprendidos entre los años 2020 y 2024, encontrándose dentro del rango de los últimos 5 años pedidos. El proceso de búsqueda y revisión de información comenzó en agosto, mientras que la fase experimental se llevó a cabo entre marzo del 2025 y abril del 2025. Se prevé la entrega final del trabajo a finales de julio del 2025.

### 3.2.2. *Ámbito Espacial*

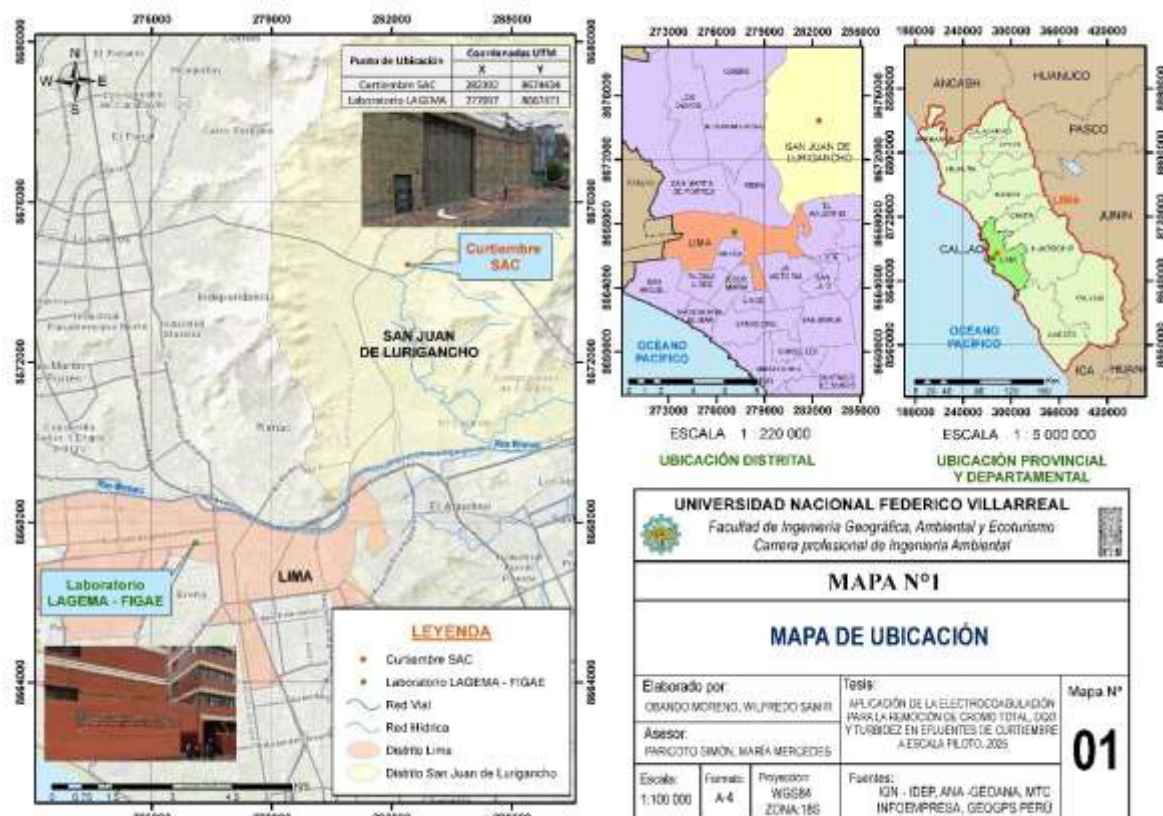
Dado su carácter experimental, esta investigación se realizó en dos ámbitos. El primero corresponde al sitio de muestreo, la empresa de curtiembres., donde se recolectaron las muestras de efluentes. El segundo ámbito se desarrolló en el Laboratorio de Geografía y Medio Ambiente (LAGEMA) de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la UNFV, donde se llevaron a cabo el tratamiento y análisis de laboratorio.

#### Coordenadas UTM

- Empresa Curtiembre SAC: X = 282392 m; Y = 8674434 m
- Laboratorio LAGEMA – FIGAE: X = 277097 m; Y = 8667471 m

**Figura38**

*Mapa de Ubicación*



### **3.3. Variables**

#### ***3.3.1. Variable Independiente***

- Aplicación de la electrocoagulación

#### ***3.3.2. Variable dependiente***

- Remoción de cromo total, DQO y Turbidez

Tabla 5

## Operacionalización de Variables de Investigación

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
Variable Independiente <b>Aplicación de la electrocoagulación</b>	<p>Es un proceso que combina la coagulación química con la electrólisis, generando coagulantes a partir de la disolución controlada de electrodos metálicos de hierro o aluminio sin necesidad de añadir químicos externos. Durante este proceso, los iones metálicos liberados desestabilizan las partículas suspendidas en el agua, promoviendo la formación de floculos. La reacción en el cátodo produce burbujas de hidrógeno, facilitando la flotación de los contaminantes. (Vepsalainen, 2012)</p>	<p>El método será evaluado mediante un sistema de electrocoagulación piloto, donde una muestra de agua residual de 1 L será tratada. Los electrodos de hierro estarán conectados a una fuente de corriente continua para generar los coagulantes necesarios. El sistema será operado bajo diferentes intensidades de corriente y tiempos de reacción, monitoreando parámetros operacionales.</p>	Electrólisis	<p>N° de placas (unidades) Tipos de placas (material: Fe, Al) Config. Espacial Placas (disposi.) Config. Geomet. del sistema (Forma) Intensidad de Corriente (A) Tiempo de tratam. (min)</p>
Variable Dependiente <b>Remoción de Cromo Total, DQO y Turbidez</b>	<p>El parámetro de metales pesados en la calidad del agua se refiere a la concentración de elementos metálicos que, en cantidades elevadas, son todos tóxicos para los seres vivos. La DQO cuantifica la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica en el agua mediante un oxidante fuerte (Romero, 2004). La turbidez se refiere a la opacidad del agua causada por la presencia de partículas suspendidas que reflejan la luz proyectada hacia sus volúmenes específicos. (Quiroz et al., 2019)</p>	<p>Se realizará un análisis de cromo total en las muestras antes y después del tratamiento mediante técnicas espectrofotométricas para evaluar la disminución de la concentración de cromo, Asimismo, se realizará el análisis de DQO con digestión en viales y se empleará el método del colorímetro para su determinación. La lectura de la turbidez se realizará con el uso de un turbidímetro. Finalmente, se calculará las eficiencias respectivas</p>	<p>Parámetros fisicoquímicos</p> <p>Rendimiento</p>	<p>Concent. Total Cr (mg/L) Turbidez (NTU) SST (mg/L) STD (mg/L) DQO (mg/L) pH (Escala de pH) Conductiv. (<math>\mu</math>S/cm) Salinidad (<math>\mu</math>S/cm) Temperatura (<math>^{\circ}</math>C)</p> <p>Eficiencia (%)</p>

### **3.4. Población y muestra**

#### **3.4.1. Población**

La población corresponde a la cantidad o volumen total de efluente generado en la empresa de curtiembres S.A.C, correspondiente a un valor referencial de 10 m<sup>3</sup>/día.

#### **3.4.2. Muestra**

Se realizó un muestreo no probabilístico, más que todo por accesibilidad al alcantarillado, facilidad y horario en que realizaban la etapa de curtido. El volumen de muestra para nuestro ensayo experimental correspondió a un volumen de 27 litros. La cantidad fija de volumen a trabajar fue de 1 Litro por muestra en el sistema piloto de tratamiento, del cual se obtuvo 9 muestras de agua tratada, en diferentes tiempos de tratamiento, por corrida experimental, a una intensidad de corriente determinada, a su vez con 2 repeticiones adicionales, sumando un total de 27 litros.

### **3.5. Instrumentos**

#### **3.5.1. Técnicas**

- NTP 214.060.2016 - AGUAS RESIDUALES. Protocolo de muestreo de aguas residuales no domésticas que se descargan en la red de alcantarillado – INACAL
- Manual de bioseguridad de laboratorios de la UNFV
- Métodos estandarizados para análisis de aguas residuales

#### **3.5.2. Instrumentos**

- Ficha de observación
- Ficha de recolección de datos de campo y laboratorio

#### **3.5.3. Equipos**

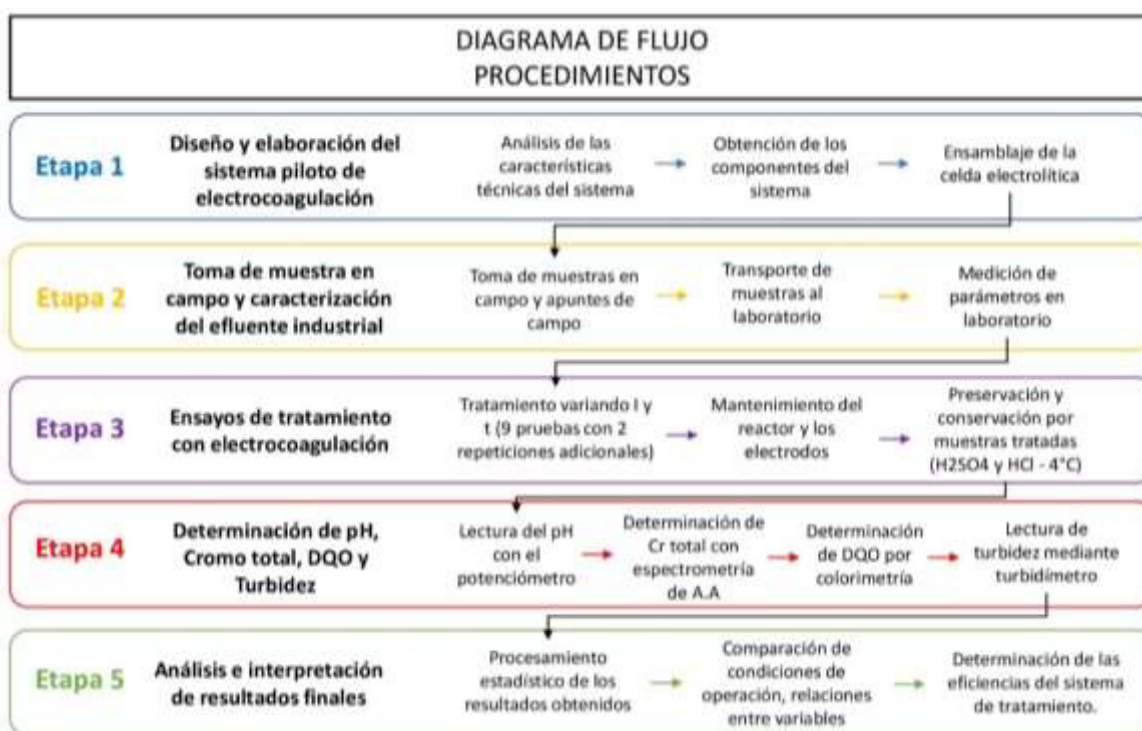
- Multiparámetro marca PEAK (S-730) y marca HANNA (HI 2300)
- Potenciómetro marca Milwaukee (MW151 MAX) y Thermo Scientific

- Digestor de viales marca Lovibond (ET 125)
- Colorímetro marca Hach (DR/890)
- Turbidímetro de bolsillo marca Lutron (TU-2016)
- Balanza Analítica marca OHAUS
- Estufa de secado eléctrica
- Equipo de absorción atómico
- Reactor cilíndrico de acrílico de 7 cm de radio y 15 cm de altura útil, con capacidad de hasta 2.3 L
- Fuente de 24 V, acondicionada para suministrar corrientes limitadas de 2, 4 y 6 A, con sistema de refrigeración incorporado
- 6 placas de hierro (10 × 15 × 0.2 cm) como electrodos

### 3.6. Procedimientos

Figura 39

Diagrama de flujo - Procedimientos



### **3.6.1. Etapa 1: Diseño y elaboración del sistema piloto de electrocoagulación**

En esta etapa, se diseñó y se ensambló un sistema piloto de electrocoagulación, cuyo objetivo es el tratamiento de efluentes industriales de curtiembres. Se consideró diferentes configuraciones y se decidió el más apropiado al sistema piloto, analizando el uso de un sistema cilíndrico batch, con capacidad para procesar muestras de 1 litro.

El sistema operó bajo el modo batch (por lotes), es decir, el volumen de efluente se mantuvo constante durante cada ensayo, sin flujo continuo de entrada ni salida. En este tipo de reactor, el balance de materia para un contaminante se expresa a la concentración del contaminante en función del tiempo de tratamiento que nos da la vel. de remoción

$$\frac{dC}{dt} = -r(C)$$

Asimismo, se adquirió los materiales necesarios, como las placas de hierro (6), que funcionaron como electrodos. Además, se evaluó la posibilidad de implementar un sistema de rotación de las placas o del propio sistema para mejorar la eficiencia del proceso, pero no era viable económicamente. Se integró una fuente de energía para suministrar la corriente directa requerida, y se aseguró que todos los componentes cumplan con las especificaciones técnicas necesarias.

### **3.6.2. Etapa 2: Toma de muestra en campo y caracterización del efluente industrial**

En esta etapa, se realizó la toma de muestra en las instalaciones de la empresa de curtiembres SAC. Se recogió un volumen total de 30 litros de agua residual industrial, asegurando que se conserve sin preservantes y manteniendo intactas sus características. La recolección de las muestras se realizó de acuerdo con el protocolo de muestreo correspondiente. Dado que la empresa se encuentra a 1 hora del laboratorio, se cuidó la integridad de las muestras en el transporte. Los parámetros por analizar incluyeron pH, conductividad, ORP, salinidad, concentración de cromo total, aceites y grasas, sólidos suspendidos totales (SST), temperatura,

sólidos totales disueltos (STD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y turbidez. Estos análisis permitieron establecer una línea base de las condiciones iniciales del efluente antes de someterlo al tratamiento de electrocoagulación.

### ***3.6.3. Etapa 3: Ensayos de tratamiento con electrocoagulación***

El sistema piloto fue sometido a tres repeticiones experimentales, variando la intensidad de corriente en cada una. Se utilizó un volumen total de 27 litros de muestra en el tratamiento, que comprenden 9 litros por cada repetición y 1 L como unidad de muestra tratada. En consecuencia, se obtuvo un total de nueve muestras tratadas, que, con las 2 repeticiones adicionales, suma un total de 27 litros de muestras tratadas. Entre cada una de las pruebas se dio mantenimiento a los electrodos de hierro, debido a los lodos que se formaban y que son movilizados en forma de espuma y burbujeo, como a su vez por sedimentación, los cuales se acentúan en los electrodos disminuyendo el rendimiento. Cada muestra tratada fue conservada con sus respectivos conservantes ( $H_2SO_4$  y  $HCl$ ) y guardadas en temperatura a  $4^{\circ}C$ , para el posterior análisis.

### ***3.6.4. Etapa 4: Determinación de pH, Cromo total, DQO y Turbidez***

Las muestras tratadas se evaluaron mediante métodos analíticos estandarizados aprobados por INACAL. Se determinaron los parámetros de interés, como el pH, la concentración de cromo total final, DQO y turbidez. El pH se determinó mediante el potenciómetro, inmediatamente después de cada muestra tratada. El cromo total se calculó mediante espectrometría de adsorción atómica, después de una digestión de las muestras tratadas en medio ácido ( $HCl$ ). El DQO se determinó mediante colorimetría, con el empleo del digestor de viales para DQO, en medio ácido ( $H_2SO_4$ ), en una solución con  $K_2Cr_2O_7$ . Y la turbidez se determinó mediante el empleo del turbidímetro, en unidades de NTU.

### **3.6.5. Etapa 5: Análisis e interpretación de resultados finales**

Con los datos obtenidos, se realizaron los análisis correspondientes para identificar las variaciones en función de la intensidad de corriente y el tiempo de tratamiento. Se desarrolló tablas y gráficos que representan la evolución de los parámetros medidos, acompañado con las correspondientes pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas, según sea el caso. Finalmente, se determinó las condiciones óptimas de operación del sistema de electrocoagulación en cuanto a la remoción de cromo total, DQO y turbidez, y se calculó las eficiencias de remoción para cada escenario experimental.

### **3.7. Análisis de datos**

Se utilizó el Microsoft Excel para el ordenamiento de datos recolectados y el programa Minitab Statitiscal software 22 que permitió su procesamiento estadístico.

Para el análisis estadístico del tratamiento, se designó tres variables respuesta: Concentración de cromo total, DQO y turbidez. En primer lugar, se aplicó la prueba de normalidad Ryan-Joiner, utilizando el software estadístico Minitab. Esta prueba es equivalente a la prueba de Shapiro-Wilk, recomendada para muestras pequeñas o moderadas ( $n < 50$ ). Seguidamente, se aplicó la prueba de homogeneidad de varianzas Levene para respaldar mejor el análisis de Kruskal-Wallis y justificar el comportamiento de la dispersión entre tratamientos. Al confirmar que nuestros datos no siguen una distribución normal, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, para comprobar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de los tratamientos, es decir, si alguna combinación corriente/tiempo fue mejor o peor que otra. Asimismo, con el fin de identificar qué tratamientos son diferentes entre sí, para saber cuáles destacan con mejores resultados y cuáles no se diferencian tanto se aplicó la prueba Post Hoc tipo Dunn, para datos no paramétricos. Y finalmente se optó por una correlación no paramétrica Spearman, para evaluar la existencia de una relación monótonica (no

necesariamente lineal) entre las variables de respuesta, lo cual sirve como argumento adicional si al mejorar una variable también mejoran las otras.

Por otro lado, el pH fue tratado como un parámetro operacional, ya que no fue controlado ni manipulado como variable independiente, sino registrado para explicar el comportamiento del sistema. Los resultados estadísticos se complementaron con gráficos de boxplots, gráfico de probabilidades de normalidad Q-Q, comparaciones post hoc y entre otros. Este enfoque permitirá interpretar claramente las condiciones óptimas del proceso de electrocoagulación en la investigación

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Caracterización del efluente final antes del tratamiento con electrocoagulación

Para la caracterización del efluente final de la etapa de curtido de la curtiembre Sudamericana, se analizaron diversos parámetros fisicoquímicos representativos de la carga contaminante y condiciones del efluente. Estos son: pH, Temperatura, Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos (TDS), Salinidad, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Aceites y Grasas, Sólidos Suspendedos Totales (SST), Turbidez, Potencial de Óxido-Reducción (ORP) y la Concentración de Cromo Total.

Estos resultados fueron comparados con los Valores Máximos Admisibles (VMA) establecidos en el Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA, que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

**Tabla 6**

*Parámetros regulados por VMA*

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>VMA</b>	<b>Unidad</b>
SST	<b>1444.5</b>	500	mg/L
DBO	<b>830</b>	500	mg/L
DQO	<b>24850</b>	1000	mg/L
AyG	<b>1131.7</b>	100	mg/L
Cr total	<b>2062.6</b>	10	mg/L
pH	<b>3.55</b>	6-9	-
Temperatura	<b>35</b>	<35	°C

*Nota.* Estos parámetros se encuentran regulados por los VMA

**Tabla 7***Otros parámetros*

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
Turbidez	983	NTU
C.E	109	mS/cm
TDS	54.5	g/L
Salinidad	213.1	% (NaCl)
ORP	208.2	mV

*Nota.* Estos parámetros no se encuentran regulados por los VMA

En la tabla se puede apreciar que los parámetros como la demanda biológica de oxígeno (DBO) con 830 mg/L, la demanda química de oxígeno (DQO) con 24850 mg/L, aceites y grasas con 1131.7 mg/L, los sólidos suspendidos totales (SST) con 1444.5 mg/L y el cromo total con 2062.6 mg/L exceden los Valores Máximos Admisibles establecidos por el D.S. N°010-2019-VIVIENDA. Estos valores reflejan una alta carga orgánica, presencia de materia suspendida y contaminación por metales pesados. Asimismo, el pH con un valor de 3.55, nos indica una fuerte acidez en el efluente, el cual no se encuentra en el rango establecido por los VMA de 6-9, y valor de temperatura de 35 °C el cual se encuentra en el valor límite establecido.

El potencial de óxido-reducción (ORP, 208.2 mV), nos indica que nos encontramos en un ambiente moderadamente oxidante. Con respecto a la conductividad eléctrica (109.0 mS), TDS (54.5 g/L), salinidad (213.1% NaCl) y turbidez (983 NTU), nos confirma la presencia de una elevada cantidad de sales disueltas y sólidos coloidales que pueden interferir en procesos fisicoquímicos.

#### 4.2. Determinación del efecto de la intensidad de corriente y tiempo de tratamiento en la concentración de cromo total, DQO y turbidez mediante electrocoagulación

La electrocoagulación fue aplicada variando dos factores operativos clave: la intensidad de corriente (2, 4 y 6 amperios) y el tiempo de tratamiento (15, 30 y 45 minutos), con el objetivo de evaluar su influencia en la remoción de cromo total, DQO y turbidez.

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos para cada una de las pruebas experimentales, junto con los valores de pH final, parámetro muy importante a controlar para el caso de la concentración de cromo total.

**Tabla 8**

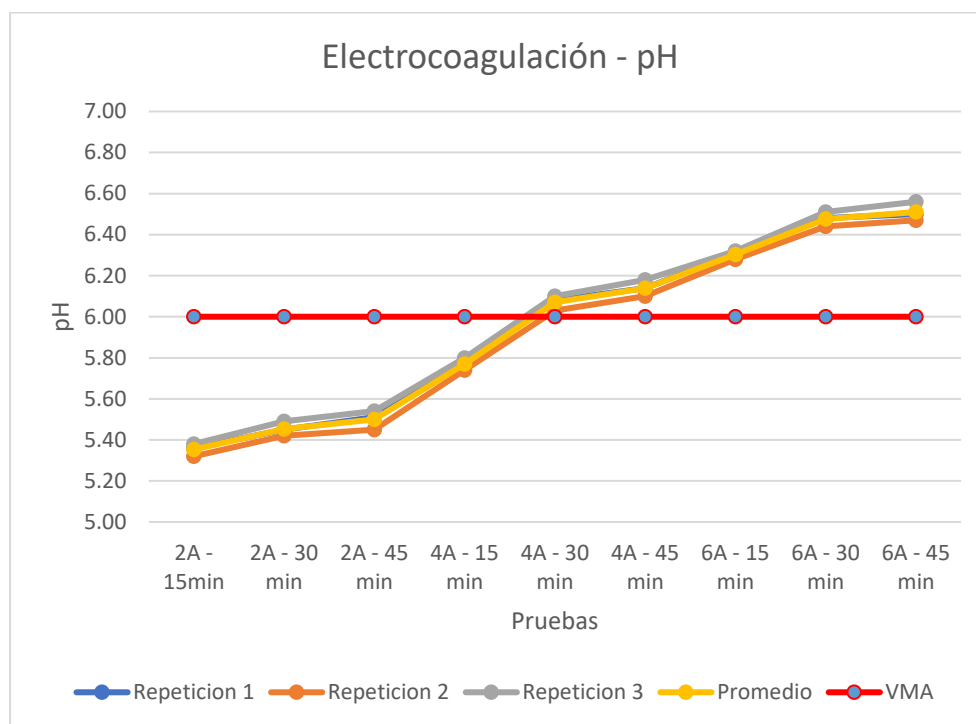
*Tratamiento por electrocoagulación - pH*

<b>Pruebas</b>	<b>Repetición 1</b>	<b>Repetición 2</b>	<b>Repetición 3</b>	<b>Promedio</b>
2A - 15min	5.36	5.32	5.38	5.35
2A - 30 min	5.45	5.42	5.49	5.45
2A - 45 min	5.51	5.45	5.54	5.50
4A - 15 min	5.77	5.74	5.8	5.77
4A - 30 min	6.08	6.03	6.1	6.07
4A - 45 min	6.14	6.1	6.18	6.14
6A - 15 min	6.31	6.28	6.32	6.30
6A - 30 min	6.48	6.44	6.51	6.48
6A - 45 min	6.5	6.47	6.56	6.51

*Nota.* Cada una de las pruebas fueron realizadas independientemente entre si

**Figura 40**

Gráfica de líneas de electrocoagulación - pH



Se observa un incremento progresivo del pH conforme se aumentaba la intensidad de corriente y el tiempo de exposición. Este comportamiento es coherente, debido a la hidrólisis de los iones férricos generados en el ánodo forma especies como  $Fe(OH)_2$  y  $Fe(OH)_3$ , las cuales consumen protones ( $H^+$ ) y contribuyen a elevar el pH del medio. No se realizó un ajuste de pH previo al tratamiento, dado la electrocoagulación por sí sola tiende a neutralizar medios ácidos.

El efluente original tenía un pH de 3.55 y, luego del tratamiento, los valores han alcanzado hasta 6.56, para 6 A – 45 min. Este aumento del pH favorece la remoción del cromo, ya que la precipitación del cromo trivalente ( $Cr^{3+}$ ), que es la forma predominante en medios ácidos tras la reducción del cromo hexavalente ( $Cr^{6+}$ ), ocurre eficientemente entre pH 5.5 y 7.5 mediante la formación de  $Cr(OH)_3$ . Recordando por la caracterización inicial, que estamos en un medio ligeramente oxidante, en una celda de electrocoagulación tenemos zonas

reductoras en donde el cromo hexavalente se reduce a cromo trivalente, y por ende precipita. Por tanto, el aumento natural del pH durante el tratamiento no solo valida el principio operativo del sistema, sino que también genera condiciones óptimas para la remoción del cromo.

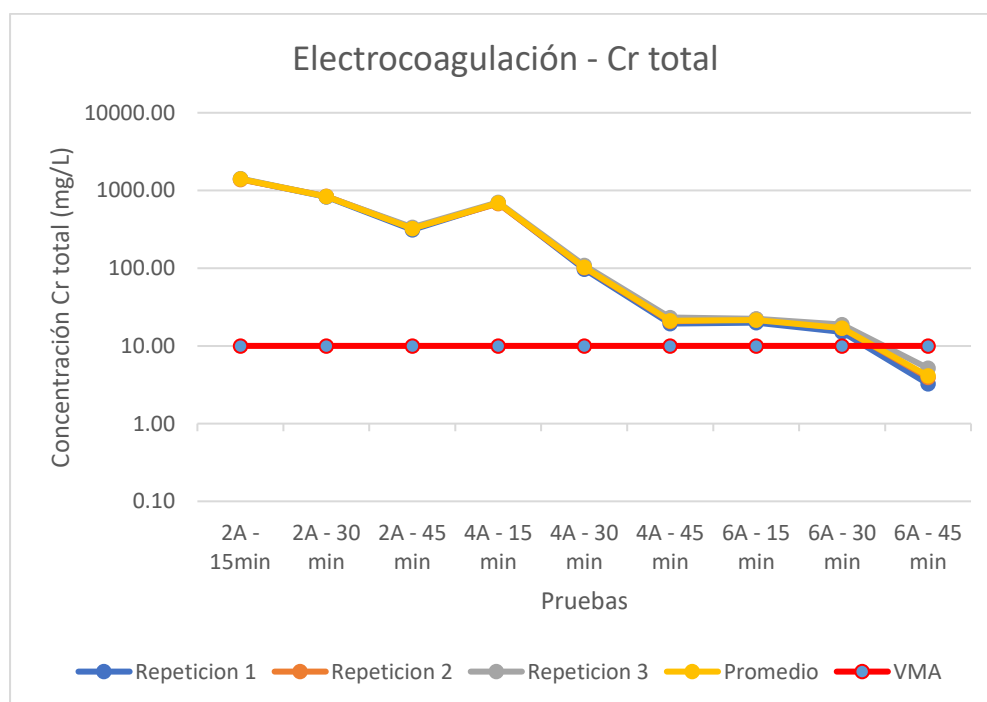
**Tabla 9**

*Tratamiento por electrocoagulación – Cr total (mg/L)*

Pruebas	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
2A - 15min	1404.52	1387.3	1424.12	1405.31
2A - 30 min	824.88	842.7	838.56	835.38
2A - 45 min	311.82	326.15	335.8	324.59
4A - 15 min	689.3	678.1	705.12	690.84
4A - 30 min	96.84	101.92	108.92	102.56
4A - 45 min	19.33	20.77	23.24	21.11
6A - 15 min	19.99	22.16	22.3	21.48
6A - 30 min	15.206	16.88	18.85	16.98
6A - 45 min	3.25	3.92	5.16	4.11

**Figura 41**

*Gráfica de líneas de electrocoagulación – Cr total*



Se observa que la concentración de cromo total en el efluente experimentó una disminución progresiva conforme aumentaron la intensidad de corriente y el tiempo de tratamiento, pasando de valores superiores a 1400 mg/L en las condiciones iniciales (2 A – 15 min) hasta alcanzar concentraciones por debajo de 5 mg/L en la condición más intensa (6 A – 45 min), incluso por debajo del VMA.

La hidrólisis de los iones  $Fe^{3+}$  genera flóculos de hidróxidos férricos, que actúan como coagulantes, facilitando el arrastre del  $Cr^{3+}$  precipitado. En cuanto a la gráfica de líneas, se tuvo que utilizar una escala logarítmica debido a las grandes diferencias de valores de concentración antes y después de las pruebas de tratamiento, con el VMA.

El tratamiento mediante electrocoagulación permitió una remoción muy significativa lo cual resalta la efectividad del proceso, cabe recordar que las condiciones del efluente tratado fueron complejas, pues este se caracterizó por tener muy altas concentraciones iniciales de cromo total y fuerte acidez.

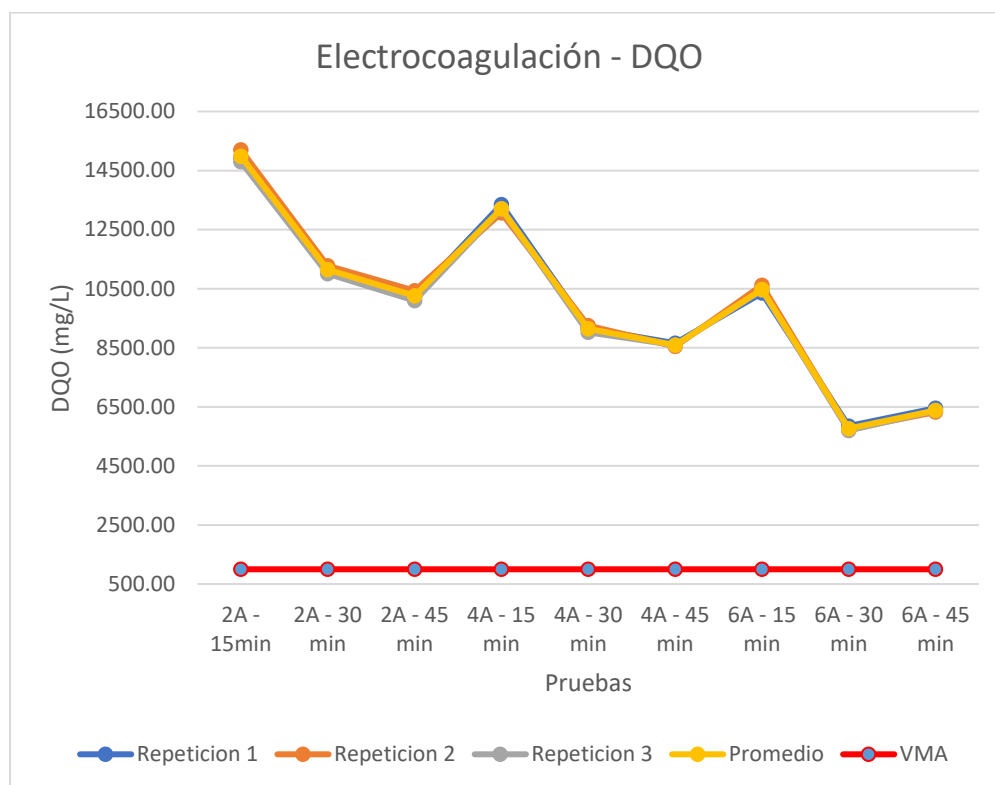
**Tabla 10**

*Tratamiento por electrocoagulación – DQO (mg/L)*

<b>Pruebas</b>	<b>Repetición 1</b>	<b>Repetición 2</b>	<b>Repetición 3</b>	<b>Promedio</b>
2A - 15min	14950	15200	14800	14983.33
2A - 30 min	11150	11280	11010	11146.67
2A - 45 min	10250	10430	10100	10260.00
4A - 15 min	13350	13070	13200	13206.67
4A - 30 min	9150	9255	9020	9141.67
4A - 45 min	8650	8540	8590	8593.33
6A - 15 min	10350	10610	10450	10470.00
6A - 30 min	5850	5745	5700	5765.00
6A - 45 min	6450	6320	6370	6380.00

**Figura 42**

*Grafica de líneas de electrocoagulación - DQO*



Se puede observar que la Demanda Química de Oxígeno (DQO) mostró una tendencia general de disminución a medida que se incrementaban el tiempo de tratamiento y la intensidad de corriente, pasando de valores superiores a 14,000 mg/L en las condiciones iniciales (2 A – 15 min) hasta alcanzar valores cercanos a 5700 mg/L en la condición de 6 A – 30 min. Esta disminución se atribuye principalmente a la remoción de la fracción particulada y coloidal de materia orgánica, que es arrastrada o precipitada por los flóculos de hidróxidos metálicos generados en el proceso. Sin embargo, se observó que en la condición de 6 A – 45 min, la DQO aumentó ligeramente en comparación con 6 A – 30 min, lo cual podría explicarse por una posible saturación del sistema de coagulación, redisolución parcial de compuestos orgánicos atrapados o desestabilización de flóculos bajo condiciones de sobrecarga eléctrica.

Además, es importante considerar que la DQO está compuesta por una fracción insoluble, que es efectivamente removida por electrocoagulación, y una fracción soluble, que incluye sustancias orgánicas disueltas no fácilmente coagulables, las cuales suelen permanecer en el sistema tras el tratamiento. Esta particularidad explica tanto la reducción significativa observada como la imposibilidad de eliminar completamente la carga orgánica presente, pese a las condiciones intensas aplicadas.

En conjunto, los resultados evidencian una remoción eficaz, aunque parcial, de la materia orgánica oxidable, característica común en tratamientos fisicoquímicos sin etapas oxidantes adicionales.

Asimismo, pese a que las concentraciones finales de DQO no cumplieron VMA establecido (1000 mg/L), el tratamiento logró una reducción sustancial desde los 24,850 mg/L iniciales. Esta mejora evidencia la capacidad de la electrocoagulación para tratar DQO, pero es necesario identificar inicialmente que tipo de DQO tenemos que tratar, si es DQO soluble o DQO insoluble.

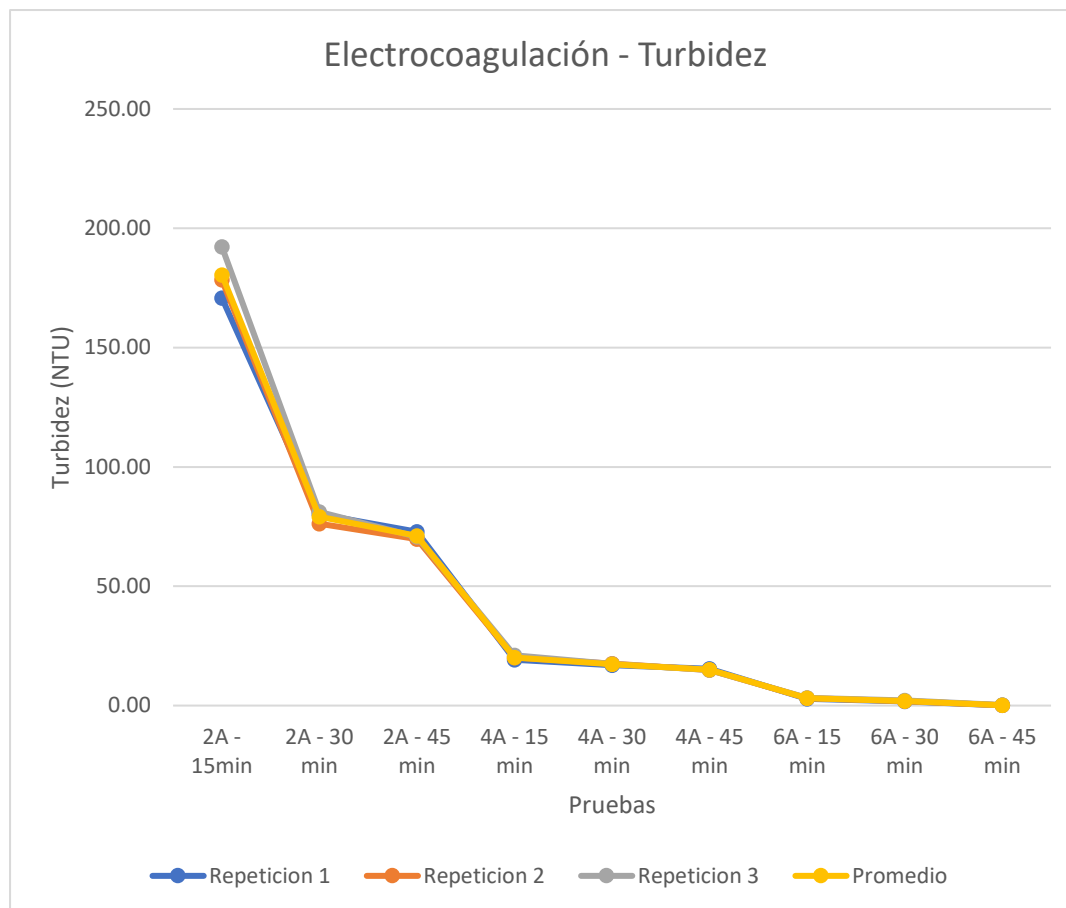
**Tabla 11**

*Tratamiento por electrocoagulación – Turbidez (NTU)*

<b>Pruebas</b>	<b>Repetición 1</b>	<b>Repetición 2</b>	<b>Repetición 3</b>	<b>Promedio</b>
2A - 15min	170.8	178.4	192.25	180.48
2A - 30 min	80.29	76.15	81.2	79.21
2A - 45 min	72.89	69.7	70.7	71.10
4A - 15 min	19.23	20.1	21.1	20.14
4A - 30 min	16.92	17.58	17.46	17.32
4A - 45 min	15.43	14.87	14.9	15.07
6A - 15 min	2.89	3.12	3.2	3.07
6A - 30 min	1.81	1.87	2.1	1.93
6A - 45 min	0.09	0.12	0.25	0.15

**Figura 43**

Gráfica de líneas de electrocoagulación - Turbidez



En cuanto a la turbidez del efluente, presentó una disminución significativa en todas las condiciones de tratamiento, evidenciando la eficiencia del proceso de electrocoagulación para remover sólidos coloidales y partículas en suspensión. Desde valores iniciales cercanos a 180 NTU en las condiciones de 2 A – 15 min, se logró reducir la turbidez hasta menos de 10 NTU en las condiciones más intensas (6 A – 15 min), alcanzando incluso un mínimo de 0.09 NTU. Esta disminución está directamente relacionada con la formación de flóculos de hidróxidos metálicos ( $Fe(OH)_3$ ), los cuales atrapan y aglomeran las partículas responsables de la turbidez, facilitando su separación del medio. Se confirma que el tratamiento logró una clarificación avanzada del efluente, eliminando prácticamente toda la carga particulada visible.

### 4.3. Estimación de la eficiencia óptima de remoción de Cromo total, DQO y Turbidez mediante electrocoagulación

Con el fin de asegurar la representatividad de los resultados, los valores obtenidos de cada variable de respuesta (cromo total, DQO y turbidez) fueron promediados utilizando el promedio aritmético de las 3 repeticiones para cada prueba, y estos fueron empleados en el cálculo de las eficiencias de remoción respectivas. Esta estrategia permitió reducir la variabilidad experimental.

**Tabla 12**

*Eficiencias promedio en la electrocoagulación – Cr total*

<b>Pruebas</b>	<b>Cr total (mg/L)</b>	<b>Eficiencia</b>
2A - 15min	1405.31	31.87%
2A - 30 min	835.38	59.50%
2A - 45 min	324.59	84.26%
4A - 15 min	690.84	66.51%
4A - 30 min	102.56	95.03%
4A - 45 min	21.11	98.98%
6A - 15 min	21.48	98.96%
6A - 30 min	16.98	99.18%
6A - 45 min	4.11	<b>99.80%</b>

*Nota.* Valores de concentración de Cr promedio de las 3 repeticiones

**Tabla 13**

*Eficiencias promedio en la electrocoagulación – DQO*

<b>Pruebas</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>Eficiencia</b>
2A - 15min	14983.33	39.70%
2A - 30 min	11146.67	55.14%
2A - 45 min	10260.00	58.71%
4A - 15 min	13206.67	46.85%
4A - 30 min	9141.67	63.21%
4A - 45 min	8593.33	65.42%
6A - 15 min	10470.00	57.87%
6A - 30 min	5765.00	<b>76.80%</b>
6A - 45 min	6380.00	74.33%

*Nota.* Valores de concentración de DQO promedio de las 3 repeticiones

**Tabla 14**

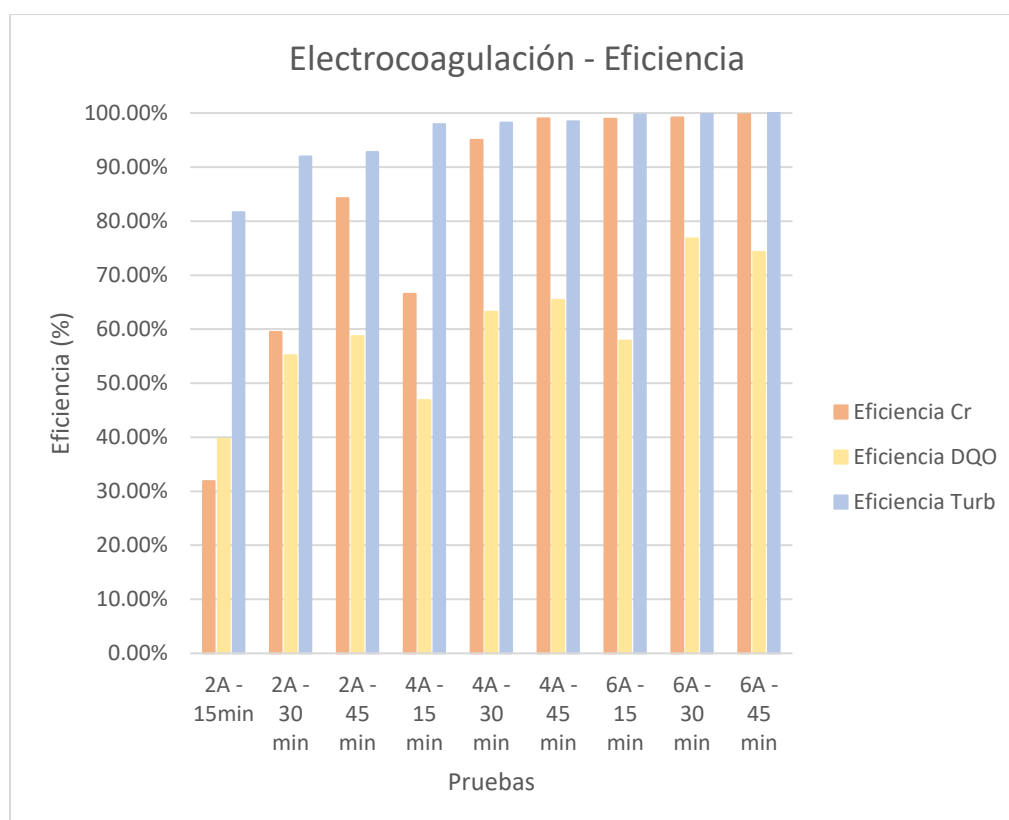
*Eficiencias promedio en la electrocoagulación – Turbidez*

Pruebas	Turbidez (NTU)	Eficiencia
2A - 15min	180.48	81.64%
2A - 30 min	79.21	91.94%
2A - 45 min	71.10	92.77%
4A - 15 min	20.14	97.95%
4A - 30 min	17.32	98.24%
4A - 45 min	15.07	98.47%
6A - 15 min	3.07	99.69%
6A - 30 min	1.93	99.80%
6A - 45 min	0.15	<b>99.98%</b>

*Nota.* Valores de turbidez promedio de las 3 repeticiones

**Figura 44**

*Gráfica de barras de las eficiencias en electrocoagulación*



Los resultados muestran que la eficiencia de remoción de contaminantes aumentó progresivamente con mayor intensidad de corriente y tiempo de tratamiento, alcanzando remociones superiores al 98 % en cromo total y turbidez en condiciones intensas. En el caso del cromo total, se logró una eficiencia de 99.80 % en la condición más exigente (6 A – 45 min), mientras que tratamientos intermedios como 6 A – 15 min ya alcanzaban 98.96 %, una diferencia mínima considerando que el tiempo se triplica. Para la DQO, si bien también se observó una disminución general, las eficiencias fueron más moderadas, con un máximo de 76.80 % en 6 A – 30 min, evidenciando las limitaciones del proceso para remover materia orgánica soluble.

En cuanto a la turbidez, el tratamiento fue altamente efectivo, obteniéndose remociones superiores al 97 % desde 4 A – 15 min, y llegando a 99.98 % en 6 A – 45 min. Estos resultados sugieren que el tratamiento 6 A – 45 min representa un punto de equilibrio entre máxima eficiencia y menor tiempo de operación. No obstante, el tratamiento 6 A – 15 min destaca como una alternativa eficiente y energéticamente más viable, ya que consigue remociones muy cercanas a los máximos con un menor consumo eléctrico, lo que será evaluado en el siguiente análisis.

#### **4.4. Determinación de la correlación no paramétrica (Spearman) entre la remoción de cromo total, DQO y turbidez**

Se realizó una prueba de correlación de Spearman entre las variables: concentración de Cromo, DQO y Turbidez, utilizando los promedios de los nueve tratamientos. Hay que considerar que no todas las variables de respuesta siguen una tendencia de distribución normal, como lo veremos en el análisis estadístico, por lo que estamos ante una correlación no paramétrica Spearman.

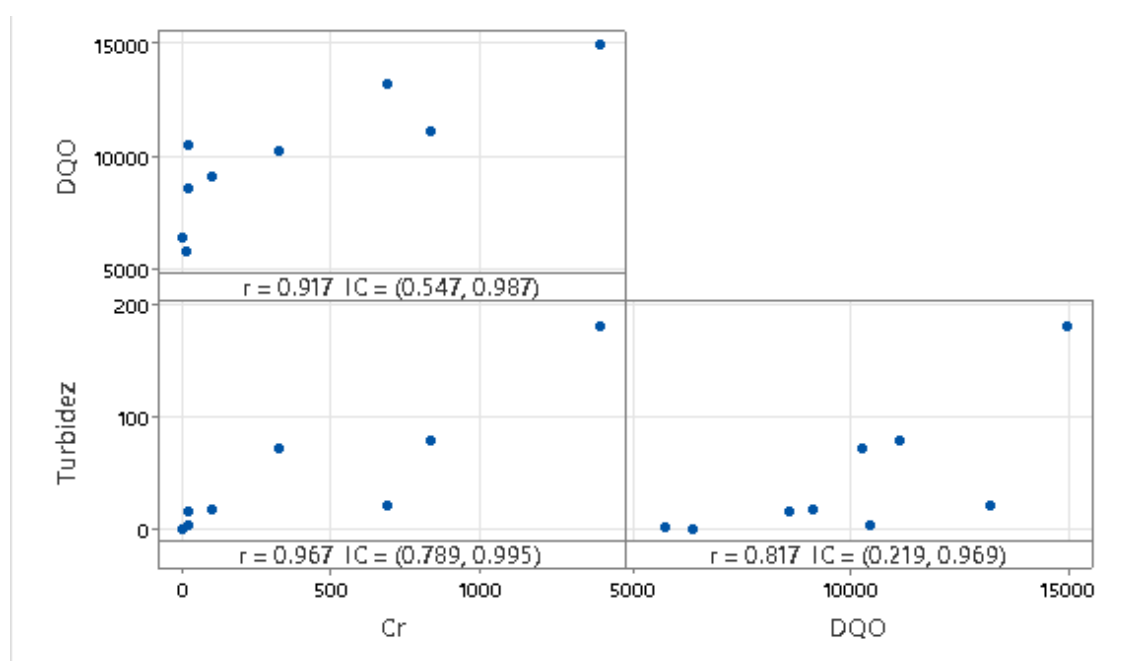
**Tabla 15**

*Correlación de Spearman Cr total vs DQO vs Turbidez*

Variables	Cromo vs DQO	Cromo vs Turbidez	DQO vs Turbidez
Coefficiente de Spearman ( $r_s$ )	0.917	0.967	0.817
Tipo de correlación	Muy fuerte positiva	Muy fuerte positiva	Fuerte positiva

**Figura 45**

*Gráfica de correlación de Spearman Cr total vs DQO vs Turbidez*



El análisis mostró una correlación positiva muy fuerte entre la concentración de Cromo y la Turbidez ( $r_s = 0.967$ ), así como entre el Cromo y la DQO ( $r_s = 0.917$ ). También se encontró una correlación positiva fuerte entre DQO y Turbidez ( $r_s = 0.817$ ). Todas las correlaciones son estadísticamente significativas al 95% de confianza, según los intervalos mostrados en la matriz de correlación. Podemos interpretar que la alta correlación positiva observada entre el cromo total y la DQO ( $r_s = 0.917$ ) indica que, bajo las condiciones específicas del presente tratamiento, ambos parámetros tienden a disminuir simultáneamente.

Si bien representan contaminantes de distinta naturaleza (uno metálico y el otro orgánico/oxidante), el proceso de electrocoagulación ha mostrado eficacia en removerlos de forma conjunta. Esto sugiere que una porción significativa de la DQO podría estar asociada a materia coloidal o partículas suspendidas con afinidad superficial por los iones metálicos, o que forman parte de la fracción insoluble que la electrocoagulación remueve con mayor eficiencia. La correlación aún más fuerte entre el cromo total y la turbidez ( $r_s = 0.967$ ) refuerza esta hipótesis, al implicar que la mayor parte del cromo removido estaría en formas particuladas o complejadas, químicamente contribuyendo directamente a la turbidez. Este comportamiento es coherente con efluentes curtiembres altamente cargados, como el evaluado en este estudio.

Cabe destacar que este patrón de correlación podría no cumplirse en otras matrices o condiciones de pH, como en sistemas muy ácidos ( $\text{pH} < 3$ ), donde la solubilidad del cromo se mantiene alta, reduciendo su remoción sin afectar significativamente la turbidez. Por tanto, estas correlaciones no deben interpretarse como universales, sino como una respuesta conjunta del sistema en el contexto de las características particulares del efluente tratado y del diseño experimental aplicado.

#### **4.5. Análisis Estadístico**

Para el análisis estadístico se consideraron tres variables de respuesta: concentración de cromo total, demanda química de oxígeno (DQO) y turbidez. Se trabajó con nueve combinaciones distintas de tratamiento, definidas por diferentes niveles de intensidad de corriente (2 A, 4 A y 6 A) y tiempos de tratamiento (15, 30 y 45 minutos), las cuales fueron asumidas como grupos independientes entre sí (sistema tipo Batch). Hay que resaltar que las variables de respuesta fueron analizadas por separado debido a que poseen naturalezas distintas, unidades diferentes y mecanismos específicos de remoción, tanto fisicoquímicas y por ello estadísticamente también. Las siguientes pruebas, tablas y gráficas fueron realizadas en el software Minitab

#### 4.5.1. Análisis estadístico para la concentración de cromo total

##### 4.5.1.1. Prueba de normalidad (Ryan-Joiner).

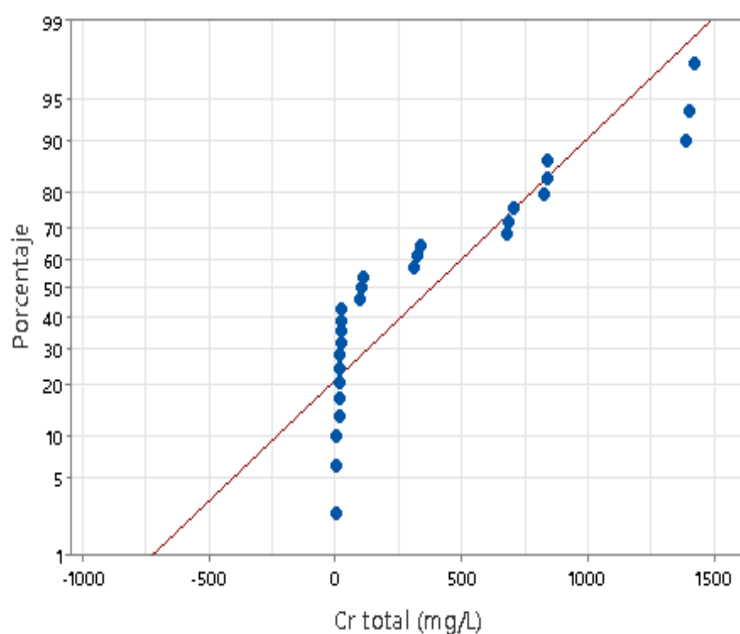
**Tabla 16**

*Prueba de Ryan-Joiner para Cr total*

<b>Concentración Cr total</b>	
Media	380.3
Desv. Est.	476.3
N	27
RJ	0.884
Valor p	< 0.010

**Figura 46**

*Gráfica de probabilidades de normalidad Q-Q para Cr total*



Podemos observar que con la prueba de Ryan-Joiner que permite verificar si los datos de concentración de cromo total siguen una distribución normal; se obtuvo un valor de  $p < 0.010$ , lo que indica que se rechaza la hipótesis nula de normalidad al 95% de confianza. Esto implica que los datos de cromo total no presentan una distribución normal. Asimismo, en el gráfico de probabilidad (Q-Q plot), se observa que varios puntos se alejan de la línea de

referencia, lo cual refuerza visualmente la conclusión estadística. Esta evidencia justifica el uso de pruebas estadísticas no paramétricas en los análisis posteriores de esta variable.

#### 4.5.1.2. Prueba de homogeneidad de varianzas (Levene).

**Tabla 17**

*Prueba de Levene para Cr total*

<b>Prueba</b>	<b>Ho</b>	<b>Estadístico</b>	<b>Valor p</b>	<b>Nivel de significancia</b>	<b>Conclusión</b>
Levene	Las varianzas son iguales	1.62	0.1888	0.05	No se rechaza Ho, varianzas son homogéneas

La prueba de homogeneidad de varianzas de Levene evalúa si las varianzas entre los tratamientos son estadísticamente iguales. Se observa que el resultado obtenido fue un estadístico Levene de 1.62 con un valor p de 0.188, superior al nivel de significancia de 0.05.

Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que no existen diferencias significativas entre las varianzas de los tratamientos.

Este resultado sugiere que las dispersiones de los datos de cromo total son homogéneas, lo cual refuerza la validez del análisis comparativo entre tratamientos, a pesar de que los datos no siguen una distribución normal, esto indica que el comportamiento de los resultados fue estable, congruentes y sin casos atípicos.

Esta información es especialmente útil como respaldo del análisis con la prueba de Kruskal-Wallis.

#### 4.5.1.3. Prueba de Kruskal – Wallis.

**Tabla 18**

*Prueba de Kruskal – Wallis para Cr total*

<b>Pruebas</b>	<b>N</b>	<b>Mediana (mg/L)</b>	<b>Rango promedio</b>	<b>Valor Z</b>
2A - 15min	3	1404.52	26	2.78
2A - 30 min	3	838.56	23	2.08
2A - 45 min	3	326.15	17	0.69
4A - 15 min	3	689.3	20	1.39
4A - 30 min	3	101.92	14	0
4A - 45 min	3	20.77	9.3	-1.08
6A - 15 min	3	22.16	9.7	-1
6A - 30 min	3	16.88	5	-2.08
6A - 45 min	3	3.92	2	-2.78
General	27		14	
Valor H (gl=8)			25.5	
Valor p			0.001	

Con la prueba de Kruskal-Wallis, se determina si existen diferencias estadísticamente significativas en la remoción de cromo total entre las 9 condiciones evaluadas (combinaciones de intensidad de corriente y tiempo de tratamiento).

Los resultados arrojaron un valor  $H = 25.50$  con 8 grados de libertad y un valor  $p = 0.001$ . Dado que el valor  $p$  es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula, concluyéndose que al menos una de las medianas de cromo total es significativamente diferente respecto a las demás.

Esto indica que la intensidad de corriente y el tiempo de tratamiento influyen de manera significativa en la remoción de cromo total, y que no todas las combinaciones evaluadas presentan el mismo nivel de efectividad.

## 4.5.1.4. Prueba post hoc (Dunn).

Tabla 19

*Prueba post hoc tipo Dunn para Cr total*

Tratamientos comparados	Valor-p ajustado (Bonferroni)	Tratamientos comparados	Valor-p ajustado (Bonferroni)	Tratamientos comparados	Valor-p ajustado (Bonferroni)
2A - 15min vs 2A - 30 min	0.0093	2A - 30 min vs 6A - 15 min	< 0.0001	4A - 15 min vs 6A - 30 min	< 0.0001
2A - 15min vs 2A - 45 min	0.0002	2A - 30 min vs 6A - 30 min	< 0.0001	4A - 15 min vs 6A - 45 min	< 0.0001
2A - 15min vs 4A - 15 min	0.0028	2A - 30 min vs 6A - 45 min	< 0.0001	4A - 30 min vs 4A - 45 min	0.0006
2A - 15min vs 4A - 30 min	< 0.0001	2A - 45 min vs 4A - 15 min	0.0028	4A - 30 min vs 6A - 15 min	0.1229
2A - 15min vs 4A - 45 min	< 0.0001	2A - 45 min vs 4A - 30 min	< 0.0001	4A - 30 min vs 6A - 30 min	0.0130
2A - 15min vs 6A - 15 min	< 0.0001	2A - 45 min vs 4A - 45 min	< 0.0001	4A - 30 min vs 6A - 45 min	< 0.0001
2A - 15min vs 6A - 30 min	< 0.0001	2A - 45 min vs 6A - 15 min	< 0.0001	4A - 45 min vs 6A - 15 min	1.0000
2A - 15min vs 6A - 45 min	< 0.0001	2A - 45 min vs 6A - 30 min	< 0.0001	4A - 45 min vs 6A - 30 min	0.9962
2A - 30 min vs 2A - 45 min	0.0093	2A - 45 min vs 6A - 45 min	< 0.0001	4A - 45 min vs 6A - 45 min	0.4143
2A - 30 min vs 4A - 15 min	0.6255	4A - 15 min vs 4A - 30 min	< 0.0001	6A - 15 min vs 6A - 30 min	1.0000
2A - 30 min vs 4A - 30 min	0.0000	4A - 15 min vs 4A - 45 min	0.0000	6A - 15 min vs 6A - 45 min	0.1229
2A - 30 min vs 4A - 45 min	0.0000	4A - 15 min vs 6A - 15 min	0.0000	6A - 30 min vs 6A - 45 min	0.3472

Tras encontrar diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos aplicados mediante la prueba de Kruskal-Wallis ( $p < 0.05$ ), se aplicó la prueba post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni, a fin de identificar entre qué pares de tratamientos se presentan dichas diferencias. Como se puede observar, prácticamente todas las comparaciones entre diferentes niveles de corriente y tiempo muestran diferencias significativas (valor- $p < 0.05$ ), especialmente cuando se comparan condiciones con baja corriente/tiempo frente a las más intensas. Las combinaciones con corriente 6A (especialmente a 30 y 45 minutos) no son significativamente diferentes entre sí, lo que sugiere un posible efecto de saturación o punto de equilibrio de remoción. Podemos interpretar, además:

- El aumento de la intensidad de corriente a un mismo tiempo de tratamiento incrementa significativamente la remoción de cromo total
- Es posible reducir el tiempo del proceso usando una mayor intensidad sin perder eficiencia en la remoción de cromo
- El tratamiento más eficaz (6A - 45 min) se distingue estadísticamente de casi todos los demás tratamientos, menos que con los tratamientos similares de 6A.

#### 4.5.2. Análisis estadístico para la DQO

##### 4.5.2.1. Prueba de normalidad (Ryan-Joiner).

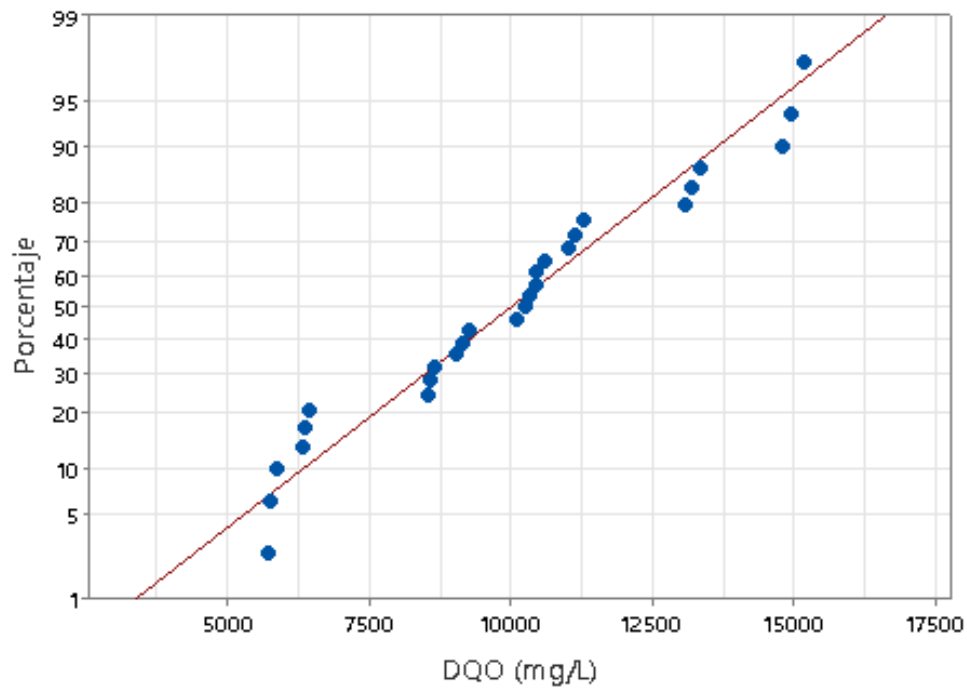
**Tabla 20**

*Prueba de Ryan-Joiner para DQO*

<b>DQO</b>	
<b>Media</b>	9994
<b>Desv. Est.</b>	2854
<b>N</b>	27
<b>RJ</b>	0.978
<b>Valor p</b>	< 0.100

**Figura 47**

*Gráfica de probabilidades de normalidad Q-Q para DQO*



En el caso de la DQO, se obtuvo un estadístico  $RJ = 0.978$  y un valor  $p < 0.100$ , con un tamaño muestral de  $n = 27$ , una media de  $9994 \text{ mg/L}$  y una desviación estándar de  $2854 \text{ mg/L}$ .

Dado que el valor  $p$  es mayor a  $0.05$ , y considerando un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , no se rechaza la hipótesis nula de normalidad.

Se concluye que los valores de DQO presentan una distribución aproximadamente normal, lo que permite continuar con análisis estadísticos que asumen normalidad, si corresponde.

#### 4.5.2.2. Prueba de homogeneidad de varianzas (Levene).

**Tabla 21**

*Prueba de Levene para DQO*

Prueba	Ho	Estadístico	Valor p	Nivel de significancia	Conclusión
Levene	Las varianzas son iguales	0.51	0.836	0.05	No se rechaza Ho, varianzas son homogéneas

Con el fin de verificar si las varianzas entre los tratamientos aplicados para la DQO eran homogéneas, se aplicó la prueba de Levene. El valor p obtenido fue de 0.836, lo cual es mayor que el nivel de significancia de 0.05. Por tanto, no se rechaza la hipótesis nula de igualdad de varianzas, lo que indica que las varianzas entre los grupos son homogéneas. Este resultado, junto con la distribución normal verificada (RJ, valor  $p > 0.10$ ), permite continuar con un análisis de varianza paramétrico (ANOVA) de un factor.

#### 4.5.2.3. Prueba ANOVA.

**Tabla 22**

*Prueba Anova para DQO*

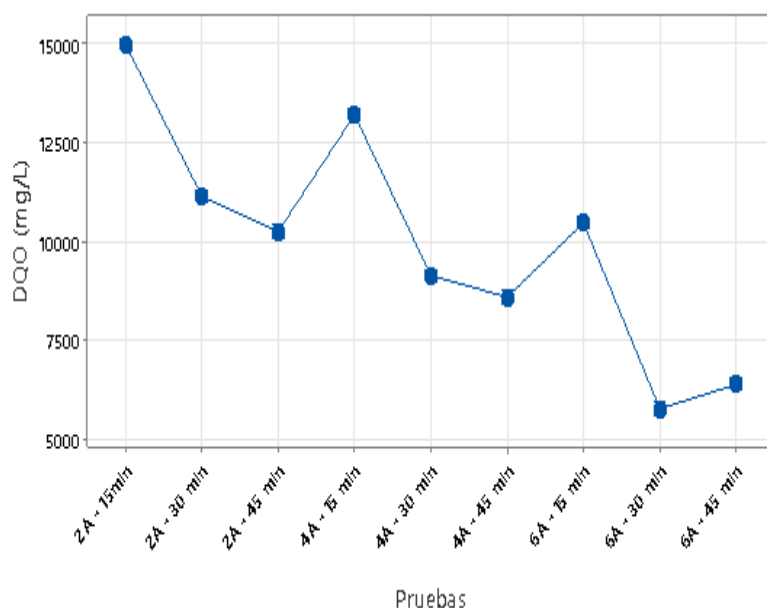
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Pruebas	8	211423269	26427909	1582.33	< 0.0001
Error	18	300633	16702		
Total	26	211723902			

S	$R^2$	$R^2$ (ajust)	$R^2$ (pred)	Nivel de confianza
129	99.86%	99.79%	99.68%	95%

**Figura 48**

*Gráfica de intervalos para DQO vs Pruebas*



Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para evaluar si existían diferencias significativas en los valores de DQO (mg/L) entre las distintas combinaciones de intensidad y tiempo de ensayo. Los resultados mostraron que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ( $F = 1582.33$ ;  $p < 0.001$ ). Esto permite rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias, concluyendo que al menos una combinación de tratamiento presenta un comportamiento distinto en términos de DQO. Respecto a la validez del modelo, los supuestos del Anova cumplidos son:

- Normalidad de residuos: confirmada por la gráfica de probabilidad normal
- Homogeneidad de varianzas: ya fue comprobada previamente por la prueba de Levene ( $p = 0.836$ ).
- El modelo explica el 99.87% de la variabilidad total en los datos, lo cual indica que los tratamientos explican casi toda la variación en los valores de DQO.

#### 4.5.2.4. Prueba Post Hoc Tukey.

**Tabla 23**

*Prueba Post Hoc Tukey para DQO*

Tratamiento	Media (mg/L DQO)	Grupo (Tukey)
2A - 15 min	14,983	A
4A - 15 min	13,206.70	B
2A - 30 min	11,146.70	C
6A - 15 min	10,470.00	D
2A - 45 min	10,260.00	D
4A - 30 min	9,141.70	E
4A - 45 min	8,593.30	F
6A - 45 min	6,380.00	G
6A - 30 min	5,765.00	H

Mediante la prueba de comparaciones múltiples de Tukey al 95 % de confianza, se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre varios tratamientos en cuanto a la remoción de la DQO. El tratamiento más eficaz fue el de 6 A durante 30 minutos, con una media de 5,765 mg/L, agrupado como H, el cual mostró diferencia significativa respecto a todos los demás. En contraste, el tratamiento 2 A – 15 min presentó la media más alta (14,983 mg/L), siendo el menos eficaz y agrupado como A.

Se observó que conforme aumentó la intensidad de corriente y el tiempo de tratamiento, las medias de DQO disminuyeron progresivamente, con algunas excepciones. Además, ciertos tratamientos compartieron letras del mismo grupo, lo cual indica que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre ellos; por ejemplo, 6 A – 15 min y 2 A – 45 min, ambos en el grupo D. En conjunto, estos resultados permiten afirmar que el tratamiento con 6 A durante 30 minutos fue el más eficiente en términos de reducción de carga orgánica, con respaldo estadístico significativo.

### 4.5.3. Análisis estadístico para la turbidez

#### 4.5.3.1. Prueba de normalidad (Ryan-Joiner).

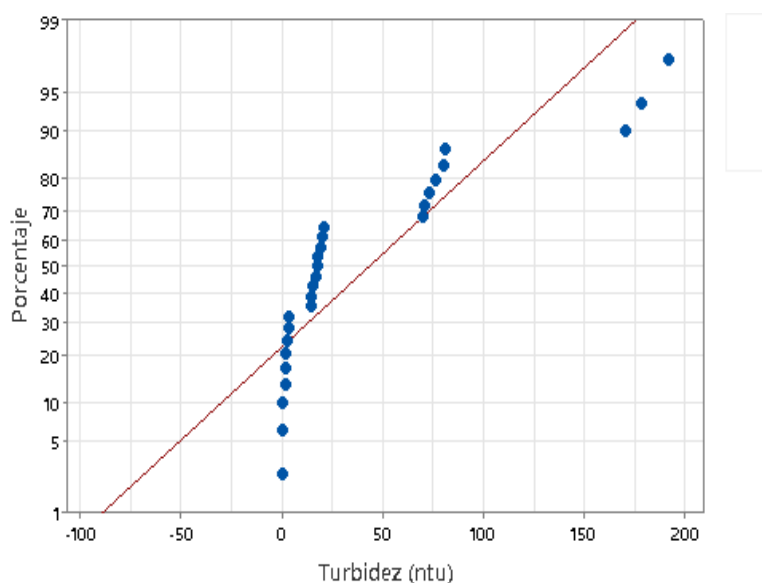
**Tabla 24**

*Prueba de Ryan-Joiner para Turbidez*

Turbidez	
Media	43.16
Desv. Est.	57.01
N	27
RJ	0.856
Valor p	< 0.010

**Figura 49**

*Gráfica de probabilidades de normalidad Q-Q para Turbidez*



Se aplicó la prueba de normalidad de Ryan-Joiner (RJ) sobre los datos de turbidez, obteniéndose un coeficiente RJ de 0.856 y un valor  $p > 0.010$ . Dado que el valor  $p$  es menor al nivel de significancia del 5 %, se rechaza la hipótesis nula de normalidad, concluyéndose que los datos no siguen una distribución normal. Por tanto, para los análisis estadísticos posteriores relacionados, se recurrió a pruebas no paramétricas.

#### 4.5.3.2. Prueba de homogeneidad de varianzas (Levene).

**Tabla 25**

*Prueba de Levene para turbidez*

Prueba	Ho	Estadístico	Valor p	Nivel de significancia	Conclusión
Levene	Las varianzas son iguales	2.58	0.045	0.05	Se rechaza Ho, varianzas no son homogéneas

Se realizó la prueba de Levene para evaluar la homogeneidad de varianzas entre los grupos de tratamientos con respecto a la turbidez. El estadístico de prueba fue 2.58 con un valor p de 0.045, lo cual es menor al nivel de significancia del 5 %. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de varianzas, concluyéndose que las varianzas no son homogéneas entre los tratamientos.

#### 4.5.3.3. Prueba de Kruskal-Wallis.

**Tabla 26**

*Prueba de Kruskal – Wallis para Turbidez*

Pruebas	N	Mediana (NTU)	Rango promedio	Valor Z
2A - 15min	3	178.4	26	2.78
2A - 30 min	3	80.29	23	2.08
2A - 45 min	3	70.7	20	1.39
4A - 15 min	3	20.1	17	0.69
4A - 30 min	3	17.46	14	0
4A - 45 min	3	14.9	11	-0.69
6A - 15 min	3	3.12	8	-1.39
6A - 30 min	3	1.87	5	-2.08
6A - 45 min	3	0.12	2	-2.78
General	27		14	
Valor H (gl=8)			25.71	
Valor p			0.001	

Para evaluar si existían diferencias estadísticamente significativas en los niveles de turbidez entre los distintos tratamientos de electrocoagulación, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, dado que la prueba de Levene ( $p = 0.045$ ) indicó que no se cumplía el supuesto de homogeneidad de varianzas.

Los resultados mostraron diferencias significativas entre grupos ( $H = 25.71$ ;  $gl = 8$ ;  $p = 0.001$ ), lo que permite rechazar la hipótesis nula de igualdad de medianas y sugiere que al menos un tratamiento generó una reducción de turbidez significativamente distinta respecto a los demás.

## 4.5.3.4. Prueba Post Hoc (Dunn).

Tabla 27

*Prueba Post Hoc Tipo Dunn para Turbidez*

Tratamientos comparados	Valor-p ajustado (Bonferroni)	Tratamientos comparados	Valor-p ajustado (Bonferroni)	Tratamientos comparados	Valor-p ajustado (Bonferroni)
2A - 15 min vs 2A - 30 min	0.034	2A - 30 min vs 6A - 15 min	0.001	4A - 15 min vs 6A - 30 min	0.005
2A - 15 min vs 2A - 45 min	0.018	2A - 30 min vs 6A - 30 min	0.001	4A - 15 min vs 6A - 45 min	0.003
2A - 15 min vs 4A - 15 min	0.001	2A - 30 min vs 6A - 45 min	0.001	4A - 30 min vs 4A - 45 min	1
2A - 15 min vs 4A - 30 min	0.001	2A - 45 min vs 4A - 15 min	0.045	4A - 30 min vs 6A - 15 min	0.016
2A - 15 min vs 4A - 45 min	0.001	2A - 45 min vs 4A - 30 min	0.02	4A - 30 min vs 6A - 30 min	0.006
2A - 15 min vs 6A - 15 min	0.001	2A - 45 min vs 4A - 45 min	0.021	4A - 30 min vs 6A - 45 min	0.004
2A - 15 min vs 6A - 30 min	0.001	2A - 45 min vs 6A - 15 min	0.001	4A - 45 min vs 6A - 15 min	0.017
2A - 15 min vs 6A - 45 min	0.001	2A - 45 min vs 6A - 30 min	0.001	4A - 45 min vs 6A - 30 min	0.007
2A - 30 min vs 2A - 45 min	1	2A - 45 min vs 6A - 45 min	0.001	4A - 45 min vs 6A - 45 min	0.005
2A - 30 min vs 4A - 15 min	0.007	4A - 15 min vs 4A - 30 min	1	6A - 15 min vs 6A - 30 min	1
2A - 30 min vs 4A - 30 min	0.003	4A - 15 min vs 4A - 45 min	1	6A - 15 min vs 6A - 45 min	0.599
2A - 30 min vs 4A - 45 min	0.003	4A - 15 min vs 6A - 15 min	0.015	6A - 30 min vs 6A - 45 min	1

La prueba de Kruskal-Wallis evidenció diferencias estadísticamente significativas en las medianas de turbidez entre los distintos tratamientos ( $p = 0.001$ ). Para identificar entre qué pares de tratamientos se encontraban estas diferencias, se aplicó la prueba post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni, revelando que la mayoría de las comparaciones entre tratamientos con intensidades y tiempos distintos fueron estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ). Podemos interpretar, además:

- Los tratamientos con mayor intensidad de corriente (6 A) y tiempos más prolongados (30 y 45 minutos) presentaron diferencias significativas respecto a casi todos los demás tratamientos, especialmente frente a los de 2 A y 4 A.
- La tendencia evidencia que al aumentar tanto la intensidad como el tiempo de tratamiento, la remoción de turbidez mejora significativamente, lo que respalda la eficacia de la electrocoagulación bajo condiciones más exigentes.
- Solo algunas comparaciones puntuales, como entre tratamientos de 4 A y 6 A de tiempo intermedio (por ejemplo, 4A-30 min vs 4A-45 min), no mostraron diferencias significativas, lo cual sugiere una posible meseta en la eficiencia para esos niveles.

## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente estudio, el tratamiento más eficiente fue el de 6 amperios durante 45 minutos, con el cual se alcanzaron remociones del 99.80% de cromo total, 74.33% de DQO y 99.98% de turbidez. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Muñoz et al. (2022), quienes aplicaron electrocoagulación con electrodos de aluminio a aguas residuales de curtiembre y reportaron una remoción máxima de 99.77% en turbidez y 74.18% en DQO al emplear 4 electrodos planos durante 45 minutos. A pesar de utilizar materiales distintos (aluminio vs. hierro), ambos estudios demuestran que tiempos prolongados y una adecuada configuración de electrodos permiten alcanzar eficiencias elevadas. Cabe resaltar que en el presente trabajo se logró una mayor remoción de turbidez y una eficiencia similar en DQO, lo cual reafirma el potencial de la electrocoagulación, siempre que se optimicen parámetros como la intensidad de corriente, número de electrodos y el tiempo de operación. A su vez podemos resaltar la influencia de un reactor cilíndrico en cuanto a un reactor paralelepípedo rectangular.

En comparación con Aguirre et al. (2022), quienes emplearon electrodos de aluminio para la remoción de cromo hexavalente en efluentes de curtiembre (concentración inicial de 3.20 mg/L), en esta investigación se utilizó hierro como material electrolítico, enfocándose en la remoción de cromo total a partir de un efluente con una carga significativamente más alta de cromo total (2062.6 mg/L). Aguirre reportó una remoción máxima del 89.71% bajo condiciones de 8 A y 20 minutos, con un sistema de 6 placas de aluminio y sin mayor énfasis en la variación del pH. En contraste, en este estudio se utilizó un diseño experimental también con 6 electrodos, pero de hierro, variando la corriente entre 2 A, 4 A y 6 A y los tiempos de tratamiento entre 15, 30 y 45 minutos. Se observó un aumento progresivo del pH desde un valor inicial fuertemente ácido (3.55) hasta valores cercanos a la neutralidad (6.51), lo que refleja el efecto buffer generado por la hidrólisis de los iones ferroso y férrico liberados. Esta elevación natural del pH, sin necesidad de ajuste externo, favoreció la formación de hidróxidos

metálicos de mayor capacidad adsorbente. Como resultado, se obtuvo una remoción máxima del 99.80% de cromo total a 6 A y 45 minutos, superando la eficiencia en los resultados de Aguirre et al. (2022), tanto en eficiencia como en concentración tratada. Esto sugiere que, ante concentraciones elevadas de cromo, el hierro resulta más eficiente que el aluminio, posiblemente por el mayor peso molecular de los flóculos generados y su capacidad de coprecipitación; incluso sin ajustar el pH, la electrocoagulación con hierro puede controlar la acidez inicial del efluente, aspecto no abordado en el antecedente.

Hartati et al. (2024), en su investigación concluyeron que el pH ácido (valor 4) ofreció los mejores resultados en la remoción de cromo, alcanzando una eficiencia de hasta 99.94% bajo una corriente de 1.5 A y un tiempo de 3 horas. Este hallazgo contrasta con los resultados obtenidos en la presente investigación, donde, a pesar de partir de un pH fuertemente ácido (3.55), no se realizó ningún ajuste previo. Fue el propio proceso de electrocoagulación, mediante el uso de electrodos de hierro, el que elevó progresivamente el pH sin necesidad de intervención externa. Aun así, se logró alcanzar eficiencias similares, como el 99.80% de remoción de cromo en condiciones de 6 A y 45 minutos. Esto evidencia que, en determinadas condiciones, el sistema puede autorregularse en cuanto al pH y aun así obtener resultados altamente efectivos, reduciendo tanto el tiempo de tratamiento como la necesidad de ajustes químicos previos, lo cual aporta una ventaja operativa y económica relevante frente al estudio comparado. Hay que recordar, que como lo visto en la presente investigación, en la remoción de cromo, el uso de electrodos de hierro es efectivo, pues a pH entre 5.5 y 7.5 se da la precipitación del cromo trivalente ( $Cr^{3+}$ ), que es la forma predominante en medios ácidos tras la reducción del cromo hexavalente ( $Cr^{6+}$ ) formando  $Cr(OH)_3$ .

En cuanto al diseño del reactor, es destacable la similitud entre el presente estudio y el de Villalobos et al. (2020), quienes utilizaron seis ánodos de aluminio y lograron eficiencias de remoción superiores al 90% en turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), cromo (III), además de una reducción del 70% en la demanda química de oxígeno (DQO), trabajando con una densidad de corriente de 6 mA/cm<sup>2</sup> y una velocidad de rotación controlada. De forma similar, en el presente estudio se utilizó un reactor cilíndrico con seis electrodos de hierro fijos, alcanzando una eficiencia máxima del 99.80% en remoción de cromo total (de 2062.6 a 4.11 mg/L), 99.98% en turbidez (de 983 a 0.15 NTU) y 76.80% en DQO (de 24850 a 5765 mg/L), bajo una intensidad de corriente de 6 A durante 30 minutos. Aunque el sistema de Villalobos integró una mejora mecánica mediante rotación para optimizar la transferencia de masa y mezcla, los resultados del presente trabajo demuestran que incluso sin dicha complejidad es posible alcanzar remociones iguales o superiores, especialmente en lo referente al cromo total, lo que evidencia la efectividad del hierro como material de electrodo y la eficiencia del diseño propuesto. La desventaja de no tener un sistema rotatorio como en la presente investigación es el constante mantenimiento a las placas de hierro que debemos de hacer, en cada prueba.

Hay que recordar que la electrocoagulación remueve la DQO insoluble (particulada), mientras que la DQO soluble presenta mayor resistencia. Por ello, el proceso alcanza un punto óptimo de remoción donde la eficiencia máxima se estabiliza e incluso puede disminuir si se prolonga demasiado el tiempo, debido a la redisolución de compuestos, saturación del sistema o formación de coloides secundarios, esto explica la diferencia con la investigación de Cerna y Gamboa (2021) y la baja correlación de spearman que encontraron entre remoción de cromo y DQO, a diferencia de lo encontrado en el presente estudio.

## VI. CONCLUSIONES

6.1. La caracterización del efluente de la empresa de curtiembres evidenció que sus parámetros fisicoquímicos exceden los Valores Máximos Permisibles establecidos en el Decreto Supremo N.º 010-2019-VIVIENDA. El valor de cromo total fue de 2062.6 mg/L, superando más de 200 veces el valor máximo de 10 mg/L. Asimismo, la demanda química de oxígeno (DQO) alcanzó los 24850 mg/L, rebasando en más de 24 veces el valor máximo de 1000 mg/L, mientras que la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) fue de 830 mg/L, rebasando el valor máximo de 500 mg/L. Los sólidos suspendidos totales (SST) alcanzaron los 1444.5 mg/L y los aceites y grasas llegaron a 1131.7 mg/L, ambos por encima de sus respectivos valores máximos admisibles de 500 mg/L y 100 mg/L. El pH del efluente se registró en 3.55, indicando una fuerte acidez que también incumple el rango permitido de 6 a 9, y una temperatura de 35°C que es el límite establecido. Estos resultados confirmaron que el efluente no cumple con los valores establecidos por los VMA, para su disposición final a un sistema de alcantarillado, lo cual valida la primera hipótesis específica planteada y demuestra la necesidad de un tratamiento efectivo que permita reducir estos niveles antes de su vertimiento.

6.2. Se concluye que la intensidad de corriente y el tiempo de tratamiento influyen directamente en la dinámica del proceso de electrocoagulación, modulando la velocidad de remoción del cromo total en el efluente de curtiembre. A intensidades mayores (6 A), se observó una disminución acelerada de la concentración de cromo, alcanzando valores más cercanos a la norma en tan solo 15 minutos, mientras que a intensidades menores (2 A), se requirieron hasta 45 minutos para lograr reducciones significativas. Además, se evidenció un incremento progresivo del pH durante los tratamientos, desde valores iniciales ácidos (~5.35) hasta valores cercanos a la neutralidad (~6.51), sin necesidad de ajuste previo, lo cual favoreció la formación de hidróxidos metálicos y la posterior precipitación del cromo. Por otro lado, la

DQO mostró un comportamiento menos marcado frente a estas variables, pues se logró remover principalmente la fracción insoluble (material particulado o coloidal), mientras que la fracción soluble presentó mayor resistencia al tratamiento, evidenciando la selectividad del proceso hacia compuestos no disueltos. Finalmente, se registró una reducción muy significativa en los valores de turbidez en todos los tratamientos, confirmando la capacidad de la electrocoagulación para remover sólidos suspendidos y partículas coloidales de manera eficiente desde las primeras etapas del proceso. Estos resultados confirman que el aumento de la intensidad de corriente permite alcanzar objetivos de tratamiento en menor tiempo, validando el efecto planteado en la segunda hipótesis específica. Sin embargo, a mayor intensidad de corriente, mayor generación de espuma y lodos por segundo, aspecto importante a considerar en el diseño de una celda electrolítica.

6.3. Se concluye que el tratamiento por electrocoagulación alcanzó eficiencias óptimas de remoción superiores a los planteados en la tercera hipótesis específica, para los tres parámetros evaluados: cromo total, demanda química de oxígeno (DQO) y turbidez, validando la tercera hipótesis específica planteada. El mejor resultado se obtuvo con una intensidad de corriente de 6 amperios y 45 minutos de tratamiento, logrando una eficiencia del 99.80% Cr y 99.98% en turbidez. En cuanto a la remoción de la DQO, el mejor resultado se obtuvo a los 6 amperios y 30 min, logrando una eficiencia del 76.80%, evidenciando la DQO soluble existente en el efluente. Estos valores reflejan la alta efectividad del sistema frente a contaminantes metálicos, materia orgánica y sólidos presentes en el efluente curtidor, posicionando a la electrocoagulación como una alternativa viable para el tratamiento de este tipo de aguas residuales

6.4. Se concluye que existe una correlación positiva fuerte y significativa entre las variables Cromo total, DQO y Turbidez durante el tratamiento por electrocoagulación, siendo esta muy fuerte entre la concentración de Cromo y la Turbidez ( $r_s = 0.967$ ), así como entre Cromo y DQO ( $r_s = 0.917$ ), y fuerte entre DQO y Turbidez ( $r_s = 0.817$ ). Estas correlaciones sugieren que la remoción de dichos contaminantes ocurre de forma simultánea y relacionada, posiblemente debido a que una fracción considerable de la DQO está asociada a partículas coloidales o suspendidas con afinidad superficial por cromo, o a la fracción insoluble removida eficientemente por el proceso. El resultado más destacado es la correlación Cromo–Turbidez, que indica que gran parte del cromo presente se encuentra en formas particuladas o complejadas que afectan directamente la turbidez del efluente. Este comportamiento se alinea con las características típicas de los efluentes de curtiembre y el diseño experimental aplicado, aunque se advierte que tales correlaciones podrían no repetirse en condiciones de pH extremas o matrices distintas.

Como conclusión general, la presente investigación permitió evaluar la aplicación de la electrocoagulación a escala piloto como alternativa de tratamiento para efluentes de curtiembre, demostrando una alta efectividad en la remoción de cromo total, DQO y turbidez (>75%) bajo las condiciones experimentales estudiadas validando así la hipótesis general planteada, por tanto la electrocoagulación constituye una tecnología viable y eficiente para el tratamiento de efluentes industriales de curtiembres.

## VII. RECOMENDACIONES

7.1. Evaluar mecanismos de rotación o limpieza de electrodos, pues durante el tratamiento, se observó la formación espuma y lodos que redujeron la eficiencia del sistema al cubrir los electrodos (menor superficie reactiva). Por ello, se recomienda implementar mecanismos de rotación, agitación, vibración o autolimpieza mecánica para evitar el ensuciamiento superficial y garantizar una mayor vida útil y eficiencia de los electrodos.

7.2. Selección adecuada del tipo de electrodo según el contaminante objetivo, ya que la eficiencia del proceso depende en gran medida del tipo de electrodo utilizado. Es necesario estudiar las reacciones electroquímicas asociadas para seleccionar el material más adecuado.

7.3. Uso combinado con tratamientos posteriores, pues si bien la electrocoagulación es efectiva como tratamiento, se recomienda combinarla con tecnologías complementarias para remover cargas residuales, por ejemplo: Carbón activado o resinas de intercambio iónico, si se busca remover sales, aniones o compuestos difíciles de coagular; o procesos biológicos (como lodos activados o biorreactores anaerobios) para reducir materia orgánica soluble y sulfuros.

7.4. Fomentar investigaciones en el uso de fuentes de energía renovables para alimentar el sistema de electrocoagulación, como energía solar mediante paneles fotovoltaicos, o energía eólica, buscando reducir la huella energética del tratamiento. También se recomienda explorar el empleo de electrodos elaborados con materiales reciclables que contengan hierro o aluminio, siempre que se verifique que su composición permita la liberación efectiva de iones coagulantes, sin capas protectoras que inhiban su disolución.

## VIII. REFERENCIAS

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR]. (2000). *Cromo: División de Toxicología*. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-HE20-PURL-gpo31182/pdf/GOVPUB-HE20-PURL-gpo31182.pdf>
- Aguirre Mitma, J., Julcarima Laura, J., & Ramos Auccasi, C. (2022). *Reducción del contenido de cromo hexavalente por electrocoagulación en las aguas residuales de una empresa de curtiembre*. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Callao.
- Altillo. (2023). *Técnicas de producción de indumentaria: Cuero y Pieles*. <https://www.altillo.com/exámenes/uba/fadu/indumentaria/tecnicasdeindumentaria4/tectcompressed.pdf>
- Ambientum. (2022). *Determinación de la materia orgánica*. [https://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/aguas/determinacion\\_materia\\_organica.asp](https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/determinacion_materia_organica.asp)
- Amblab. (2023). *Cómo se produce la electrólisis del agua*. <https://ambar-lab.com/como-se-produce-la-electrolisis-del-agua/>
- Arango, A. (2012). *Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea*.: Scielo (Colombia). Obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552012000100006](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000100006)
- Arizábal Tejada, V. K. (2018). *Implementación de humedales artificiales para mejorar la calidad de las aguas residuales pre-tratadas de la industria del curtido de cuero en el Parque Industrial Río Seco – Arequipa, 2017* .: [Tesis de pregrado]. Univerisdad Católica de Santa María.

- ATSDR. (2012). *Cromo (Chromium)*. División de toxicología y ciencias de la salud. de [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts7.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts7.pdf)
- Averill, B., & Eldredge, P. (2012). *Principles of General Chemistry v. 1.0M*. USA: Saylor.
- Azzouz, A. (2014). *Characteristic electrolyser and parameters influencing the production of hydrogen by electrolysis of water.:* ResearchGate (Canada). <https://www.researchgate.net/profile/Abdelkrim-Azzouz/2>
- B2Brazil. (2024). *Cátodo de electrocobre Grado A 99.99%*. <https://es.b2brazil.com/hotsite/agrograftrading/catodo-de-electrocobre-grado-a-9999>
- Belzona. (2010). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Belzona Inc.
- Bonilla Granados, C., Cely Calixto, N., & Carrillo Soto, G. (2022). *Tratamientos de Aguas Residuales*. Universidad Francisco de Paula Santander.
- BrainKart. (2021). *Electrolysis of Water*. Obtenido de BrainKart: [https://www.brainkart.com/article/Electrolysis-of-Water\\_43496/](https://www.brainkart.com/article/Electrolysis-of-Water_43496/)
- Bravo, L., Virú, P., Rodriguez, R., Sierra, L., Flores, J., Tineo, F., . . . Pilco, A. (2024). *Sustainability Prediction by Evaluating the Emergy of a Co-Treatment System for Municipal Wastewater and Acidic Water Using Intermittent Electrocoagulation*. MDPI (Callao). <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/21/3081>
- Britannica, E. (29 de Febrero de 2016). *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/electrochemistry>
- Cabrera Hernandez, J., Martinez Cruz, G., Martinez Morua, G., Ridriguez Pozos, M., & Rodriguez Hidalgo, M. (2012). *Electroquímica para I.Q. (actividades experimentales)*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Cabrera, I. (2 de Mayo de 2023). *Celda electrolítica*. <https://prezi.com/p/zlubmm5wwt-p/celda-electrolitica/>
- Campos, J. (2022). *Capítulo 8 - Piquel*. QUIN.
- Castillo Rodríguez, F. (2022). *Principio fundamental de la electrólisis de Faraday*. <https://roymaplast.com/principio-fundamental-de-la-electrolisis/>
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua [CIDTA]. (2021). *Coagulación y Floculación del Agua*. Universidad de Salamanca.
- Centro de Tecnologías Ambientales [CTA]. (2019). *Proyecto de tratamientos de agua a una industria de curtiembre - Curtiembre Sudamericana S.A.C.* Senati. <https://es.scribd.com/document/728228938/Tratamiento-De-Agua-Residual-Industria-de-Curtiembre>
- Cerna Huertas, L., & Gamboa Zavala, A. (2021). *Condiciones técnicas del proceso de electrocoagulación para una remoción eficiente de cromo y DQO en aguas residuales industriales de curtiembre*. [Tesis de pregrado]. Universidad Privada del Norte.
- Chirme Hanco, D. (18 de Octubre de 2023). Arequipa: detectan a empresas de Río Seco que causan contaminación. *El Buho*. <https://elbuho.pe/2023/10/arequipa-detectan-a-empresas-de-rio-seco-que-causan-contaminacion/>
- Chuquiruna, E. (2018). *Proceso de curtido de las pieles*. <https://es.scribd.com/document/394586819/Proceso-Curtiembre-docx>
- Cisneros, O., & Saucedo, H. (2016). *Reuso de aguas residuales en la agricultura*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- David, P. (7 de Julio de 2022). *Qué es la electrólisis y para qué se utiliza*. motor.es: <https://www.motor.es/que-es/electrolisis>

- Decreto Supremo N.º 010-2019-VIVIENDA. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. (11 de marzo de 2019). <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/272120-010-2019-vivienda>
- Del Pilar, N. (2023). *Efectos de la suplementación con Cromo en el cerdo*. <https://biotecnov.com.co/efectos-de-la-suplementacion-con-cromo-en-el-cerdo/>
- Departamento de Ingeniería Metalúrgica [DIM], D. d. (2023). *Electrometalurgia*. Chile: Universidad de Santiago de Chile.
- Drinan, J. (2001). *Water and wastewater treatment A guide for the nonengineering professional*. CRC PRESS.
- Drogui, P., Tyagi, R., Y. Surampalli, R., C. Zhang, T., Yan, S., & Zhang, X. (2022). *Electro-Coagulation and Electro-Oxidation in Water and Wastewater Treatment*. ASCE.
- EcologíaHoy. (2011). *El cromo como tóxico ambiental*. <https://www.ecologiahoy.com/el-cromo-como-toxico-ambiental>
- ELIKA, S. A. (2021). *Cromo*. ELIKA. de <https://www.elika.eus/es/fichas-de-peligros/cromo/>
- Esparza, E., & Gamboa, N. (2001). Contaminación debida a la industria curtiembre. *Revista De Química*, 15(1), 41–63. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/4756>
- Eurogrow. (2020). *La importancia del pH del agua de riego en el huerto*. Obtenido de Pícaronablog: <https://www.picaronablog.com/materiales-huerto-urbano/riego/la-importancia-del-ph-del-agua-de-riego-en-el-huerto/>

- Flowers, P., Theopold, K., & Langley, R. (2019). *Electroquímica*.  
[https://espanol.libretexts.org/Quimica/Libro%3A\\_Qu%C3%ADmica\\_General\\_\(Open STAX\)/17%3A\\_La\\_electroquimica](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Libro%3A_Qu%C3%ADmica_General_(Open_STAX)/17%3A_La_electroquimica)
- Fuller, T., & John, H. (2018). *Electrochemical Engineering*. Wiley.
- Fundación Ecología y Desarrollo [ECODES]. (2008). *Manual de Depuración de Aguas Residuales Urbanas*. Alianza por el Agua.  
[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/28632CE6BFC3905505257DC6007FA19C/\\$FILE/1\\_pdfsam\\_MONOGRAFICO3.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/28632CE6BFC3905505257DC6007FA19C/$FILE/1_pdfsam_MONOGRAFICO3.pdf)
- Garcia, S., Maersia, M., Vieira, J., & Martinez, C. (2017). *Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies*. ELSEVIER(Brasil).  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1572665717305337>
- Garma, I., López, J., Montoro, J., & Di Laura, G. (2018). *Planeamiento Estratégico para la Industria Arequipeña del Calzado*. [Tesis de maestría]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Gug, G., Castillo, C., & Dutta, S. (2024). *Performance Restoration of Iron Electrodes by Polarity Reversal after Long-Term Surface Fouling in Wastewater Electrocoagulation*. ACS. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsestwater.3c00741>
- Gutierrez, J. (2015). *Proceso de Curtición*. <https://www.academia.edu/14275005/Curtiembre>
- Hanna. (2020). *Parámetros importantes a medir en Acuicultura*.  
<https://www.hannacolombia.com/aqua/blog/item/parametros-importantes-medir-en-acuicultura?srsltid=AfmBOoqsyWi2rT3dplGf-Uwu1CRKXPuBeEmwQu15cbt4XKjFi97dOprs>

- Hartati, E., Hasyiyati, L., Permadi, D. A., Djaenudin, Permana, D., & Putra, H. E. (2024). *Electrocoagulation Process for Chromium Removal in Leather Tanning Effluents*. JEE - Journal Of Ecological Engineering (Indonesia). <https://www.jeeng.net/pdf-183554-106558?filename=Electrocoagulation-Proces.pdf>
- Howe, K., Hand, D., Crittenden, J., Trussell, R., & Tchobanoglous, G. (2017). *Principios de tratamiento del agua*. CENGAGE LEARNING. <https://es.scribd.com/document/626431624/Principios-de-Tratamiento-Del-Agua-1>
- Huamani, F., Sayda, Q., & Gonzales, E. (2019). *Alternativa de remoción de cromo hexavalente a escala de laboratorio usando epicarpio de Vitis vinífera l*. [Tesis de pregrado]. Universidad Privada Autónoma Del Sur.
- INEOS. (2024). *Electrólisis para CHLOR-ALKALI*. <https://www.ineos.com/es/businesses/ineos-electrochemical-solutions/cloro-alkali/>
- INESCOP. (2017). *Informe Resultado Proyecto: Sin Cromo + III, Prevencion del cromo Hexavalente*. <https://www.inescop.es/images/Proyectos/Regionales/2017/SINCROMO+/InformeSINCROMODigital.pdf>
- InstitutoDelAgua. (2024). *Parámetros de Calidad del Agua: Guía Esencial para Entender y Medir la Pureza del Agua*. <https://institutodelagua.es/calidad-del-agua/parametros-de-calidad-del-aguacalidad-del-agua-2/>
- Iqbal Jarwar, A., Imran Nazir, K., & Ali Bhatti, Z. (2023). *Green and Efficient Removal of Toxic Lead and Chromium from Synthetic Leather*. Jurnal Kejuruteraan (Pakistan). Obtenido de <https://www.ukm.my/jkukm/wp-content/uploads/2024/3601/23.pdf>

- Instituto tecnologico de la Producción [ITP]. (30 de marzo de 2023). *Día mundial del cuero: La industria de curtiembres en Perú apuesta por un cambio*.  
<https://www.gob.pe/institucion/itp/noticias/736216-dia-mundial-del-cuero-la-industria-de-curtiembres-en-peru-apuesta-por-un-cambio>
- Jonathan, B. (2017). *Escuela Superior Politecnica de Chimborazo*.  
<https://es.slideshare.net/slideshow/diapositivas-leyes-de-faraday/71308546#12>
- Jordi, F. (2021). *Blog Tecnológico - Tratamiento de aguas residuales en la industria de curtidos*. SIGMA DAF Clarifiers.
- JOVIAR. (2022). *Baño electrolítico de Plata*. Obtenido de <https://www.joviar.es/bano-electrolitico/plata/>
- Lagos, L. (2018). *¿Podemos comer lo que pescamos en Montevideo?*.  
<https://asociacionoceanograficauruguay.wordpress.com/2018/04/02/podemos-comer-lo-que-pescamos-en-montevideo/>
- Lara, D. (16 de Diciembre de 2022). *¿Qué son las aguas residuales?*. Obtenido de:  
<https://flowen.com.pe/que-son-las-aguas-residuales/>
- LederPiel. (2014). *Investigación sobre cromo y cuero: un enfoque equilibrado de datos y hechos científicos*. <https://lederpiel.com/investigacion-sobre-cromo-y-cuero/>
- LederPiel. (Marzo de 7 de 2024). *El comercio mundial del sector del cuero en 2022*.  
<https://lederpiel.com/comercio-mundial-cuero-2022/>
- Lefrou, C., Fabry, P., & Jean, P. (2012). *Electrochemistry, The Basics, with Examples*. Springer.
- Lumbreras. (2014). *Química - Tomo II: análisis de principios y aplicaciones*. Lumbreras.

Manahan, S. (2017). *Environmental Chemistry - Tenth Edition*. CRC Press.

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (24 de Agosto de 2023). *Gobierno aprueba los Límites Máximos Permisibles en actividades de curtido y adobo de cuero y teñido de pieles*.  
Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/823647-gobierno-aprueba-los-limites-maximos-permisibles-en-actividades-de-curtido-y-adobo-de-cuero-y-tenido-de-pieles>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (24 de agosto de 2023). *Gobierno aprueba los Límites Máximos Permisibles en actividades de curtido y adobo de cuero y teñido de pieles*.  
<https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/823647-gobierno-aprueba-los-limites-maximos-permisibles-en-actividades-de-curtido-y-adobo-de-cuero-y-tenido-de-pieles>

Ministerio de la Producción [PRODUCE], & ITP. (2018). *Vigilancia tecnologica e inteligencia competitiva - Evaluación para la sustitución de procesos y/o productos químicos para la producción limpia en la industria de curtiembres*. Ministerio de la Producción.  
[https://www.itp.gob.pe/archivos/vtic/CCAL\\_001-2018/files/assets/downloads/page0001.pdf](https://www.itp.gob.pe/archivos/vtic/CCAL_001-2018/files/assets/downloads/page0001.pdf)

Ministerio de Salud y Protección Social [MINSALUD]. (2015). *Guía para el desarrollo de actividades de promoción y prevención en la industria de curtiembres..*  
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/6guia-actividades-pyp-curtiembres.pdf>

Ministerio Público Tutelar [MPT]. (2019). *Guia de actuación y Diagnostico de enfermedades profesionales - Exposición a cromo y a sus compuestos*. Presidencia de la Nación.

Molecular Hydrogen Institute [MHI],. (3 de Febrero de 2023). *Oxidation-Reduction Potential (ORP): A More Complete Explanation*. MOLECULAR HYDROGEN INSTITUTE.

<https://molecularhydrogeninstitute.org/oxidation-reduction-potential-orp-a-more-complete-explanation/>

Montaño Orduña, J. D. (2024). *Sólidos Disueltos: Un reto en el análisis de tratamiento en los sistemas de saneamiento*. Universidad Santo Tomás.

Moron, E. (2018). *Celdas electrolíticas. Partes y como funciona*. Obtenido de Steemit: <https://steemit.com/spanish/@emiliomoron/celdaselectroliticaspertesycomofunciona-kwmknu9dv5>

Moussa, D., El-Naas, M., Nasser, M., & Al-Marri, M. (2016). *A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges*. National Library of Medicine (Qatar). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27836556/>

Muñoz Espitia, M., Cortés Bermúdez, J., & Agudelo Valencia, R. (2022). Electrocoagulación con electrodos de aluminio para tratamiento de aguas residuales de curtiembres en Villapinzón, Cundinamarca, Colombia. *MUTIS*, 12(1). <https://doi.org/10.21789/22561498.1783>

Ojeda, E., Hing, R., & Gonzales, Y. (2012). *Estudio de la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la obtención de sólidos a partir de la vinaza*. Universidad de Oriente.

Olivares, P. (2018). *El pelambre - Curtido de pieles III*. <https://pedro-olivares.com/el-pelambre-curtido-de-pieles-iii/>

OpenStax. (2012). *Electrolisis*. <https://openstax.org/books/qu%C3%ADmica-2ed/pages/17-7-electrolisis>

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA]. (2017). *Informe de Evaluación Ambiental en el ámbito del Parque Industrial de Río Seco, provincia y departamento*

*de Arequipa, 2017.* <https://es.scribd.com/document/508826012/If-0034-2017-Oefa-de-Sdlb-Ceapio>

OrozcoLab. (30 de Abril de 2024). *¿Qué son las aguas residuales?*  
<https://www.orozcolab.info/que-son-las-aguas-residuales>

Ortiz Tibán, P. A. (2024). *Evaluación del tratamiento de electrocoagulación seguido del proceso de fitorremediación de Eichhornia crassipes en aguas residuales de curtiembre de la provincia de Tungurahua.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Institucional UTA.  
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/40891>

Palmer, & Wittbrodt. (1991). *Processes Affecting the Remediation of Chromium-Contaminated Sites.* Environmental Health Perspectives.

Pinedo, R. (2012). *Impactos ambientales generados por la curtiembre D-LEYSE, en el distrito de el Porvenir, Provincia Trujillo, Región la Libertad.* Universidad Nacional Agraria de la Selva. <https://es.scribd.com/doc/219269235/Impactos-Ambientales-Generados-Por-La-Curtiembre-D-leyse-En-El-Distrito-de-El-Porvenir-Provincia-Trujillo-Region-La-Libertad>

Pochteca. (2022). *Precipitado de metales como método de reducción de emisiones al MA.*  
<https://peru.pochteca.net/precipitado-de-metales-para-reducir-emisiones/#:~:text=La%20precipitaci%C3%B3n%20qu%C3%ADmica%20se%20utiliza,de%20los%20tratamientos%20de%20agua.>

ProMinent. (2021). *¿Por qué la medición de pH es clave en las industrias?*  
<https://marketing.prominent.co/medicion-ph-indicador-clave-para-industria/>

Quiroz, S., Menéndez, C., & Izquierdo, E. (2019). *Tratamiento de agua y aguas residuales*. Universidad Técnica de Manabí.

RACO. (2023). *Electrocoagulation: Wastewater Treatment Explained*.  
<https://www.racomán.com/blog/electrocoagulation-wastewater-treatment-explained?srsltid=AfmBOorzsswyoqLxz3QJb1biwPPWfBuifXbTKkTH8Fnf3n6yTvhJ-n93>

Raymond Chang, W. C. (2002). *Química séptima edición - CHANG*. Mc Graw Hill.

Rendulich Talavera, J. (2019). *Diseño de un modelo de gestión de producción para pequeñas curtiembres basado en buenas prácticas de manufactura y un sistema de información de dosificación e impacto de insumos de curtido – Caso: Curtiembre Fernando Quispe..*  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=346805>.

Romero Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales-Teoría y principios de diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería.

SICEX. (30 de Agosto de 2021). *Noticias - Industria del cuero: gran potencial y escalabilidad en el mercado*. <https://sicex.com/blog/industria-del-cuero-en-colombia/>

Solis Castro, Y., Zuñiga Zuñiga, L., & Mora Alvarado, D. (2017). *La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica*. Scielo (Costa Rica). [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0379-39822018000100035&script=sci\\_abstract&tlng=es#:~:text=On%2Dline%20version%20ISSN%200379%2D3982Print%20version%20ISSN%200379%2D3982](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0379-39822018000100035&script=sci_abstract&tlng=es#:~:text=On%2Dline%20version%20ISSN%200379%2D3982Print%20version%20ISSN%200379%2D3982)

StudySmarter. (2022). *Química: Leyes de Faraday*.  
<https://www.studysmarter.es/resumenes/quimica/redox/leyes-de-faraday/>

- Tegtmeyer, D., & Kleban, M. (17 de Marzo de 2014). *Investigación sobre cromo y cuero: un enfoque equilibrado de datos y hechos científicos*. <https://lederpiel.com/investigacion-sobre-cromo-y-cuero/>
- Tupia Montes, M., & Valerio Claudio, S. (2023). *Remoción de los contaminantes en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio Institucional UNAC. <https://repositorio.unac.edu.pe/item/212c1710-bdd0-4a35-9f6e-45f421d321d5>
- Universidad América Latina [UAL]. (2011). *Sesión 8 - Electro Química*. Universidad America Latina.
- Valle Alfaro, M. (2022). *Diseño de un sistema de remoción de cromo mediante electrocoagulación para curtiembres, Trujillo - 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN. <https://repositorio.upn.edu.pe/item/2ecd7271-ec1a-4dff-8662-dafced81bc5c>
- Varey, M. (6 de Abril de 2014). *Electrolisis*. <https://es.slideshare.net/slideshow/electrolisis-33191723/33191723>
- Velasquez, Y. (2020). *Determinación de sólidos totales en muestras de agua*. <https://hive.blog/hive-196387/@yusvelasquez/determinacion-de-solidos-totales-en-muestras-de-agua>
- Vepsalainen, M. (2012). *Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters*. VII.
- Villalobos, D., Alvarez, F., Arroyo, Z., Navarro, R., Peralta, J., Fuentes, R., & Perez, T. (2020). *Electrocoagulation treatment of industrial tannery wastewater employing a modified*

*rotating cylinder electrode reactor.* Elsevier (México).

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653520326862>

Vinueza, P. (2013). *Estudio de Potenciales Impactos Ambientales y Vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador.* Ministerio del Ambiente.

[https://es.scribd.com/document/319748950/Estudios-Potenciales-Impactos-](https://es.scribd.com/document/319748950/Estudios-Potenciales-Impactos-1429722041221)

[1429722041221](https://es.scribd.com/document/319748950/Estudios-Potenciales-Impactos-1429722041221)

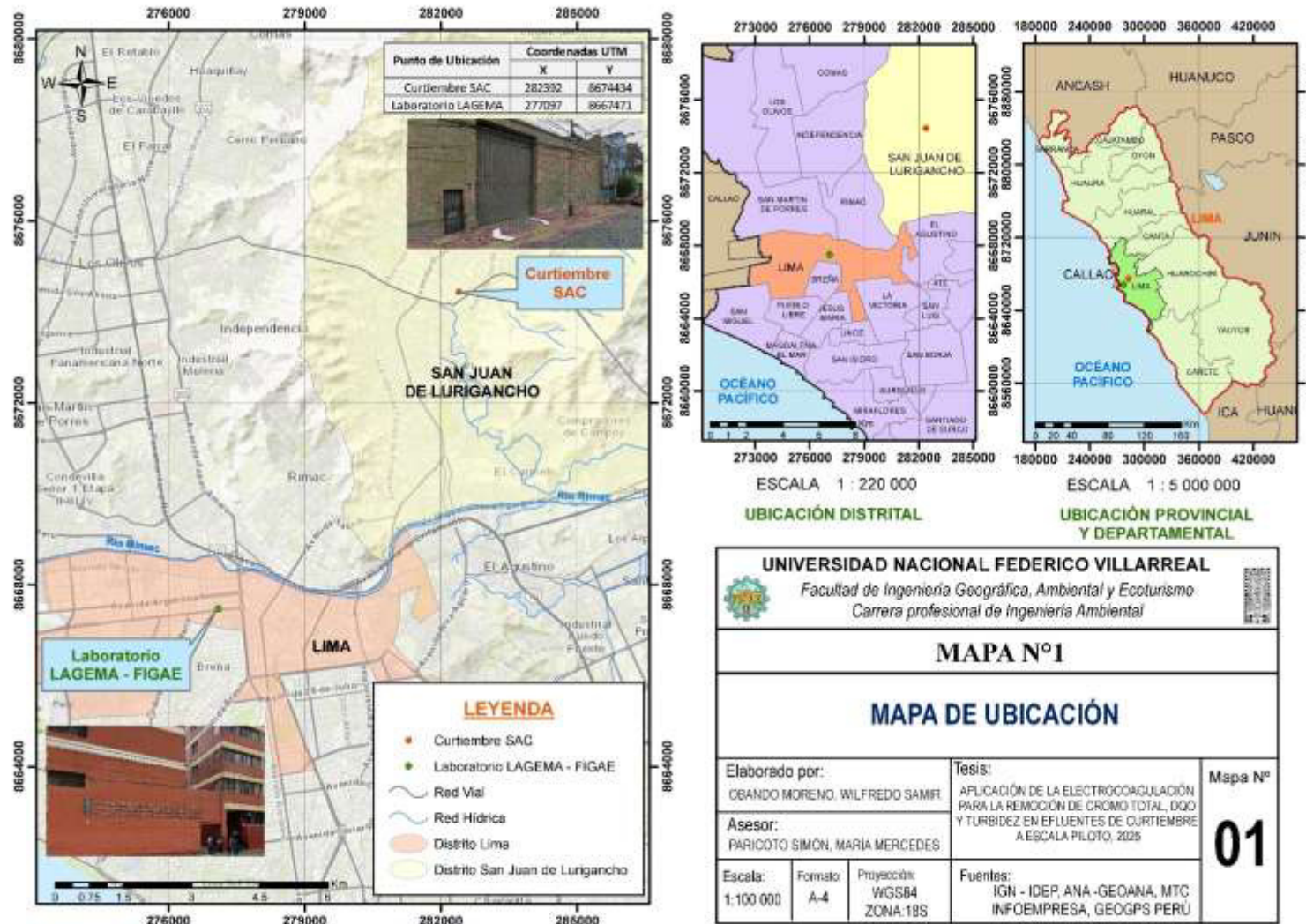
Whitten, K., Davis, R., Peck, L., & Stanley, G. (2015). *Química.* (10a. ed.). Cengage.

## IX. ANEXOS

## 9.1. Anexo A: Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Método	Dimensiones	Indicadores
<p><b>Problema General</b> ¿Cómo es la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de Cromo total, DQO y Turbidez en efluentes de curtiembre a escala piloto, 2025?</p> <p><b>Problema Especifico 1</b> ¿Cuál es la caracterización fisicoquímica del efluente de curtiembre a escala piloto antes del tratamiento por electrocoagulación?</p> <p><b>Problema Especifico 2</b> ¿Cuál es el efecto de la intensidad de corriente y tiempo de tratamiento en la electrocoagulación?</p> <p><b>Problema Especifico 3</b> ¿Cuál es la eficiencia óptima de remoción de Cromo total, DQO y Turbidez en el tratamiento por electrocoagulación?</p> <p><b>Problema Especifico 4</b> ¿Cuál es la relación que existe entre las concentraciones de Cromo total, DQO y Turbidez durante el tratamiento por electrocoagulación?</p>	<p><b>Objetivo General</b> Evaluar la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de Cromo total, DQO y Turbidez en efluentes de curtiembre a escala piloto, 2025.</p> <p><b>Objetivo Especifico 1</b> Caracterizar los parámetros fisicoquímicos del efluente de curtiembre antes del tratamiento por electrocoagulación.</p> <p><b>Objetivo Especifico 2</b> Determinar el efecto de intensidad de corriente y tiempo de tratamiento en la electrocoagulación.</p> <p><b>Objetivo Especifico 3</b> Estimar la eficiencia óptima de remoción de cromo, DQO y Turbidez obtenida en el tratamiento por electrocoagulación.</p> <p><b>Objetivo Especifico 4</b> Analizar la relación entre las concentraciones de cromo, DQO y turbidez mediante correlación estadística en el tratamiento por electrocoagulación.</p>	<p><b>Hipótesis General</b> El tratamiento mediante la electrocoagulación logra remover efectivamente Cromo total, DQO y Turbidez en efluentes de curtiembre a escala piloto, 2025.</p> <p><b>Hipótesis Especifica 1</b> Los valores de los parámetros fisicoquímicos del efluente se encuentran fuera de los Valores Máximos Admisibles, según la normatividad vigente.</p> <p><b>Hipótesis Especifica 2</b> La intensidad de corriente y el tiempo de tratamiento influyen significativamente en la eficiencia de remoción de contaminantes mediante electrocoagulación.</p> <p><b>Hipótesis Especifica 3</b> La eficiencia del proceso de electrocoagulación supera el 70% en remoción de cromo total, DQO y Turbidez en el efluente.</p> <p><b>Hipótesis Especifica 4</b> Existe una correlación positiva fuerte entre la remoción de cromo total, DQO y turbidez durante el proceso de electrocoagulación</p>	<p><b>Variable Independiente</b> Método de electrocoagulación</p> <p><b>Variable Dependiente</b> Remoción de cromo total, DQO y Turbidez</p>	<p><b>Diseño de investigación</b> Experimental</p> <p><b>Tipo de investigación</b> Cuantitativo</p> <p><b>Nivel de la investigación</b> Aplicativo</p> <p><b>Ámbito temporal</b> La presente investigación se desarrolló entre los meses de agosto del 2024 y julio del 2025</p> <p><b>Ámbito espacial</b> Esta investigación se desarrolló en dos ubicaciones: la curtiembre, donde se recolectaron las muestras de efluentes, y el Laboratorio de Geografía y Medio Ambiente de la UNFV, donde se realizaron el tratamiento y análisis.</p> <p><b>Muestra</b> Se realizo un muestreo no probabilístico. Para el ensayo experimental, se trabajó con un total de 27 litros, distribuyendo 1 litro por muestra en el sistema piloto, obteniendo 9 muestras tratadas en diferentes tiempos e intensidades de corriente con 2 repeticiones adicionales por prueba.</p> <p><b>Instrumentos</b> Protocolos, Manuales, Fichas de recolección de datos, Métodos estandarizados de análisis de laboratorio, Equipos de laboratorio.</p>	<p><b>Electrólisis</b></p> <p><b>Parámetros Físicoquímicos</b></p> <p><b>Rendimiento</b></p>	<p><b>Variable Independiente</b> N° de placas (unidades) Tipos de placas (material: Fe, Al) Config. Espacial Placas (Disposición) Config. Geomet. Del sistema (Forma) Intensidad de Corriente (A) Tiempo de tratamiento (min)</p> <p><b>Variable Dependiente</b> Concent. total Cr (mg/L) Turbidez (NTU) SST (mg/L) STD (mg/L) DQO (mg/L) pH (Escala de pH) Conductiv. (µS/cm) Salinidad (µS/cm) Temperatura (°C)</p> <p>Eficiencia (%)</p>

9.2. Anexo B: Mapa de ubicación



### 9.3. Anexo C: Panel fotográfico



**Fotografía 1**

Toma de muestras de efluente de curtiembre, con el equipo de protección personal correspondiente



**Fotografía 2**

Lectura del pH inicial  
(Caracterización)



**Fotografía 3**

Determinación de SST por gravimetría  
(Caracterización)



**Fotografía 4**

Determinación de Aceites y Grasas  
por extracción con hexano,  
gravimetría (Caracterización)



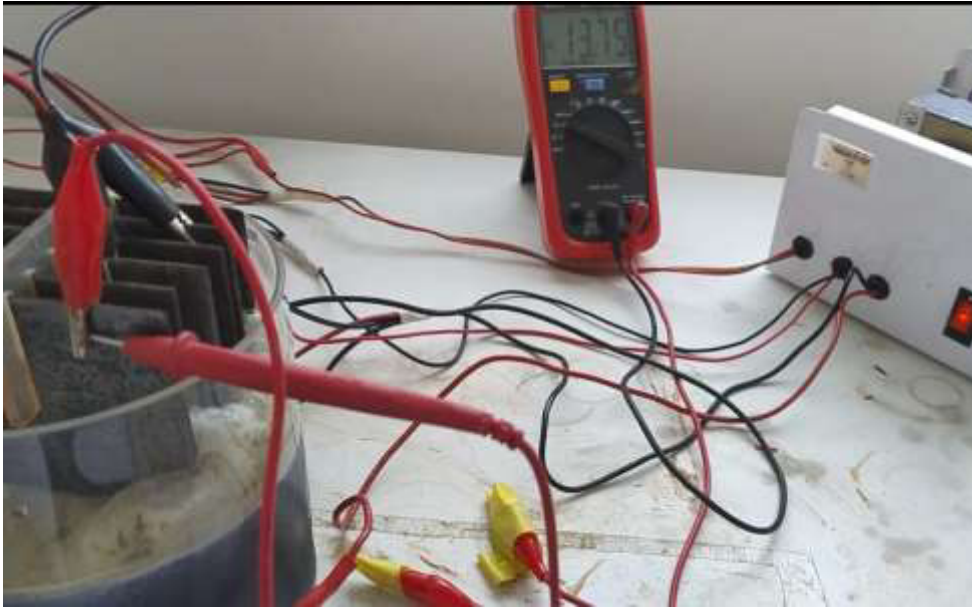
**Fotografía 5**

Celda electrolítica – Electrocoagulación,  
con 6 electrodos de hierro, y una conexión  
monopolar en serie



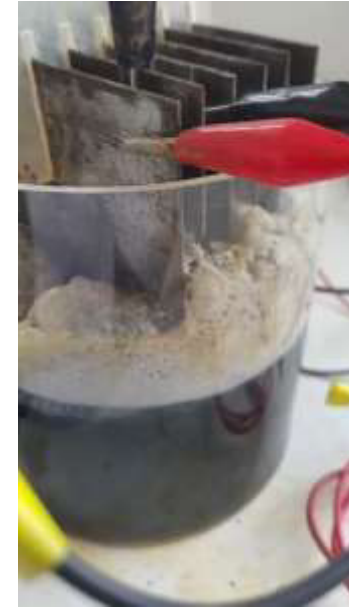
**Fotografía 6**

Resultados de una muestra tratada con  
electrocoagulación, con tiempo de sedimentación



**Fotografía 7**

Celda electrolítica con un voltímetro incorporado en el circuito. Indica 13 V, debido a que el sistema de electrocoagulación se encuentra encendido



**Fotografía 8**

Generación de espuma, y capas de lodo en el reactor de electrocoagulación



**Fotografía 9**

Lectura de la turbidez, después del tratamiento por electrocoagulación de las muestras tratadas



**Fotografía 10**

Lectura del pH, después del tratamiento por electrocoagulación de las muestras tratadas



**Fotografía 11**

Preservación de las muestras para su posterior medición de Cr total y DQO (medio ácido)



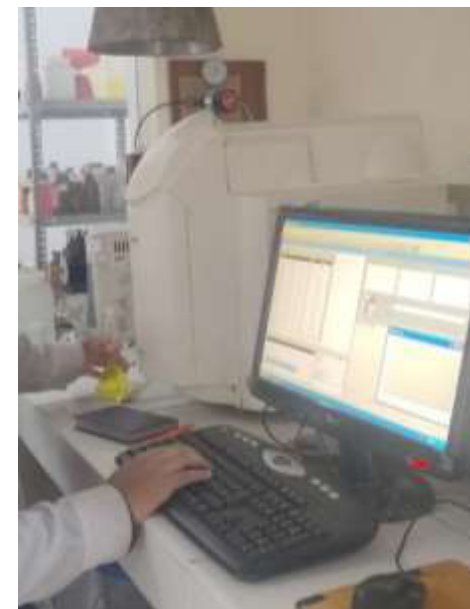
**Fotografía 12**

Preparación de viales en medio ácido, con solución de digestión para el análisis colorimétrico del DQO en muestras tratadas



**Fotografía 13**



Digestión en medio ácido de muestras tratadas para el análisis de Cromo total mediante espectrometría de adsorción atómica



**Fotografía 14**

Lectura del cromo total mediante espectrometría de adsorción atómica



9.4. Anexo D: Fichas de datos



	<p><b>“APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE CROMO TOTAL, DQO Y TURBIDEZ EN EFLUENTES DE CURTIEMBRE A ESCALA PILOTO, 2025”</b></p>	
	<p><b>FORMATO FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO</b></p>	

ESTACIÓN	EQUIPO				
	Multiparámetro	Potenciómetro	Conductímetro	Turbidímetro	Colorímetro

PARAMETROS FISICOQUIMICOS								
Monitoreo	Coordenadas UTM	pH	Temperatura	Conductiv.	STD	%NaCl	ORP	Observaciones
		Turbidez	SST	DBO	DQO	A y G	Cr total	

  
 CONSEJO DE ADMINISTRACIÓN DEL CALLAO  
  
**AHUBER OMAR VASQUEZ ARANDA**  
 CIP. N° 92507  
 INGENIERO GEOGRAFO

	<p align="center"><b>“APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE CROMO TOTAL, DQO Y TURBIDEZ EN EFLUENTES DE CURTIEMBRE A ESCALA PILOTO, 2025”</b></p>							
	<p align="center"><b>FORMATO FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE LABORATORIO</b></p>					<p><b>VERSIÓN: 01</b></p> <p><b>PÁGINAS: 2 DE 3</b></p>		
<b>Fecha de análisis</b>	<p align="center"><b>METODO: ELECTROCOAGULACIÓN</b></p>							
	<b>N° DE REACTORES</b>	<b>TIPO REACTOR</b>	<b>N° DE PRUEBAS</b>	<b>N° DE REPETICIONES</b>	<b>MUESTRAS TOTALES</b>			
<p align="center"><b>CELDA ELECTROLÍTICA</b></p>								
<b>TRATAMIENTO</b>	<b>Material electrodos Ánodo/Cátodo</b>	<b>N° placas</b>	<b>Distancia entre placas</b>	<b>Arreglo electrónico</b>	<b>Intensidad de Corriente</b>	<b>Volumen del Reactor</b>	<b>Tiempo de Tratamiento</b>	<b>Tiempo de Sedimentación</b>
	<b>Fe / Al / Mixto</b>	<b>Adimensional</b>	<b>cm</b>	<b>Serie / Paralelo</b>	<b>Amperaje</b>	<b>Litros</b>	<b>Min</b>	<b>Min</b>

	<p><b>“APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE CROMO TOTAL, DQO Y TURBIDEZ EN EFLUENTES DE CURTIEMBRE A ESCALA PILOTO, 2025”</b></p>	
<p><b>FORMATO FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE LABORATORIO</b></p>		<p><b>VERSIÓN: 01</b></p> <p><b>PÁGINAS: 3 DE 3</b></p>

Caracterización Del efluente	pH	Temp (°C)	Conductiv. (mS/cm)	STD (mg/L)	%NaCl (%)	ORP (mV)	Observaciones
	Turb (NTU)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	A y G (mg/L)	Cr total (mg/L)	

**POST – TRATAMIENTO POR ELECTROCOAGULACIÓN**

Pruebas	pH	Cr total (mg/L)	DQO (mg/L)	Turbidez (NTU)	Pruebas	pH	Cr total (mg/L)	DQO (mg/L)	Turbidez (NTU)	Pruebas	pH	Cr total (mg/L)	DQO (mg/L)	Turbidez (NTU)