



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**CARRERA DE PETRÓLEOS**

**TEMA:**

**“DESARROLLO Y DISEÑO DE UN TRATADOR DE AGUAS  
PRODUCIDAS POR ELECTROCOAGULACIÓN”**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**AUTOR:**

**CRISTIAN SAMUEL ALEGRÍA SORIANO**

**TUTOR:**

**ING. ISRAEL YAGUAL PITA, MSc.**

**LA LIBERTAD, ECUADOR**

**2025**

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**CARRERA DE PETRÓLEOS**

**TEMA:**

**“DESARROLLO Y DISEÑO DE UN TRATADOR DE AGUAS  
PRODUCIDAS POR ELECTROCOAGULACIÓN”**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**AUTOR:**

**CRISTIAN SAMUEL ALEGRÍA SORIANO**

**TUTOR:**

**ING. ISRAEL YAGUAL PITA, MSc.**

**LA LIBERTAD – ECUADOR**

**2025**

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



---

**Ing. Marllelis Gutiérrez Hinestroza,**  
**PhD.**  
DIRECTORA DE CARRERA



---

**Ing. Israel Yagual Pita, MSc.**  
DOCENTE TUTOR



---

**Ing. José Villegas Salavarría, PhD.**  
DOCENTE ESPECIALISTA



---

**Ing. David Vega González**  
SECRETARIO DEL TRIBUNAL

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Jehová, mi Dios, quien ha sido mi guía, mi refugio, y mi fuerza en cada momento de mi vida. En los momentos de duda, Él ha sido la luz que me ha mostrado el camino. En los momentos de desesperación, Su paz ha calmado mi alma.

Dedico este trabajo con todo mi corazón a mis queridos padres, Ana Soriano y Christian Alegría, quienes han sido el faro luminoso que ha guiado mis pasos en cada momento. No solo en mi vida académica, sino en cada aspecto de mi ser. Su apoyo, tanto emocional como económico, ha sido el sostén que me permitió alcanzar lo que hoy soy.

A mis amigos, esos compañeros de vida que, lejos de ser solo parte de mi camino académico, han sido mi apoyo más sincero y constante. En ustedes encontré más que amistades, encontré familia. Gracias por su lealtad, su generosidad, y, sobre todo, por su amor. Cada palabra, cada gesto, cada abrazo ha sido un recordatorio de que nunca estoy solo. Siempre han estado ahí, ayudándome a levantarme, a seguir luchando, y a celebrar cada victoria. Mi vida no sería la misma sin ustedes.

**Cristian Samuel Alegría Soriano.**

# CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema “DESARROLLO Y DISEÑO DE UN TRATADOR DE AGUAS PRODUCIDAS POR ELECTROCOAGULACIÓN” elaborado por el estudiante **CRISTIAN SAMUEL ALEGRÍA SORIANO**, egresado de la carrera de Ingeniería de Petróleos, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio COMPILATIO, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un 9% de la valoración permitida.



CERTIFICADO DE ANÁLISIS  
magister

## TESIS ALEGRÍA-GARCÍA 2024

**9%**  
Textos sospechosos

**0% Similitudes**  
0% similitudes entre comillas  
0% entre las fuentes mencionadas

**< 1% Idiomas no reconocidos**

**9% Textos potencialmente generados por la IA**

Nombre del documento: TESIS ALEGRÍA-GARCÍA 2024.docx ID del documento: b1d3a228b72bdd10c209eaa2360309b406f57409 Tamaño del documento original: 51,01 kB Autores: []	Depositante: Israel Isidro Yagual Pita Fecha de depósito: 9/12/2024 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 9/12/2024	Número de palabras: 1996 Número de caracteres: 12.859
--	---	--



Firmado electrónicamente por:  
**ISRAEL ISIDRO  
YAGUAL PITA**

Validar únicamente con FirmaEC

Ing. Israel Yagual Pita, Msc.

C.I.: 0927362988

# DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, **Cristian Samuel Alegría Soriano**, declaro bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado “**DESARROLLO Y DISEÑO DE UN TRATADOR DE AGUAS PRODUCIDAS POR ELECTROCOAGULACIÓN**”, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Petróleos, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de nuestra autoría.

Por medio de la presente declaración cedo los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,



CRISTIAN ALEGRÍA SORIANO

**Autor de Tesis**

**C.I. 0919551614**

# CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

ING. ISRAEL YAGUAL PITA, MSC.

**TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo **“DESARROLLO Y DISEÑO DE UN TRATADOR DE AGUAS PRODUCIDAS POR ELECTROCOAGULACIÓN”** previo a la obtención del Título de Ingeniero en petróleos elaborado por el señor **Cristian Samuel Alegría Soriano**, egresado de la carrera de Petróleos de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.



Firmado electrónicamente por:  
**ISRAEL ISIDRO  
YAGUAL PITA**  
Validar únicamente con FirmES

---

Ing. Israel Yagual Pita

C.I.: 0927362988

# AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profunda gratitud a Dios, fuente inagotable de fortaleza y sabiduría, quien, me ha otorgado la salud y el coraje necesarios para alcanzar esta meta tan anhelada: la culminación de la tesis para obtener el título en Ingeniería en Petróleos.

Me gustaría extender un sincero agradecimiento al Ing. Israel Yagual Pita, MSc., mi tutor, cuya dedicación, paciencia y vasto conocimiento me ha orientado incansablemente a lo largo de este proceso. Su apoyo, siempre oportuno y acertado, ha sido un faro de dirección en momentos de incertidumbre, y sin él, este trabajo no hubiera tenido la solidez que hoy presenta.

De igual manera, expreso mi gratitud a la Universidad Estatal Península de Santa Elena y a todos y cada uno de los docentes que formaron parte de nuestra carrera en Ingeniería en Petróleos. La pasión con la que compartieron su conocimiento, las lecciones que nos impartieron, y la exigencia académica que nos brindaron han sido piedras angulares en nuestra formación, tanto profesional como personal. Ustedes, con su sabiduría, han dejado una huella imborrable en mí camino.

Un agradecimiento especial al Biólogo William Santos, cuya colaboración en el ámbito de la instrumentación para los análisis fisicoquímicos del agua a tratar resultó indispensable. Su apoyo técnico, preciso y eficiente, fue crucial para poder llevar a cabo una investigación de calidad.

Finalmente, extendiendo mi gratitud al Ing. Enrique Montenegro, cuya valiosa ayuda en el taller de ingeniería industrial marcó una diferencia significativa en el desarrollo experimental de este proyecto. Su experiencia y disposición para ayudar en esos momentos decisivos fueron fundamentales para superar los retos técnicos que se enfrentaron.

# CONTENIDO

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO.....	iv
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	v
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	vi
AGRADECIMIENTOS .....	vii
CONTENIDO .....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABLAS .....	xiii
LISTA DE GRÁFICAS .....	xiv
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	1
1.2 ANTEDECENTES .....	2
1.3 HIPÓTESIS.....	5
1.4 OBJETIVOS .....	5
1.4.1 Objetivo General.....	5
1.4.2 Objetivos Específicos .....	5
1.5 ALCANCE.....	6
1.6 VARIABLES .....	6

1.6.1 Variables Dependientes: .....	6
1.6.2 Variables Independientes.....	7
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....	8
2.1. ELECTROQUÍMICA .....	8
2.2 ELECTRÓLISIS .....	8
2.2.1 CELDA ELECTROLÍTICA.....	9
2.3 CELDAS ELECTROQUÍMICAS .....	10
2.3.1 CELDA GALVÁNICA .....	10
2.4 PROCESO DE ELECTRÓLISIS.....	11
2.4.1 CARACTERÍSTICAS. ....	13
2.5 ELECTROCOAGULACIÓN .....	16
2.5.1 PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN .....	17
2.6 FACTORES QUE AFECTAN A LA ELECTROCOAGULACIÓN .....	20
2.6.1 pH.....	20
2.6.2 DENSIDAD DE CORRIENTE .....	20
2.6.3 CONDUCTIVIDAD .....	22
2.6.4 PRESENCIA DE NaCl.....	22
2.6.5 TEMPERATURA .....	23
2.6.6 TIEMPO.....	23
2.6.7 VARIABLE ELÉCTRICA .....	24
2.6.8 ESPACIAMIENTO ENTRE ELECTRODOS EN LA ELECTROCOAGULACIÓN ..	24
2.6.9 ARREGLO DE ELECTRODOS .....	25
2.7 VENTAJAS .....	27

2.7.1 ALTA EFICIENCIA EN LA ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS .....	27
2.7.2 REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AMPLIO ESPECTRO.....	27
2.7.3 ADIÓS A LOS PRODUCTOS QUÍMICOS ALMACENADOS.....	27
2.7.4 COSTOS DE OPERACIÓN MÁS BAJOS .....	28
2.7.5 LODOS MÁS COMPACTOS Y EN MENOR CANTIDAD.....	28
2.7.6 FLÓCULOS GRANDES Y ESTABLES .....	28
2.7.7 BURBUJAS DE GAS EFICIENTES .....	28
2.8 DESVENTAJAS.....	28
2.8.1 REPOSICIÓN DE LOS ELECTRODOS DE SACRIFICIO.....	28
2.8.2 LA ENERGÍA ELÉCTRICA VARIA SU PRECIO.....	29
2.8.3 COSTOS ADICIONALES POR REPOSICIÓN DEL CÁTODO.....	29
2.9 LEYES DE FARADAY .....	29
2.10 CORRIENTE ALTERNA .....	31
2.11 CORRIENTE CONTINUA .....	32
CAPITULO III: METODOLOGÍA.....	34
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	34
3.2 MATERIALES Y EQUIPOS .....	34
3.2.1 MUESTRA INICIAL DEL AGUA DE PRODUCCIÓN.....	34
3.2.2 CREACIÓN DE LA CELDA ELECTROLITICA.....	35
3.2.3 EQUIPOS.....	39
3.3 ENSAYOS DEL PROCESO ELECTROQUÍMICO.....	40
CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	42
4.1 IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL.....	47

1. Reducción de Contaminantes.....	47
2. Minimización de Residuos.....	48
3. Conservación de Recursos Hídricos .....	48
4. Disminución de la Huella Química.....	49
5. Contribución a Políticas de Sostenibilidad .....	49
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	51
5.1 CONCLUSIONES .....	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
ANEXOS .....	59

## **LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1. CELDA ELECTROLÍTICA. ....	10
FIGURA 2. CELDA GALVÁNICA.....	10
FIGURA 3. ETAPAS DEL PROCESO ELECTROLÍTICO.....	13
FIGURA 4. CRITERIOS DE CALIDAD ADMISIBLES PARA AGUAS DE USO AGRÍCOLA.....	16
FIGURA 5. PARÁMETROS DE CALIDAD ADMISIBLES PARA AGUAS DE USO AGRÍCOLA.....	16
FIGURA 6. SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN.....	18
FIGURA 7. SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ÁNODO Y CÁTODO DE ALUMINIO. ....	19
FIGURA 8. TIPO DE CONEXIÓN DE ELECTRODOS .....	26
FIGURA 9. ONDA SENOIDAL. ....	32
FIGURA 10. ELECTRODO DE ALUMINIO. ....	37

FIGURA 11. ELECTRODO DE HIERRO.....	38
FIGURA 12. CELDA ELECTROLÍTICA. ....	38
FIGURA 13. EQUIPO USADO PARA LOS ENSAYOS.....	39
FIGURA 14. PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN. ....	40
FIGURA 15. MUESTRA DE AGUA DE PRODUCCIÓN. ....	62
FIGURA 16. USO DEL OXIMETROMETRO.....	62
FIGURA 17. RECORTE DE PLACAS.....	63
FIGURA 18. USO DEL MULTIPARÁMETRO.....	63
FIGURA 19. PLACAS PEQUEÑAS DE COBRE.....	64
FIGURA 20. PULIDO DE PLACAS. ....	64
FIGURA 21. CELDA ELECTROLÍTICA. ....	65
FIGURA 22. CELDA ELECTROLÍTICA. CON MUESTRA DE AGUA.....	65
FIGURA 23. VERIFICACIÓN DE EQUIPOS. ....	66
FIGURA 24. VERIFICACIÓN DE EQUIPOS. ....	66
FIGURA 25. VERIFICACIÓN DE EQUIPOS. ....	67
FIGURA 26. VERIFICACIÓN DE EQUIPOS. ....	67
FIGURA 27. INICIO DE ENSAYOS. ....	68
FIGURA 28. PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN. ....	68
FIGURA 29. PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN EXITOSO.....	69
FIGURA 30. LIMPIEZA DE AGUA. ....	69
FIGURA 31. LIMPIEZA DE AGUA. ....	70
FIGURA 32. LIMPIEZA DE AGUA. ....	70
FIGURA 33. LODOS RESIDUALES.....	71
FIGURA 34. ANÁLISIS POSTERIORES A LA ELECTROCOAGULACIÓN. ....	71
FIGURA 35. ANÁLISIS POSTERIORES A LA ELECTROCOAGULACIÓN. ....	72

# LISTA DE TABLAS

TABLA 1. ANÁLISIS DE MUESTRA DE AGUA DE PRODUCCIÓN .....	35
TABLA 2. DIMENSIONES DEL ELECTRODO DE ALUMINIO. ....	36
TABLA 3. DIMENSIONES DEL ELECTRODO DE HIERRO. ....	37
TABLA 4. ENSAYOS DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN. ....	41
TABLA 5. VARIACIÓN DEL PH CON ÁNODO DE HIERRO.....	60
TABLA 6. VARIACIÓN DEL PH CON ÁNODO DE ALUMINIO .....	60
TABLA 7. VARIACIÓN DE SATURACIÓN DE OXÍGENO CON ÁNODO DE HIERRO .....	60
TABLA 8. VARIACIÓN DE SATURACIÓN DE OXÍGENO CON ÁNODO DE ALUMINIO .....	60
TABLA 9. VARIACIÓN DE LA SALINIDAD CON ÁNODO DE HIERRO .....	61
TABLA 10. VARIACIÓN DE LA SALINIDAD CON ÁNODO DE ALUMINIO.....	61
TABLA 11. VARIACIÓN DE SOLIDOS DISUELTOS CON ÁNODO DE HIERRO..... .....	61
TABLA 12. VARIACIÓN DE SOLIDOS DISUELTOS CON ÁNODO DE ALUMINIO .....	61

## LISTA DE GRAFICAS

GRÁFICA 1. VARIACIÓN DEL PH CON ÁNODO DE HIERRO.....	43
GRÁFICA 2. VARIACIÓN DEL PH CON ÁNODO DE ALUMINIO. ....	43
GRÁFICA 3. VARIACIÓN DE LA SATURACIÓN DE OXÍGENO EN EL ÁNODO DE HIERRO.....	44
GRÁFICA 4. VARIACIÓN DE LA SATURACIÓN DE OXÍGENO CON EL ÁNODO DE ALUMINIO .....	44
GRÁFICA 5. VARIACIÓN DE LA SALINIDAD CON EL ÁNODO DE HIERRO..... .....	45
GRÁFICA 6. VARIACIÓN DE LA SALINIDAD CON EL ÁNODO DE ALUMINIO..... .....	45
GRÁFICA 7. VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS DISUELTOS ÁNODO DE ALUMINIO. ....	46

# “DESARROLLO Y DISEÑO DE UN TRATADOR DE AGUAS PRODUCIDAS POR ELECTROCOAGULACIÓN”

**Autor:** Cristian Samuel Alegría Soriano

**Tutor:** Ing. Israel Yagual Pita, Msc.

## RESUMEN

El proyecto aborda el tratamiento de aguas producidas mediante electrocoagulación, una técnica electroquímica sostenible que elimina contaminantes sin aditivos químicos. Se inició con análisis fisicoquímico del agua, evaluando pH, salinidad, sólidos disueltos y saturación de oxígeno. Posteriormente, se diseñó una celda electrolítica con electrodos de aluminio y hierro. La corriente eléctrica genera iones metálicos que actúan como coagulantes, desestabilizando partículas coloidales y promoviendo su precipitación.

Variables como tipo de electrodo, intensidad de corriente y tiempo de tratamiento resultaron claves. Los electrodos de aluminio y hierro regularon el pH a un rango ambientalmente seguro, también redujeron sólidos disueltos, aumentaron la saturación de oxígeno y disminuyeron la salinidad.

Este estudio afirma que la electrocoagulación es una solución sólida para mitigar los impactos ambientales de la producción de petróleo. Más allá de las aplicaciones inmediatas, este proyecto sienta las bases para la innovación continua, invitando a futuras investigaciones para perfeccionar aún más el sistema y extender su uso a la gestión sostenible del agua.

Con sus claros beneficios medioambientales, esta iniciativa posiciona la electrocoagulación no solo como una herramienta para el cumplimiento, sino como un paso hacia prácticas industriales más sostenibles.

*Palabras clave: Electrocoagulación, fisicoquímico, coagulantes, coloidales, electroquímica.*

# “DEVELOPMENT AND DESIGN OF AN ELECTROCOAGULATION PRODUCED WATER TREATMENT SYSTEM”

**Autor:** Cristian Samuel Alegría Soriano

**Tutor:** Ing. Israel Yagual Pita, Msc.

## ABSTRACT

The project addresses the treatment of produced water through electrocoagulation, a sustainable electrochemical technique that eliminates contaminants without chemical additives. It began with a physicochemical analysis of the water, evaluating pH, salinity, dissolved solids and oxygen. Subsequently, an electrolytic cell was designed with aluminum and iron electrodes. The electric current generates metal ions that act as coagulants, destabilizing colloidal particles and promoting their precipitation.

Variables such as type of electrode, current intensity and treatment time were key. The aluminum and iron electrodes regulated the pH to an environmentally safe range, also reduced dissolved solids, and increased oxygen saturation and decreased salinity.

This study asserts that electrocoagulation is a robust solution to mitigate the environmental impacts of oil production. Beyond immediate applications, this project lays the foundation for continued innovation, inviting future research to further refine the system and extend its use to sustainable water management.

With its clear environmental benefits, this initiative positions electrocoagulation not only as a tool for compliance, but as a step towards more sustainable industrial practices.

*Keywords:* *Electrocoagulation, physicochemical, coagulants, colloidal, electrochemistry.*

# CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

## 1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Durante la explotación petrolera, además de la extracción de gas y crudo, se produce una considerable cantidad de agua proveniente de la formación subterránea. Esta agua, cargada de contaminantes potenciales, debe ser tratada adecuadamente para prevenir problemas ambientales y de contaminación. Cuando el agua producida recibe un tratamiento eficiente, puede reusarse en una variedad de aplicaciones: desde el riego de áreas verdes circundantes hasta el abastecimiento de redes de flujos contra incendios, sistemas de refrigeración, limpieza y, de manera crucial, para la inyección destinada a mejorar el factor de recobro del petróleo (Chen, 2024).

Con el paso del tiempo dentro de la producción petrolera, la cantidad de agua generada crece, lo que subraya la necesidad imperiosa de un método eficaz de tratamiento. En este contexto, se propone la electrocoagulación como una solución ambientalmente amigable, sencilla de implementar y libre de olores molestos. (Chen, 2024)

La electrocoagulación se fundamenta en los principios de la ley de Faraday y la ley de Ohm. La primera permite calcular la cantidad precisa de coagulante necesaria para un volumen específico de agua y el tiempo requerido para el proceso. La ley de Ohm, por otro lado, facilita la determinación del voltaje adecuado para la resistencia del material y el amperaje necesario. Este proceso electroquímico desestabiliza las partículas presentes en el agua residual, facilitando su tratamiento y posterior reutilización (Mantell, 2021).

El enfoque propuesto incluye el uso de electrodos de hierro y aluminio en una celda electrolítica para generar coagulantes in situ, que ayudarán a eliminar los contaminantes

presentes en el agua. El proyecto se centrará en aspectos cruciales como el tipo de electrodo, el tiempo de tratamiento, las variables eléctricas y la disposición de los electrodos dentro de la celda. Estos factores son determinantes para la eficacia y eficiencia del proceso de electrocoagulación, permitiendo una eliminación efectiva de contaminantes y una optimización de los recursos utilizados. (S. E. Pabón, 2020)

El desarrollo del proceso abarcará varias etapas, desde la generación de coagulantes electroquímicos hasta la formación y remoción de flóculos. Se evaluará la purificación del agua mediante análisis detallados del pH, sólidos totales disueltos, salinidad y saturación de oxígeno tanto antes como después del tratamiento, para asegurar una eficiente depuración y reutilización del agua producida (S. E. Pabón, 2020) (Garcia Segura et al., 2017).

## **1.2 ANTEDECENTES**

Diversos estudios han verificado la validez de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas producidas en la explotación petrolera. Por ejemplo: Irene Fahim y Lobna Said en su libro “Wastewater Treatment Recycling, Management, and Valorization of Industrial Solid Wastes” definen el proceso de electrocoagulación, como la generación in situ de coagulantes mediante la oxidación electrolítica de un ánodo de sacrificio, se desarrolla bajo la influencia de una corriente eléctrica dirigida a través de los electrodos. En este marco, el pH de la solución juega un papel fundamental; los iones metálicos liberados del ánodo sufren hidrólisis y, a través de reacciones espontáneas dentro de la solución, dan lugar a especies coagulantes en forma de precipitados de hidróxido. Estos hidróxidos, a su vez, actúan para facilitar la eliminación de colorantes y otras impurezas. Cabe destacar que los materiales empleados con más frecuencia como electrodos en este proceso de electrocoagulación son el aluminio y el hierro, debido a su eficacia (Fahim & Said, 2023).

Los autores; Dina T. Moussa, Muftah H. El-Naas, Mustafa Nasser, Mohammed J. Al-Marri, en su estudio: "A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials" revisan en profundidad los principios teóricos de la electrocoagulación y su aplicación en la remoción de contaminantes de diversas aguas residuales, incluyendo aguas producidas de la industria del petróleo. se menciona que esta técnica es una alternativa prometedora debido a su eficiencia, facilidad de operación y menor generación de lodos en comparación con otros métodos tradicionales (Moussa et al., 2017).

Los autores: Laleh Shamaei, Behnam Khorshidi, Basil Perdicakis, Mohtada Sadrzadeh, con su estudio "Treatment of oil sands produced water using combined electrocoagulation and chemical coagulation techniques ", mencionan a la electrocoagulación, combinada con la coagulación química (EC-CC), se presenta como una alternativa innovadora en el tratamiento de aguas, aprovechando las ventajas conjuntas que ofrecen tanto la coagulación química (CC) como la electrocoagulación. La EC, reconocida por su enfoque ecológico, se destaca entre las tecnologías de tratamiento de agua por su bajo impacto ambiental, aplicándose de manera eficiente y consistente en la remoción de partículas suspendidas provenientes de una amplia gama de aguas residuales (Shamaei et al., 2018).

Los autores Mohammad Y.A. Mollah, Paul Morkovsky, Jewel A.G. Gomes, Mehmet Kesmez, Jose Parga, David L. Cocke, con su estudio: "Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation" detallan que, dentro del amplio espectro de técnicas electroquímicas, la electrocoagulación ha despertado un interés particular, especialmente para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados. También se ha demostrado efectiva en la eliminación de productos alimenticios, residuos de petróleo, tintes textiles, flúor, desechos poliméricos y materia orgánica procedente de lixiviados de vertederos. Asimismo, es capaz de tratar partículas suspendidas, residuos generados por pulido químico y mecánico, suspensiones acuosas de partículas ultrafinas, nitrato, desechos fenólicos, arsénico,

y una variedad de contaminantes orgánicos refractarios, que incluyen lignina y EDTA (Mollah Y.A. et al., 2004).

El artículo “Application of Batch Electrocoagulation with Aluminium Electrodes for Simultaneous Removal of Organic and Heavy Metal Contaminants from Borneo Urban Rivers”, (2024), tienen como conclusión: “Este estudio informa sobre el potencial significativo de la electrocoagulación por lotes para reducir los contaminantes clave en el río Kuap. El sistema de tratamiento por electrocoagulación por lotes funcionó de manera óptima en condiciones de una corriente eléctrica de 5 A y un tiempo de residencia de 25 minutos, demostrando ser el más eficaz. Además, los niveles de hierro en el agua tratada cumplieron con el estándar de Clase I de 1 mg/L, y la demanda química de oxígeno (DQO) se redujo para cumplir con el estándar de Clase I de 10 mg/L. El pH del agua tratada se estabilizó dentro del rango aceptable de 6,5 a 8,5” (p.48) (Rahman et al., 2024).

Los autores Meijie Ren, Yonghui Song, Shuhu Xiao, Ping Zeng, Jianfeng Peng, detallaron en su artículo “Treatment of berberine hydrochloride wastewater by using pulse electro-coagulation process with Fe electrode” la tecnología de electrocoagulación por pulsos (PE) que se implementó en el tratamiento de aguas residuales refractarias que contenían clorhidrato de berberina (BH). Los resultados revelaron que, al emplear un electrodo de hierro (Fe), las eficiencias en la eliminación de contaminantes superaron notablemente a las obtenidas con un electrodo de aluminio (Al). Este hallazgo pone de manifiesto no solo la eficacia del electrodo de Fe, sino también su potencial en la optimización de procesos de depuración. Al combinar el electrodo de hierro con aguas residuales simuladas, se abre un abanico de posibilidades para mejorar los métodos tradicionales de tratamiento, destacando la importancia de elegir adecuadamente los materiales de los electrodos en función de la naturaleza específica de los contaminantes presentes. La investigación sugiere que la electrocoagulación por pulsos

podría convertirse en una solución prometedora y eficaz en la gestión de aguas (Ren et al., 2011).

### **1.3 HIPÓTESIS**

Se espera que el tratamiento de aguas producidas por la extracción de petróleo mediante electrocoagulación reduzca significativamente la concentración de sólidos suspendidos, metales pesados, regule el pH de manera eficaz. Además, se anticipa que este método será más eficiente y económico que los métodos de tratamiento convencionales, con menores costos operativos a largo plazo

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 Objetivo General**

- Elaborar y evaluar un sistema de tratamiento eficiente y amigable con el medio ambiente para aguas producidas utilizando el proceso de electrocoagulación, con el fin de reducir contaminantes y regular el pH.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar las propiedades fisicoquímicas del agua producida.
- Analizar la viabilidad ambiental del sistema.

- Desarrollar un prototipo del sistema de electrocoagulación.

## **1.5 ALCANCE**

El estudio buscará generar una serie de datos cruciales que revelen, con precisión y detalle, la capacidad de la tecnología de electrocoagulación para enfrentar el desafío de tratar, de manera eficaz, las aguas de formación generadas por la extracción petrolera. Este proyecto, ambicioso en su concepción, se centrará en el desarrollo minucioso de un sistema de tratamiento diseñado no solo para reducir, sino para mitigar significativamente los contaminantes presentes en las aguas residuales. Lo notable es que este enfoque se limitará rigurosamente al uso de tecnologías electroquímicas, evitando el empleo de productos químicos adicionales que, de otro modo, elevarían innecesariamente los costos operativos.

El objetivo, más amplio y profundo, es concebir un sistema eficiente, uno que no solo permita la reutilización del agua tratada para la reinyección en pozos (un proceso esencial para aumentar el factor de recobro en la extracción petrolera) sino que, ofrezca aplicaciones alternativas.

En su fase inicial, se procederá al diseño y desarrollo de un prototipo a escala piloto. Este prototipo abarcará desde la recolección de datos experimentales hasta la evaluación exhaustiva de la eficiencia del sistema. Una vez que se obtengan los primeros resultados, se realizarán ajustes precisos y optimizaciones técnicas, lo que hará que el sistema sea más rentable y sostenible a largo plazo.

## **1.6 VARIABLES**

### **1.6.1 Variables Dependientes:**

- Reducción de sólidos y metales disueltos: Cantidad de sólidos y metales pesados eliminados del agua de formación después del tratamiento.
- Saturación de oxígeno: Aumento de oxígeno en el agua.
- Calidad y pH del agua tratada: Características del agua cambian dependiendo de la efectividad del tratamiento y el material del electrodo después del proceso de electrocoagulación.

### **1.6.2 Variables Independientes**

- Concentración de los contaminantes iniciales y electrolitos añadidos: Niveles de sólidos suspendidos y metales pesados presentes en el agua de formación.
- Intensidad de voltaje aplicado: La intensidad de corriente que se utiliza durante el proceso de electrocoagulación.
- Tipo de electrodo (aluminio o hierro): La selección del material del electrodo influye en la calidad del agua tratada y en la eficiencia de remoción de contaminantes.
- Tiempo de electrocoagulación: El tiempo que se aplica el proceso es una variable clave para asegurar una remoción eficiente de los contaminantes

# CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

## 2.1. ELECTROQUÍMICA

Los procesos electroquímicos no son más que una compleja interacción entre reacciones de oxidación-reducción y la energía eléctrica. Partimos de una premisa clara: en estas reacciones, la corriente eléctrica no es un mero espectador, sino un actor esencial que transforma todo el escenario químico. Y como no podría ser de otra manera, al hablar de estas interacciones, estamos obligados a considerar la ley de la conservación de la materia. Pero esto no es todo; la estrecha relación con la ley de la conservación de la energía también entra en juego aquí. (Amórtegui, 2020)

Este vínculo no es casual, sino profundamente argumentado por la ley de Faraday. Según esta ley, existe una conexión directa entre la cantidad de electricidad empleada en el sistema y las masas de las sustancias que intervienen, ya sea que se desprendan en forma gaseosa o que se depositen en los electrodos o celdas. Cada electrón que fluye no solo está cambiando el equilibrio de cargas, sino que está alterando físicamente la materia, depositando átomos, descomponiendo moléculas y liberando gases. Así que, lo que parece un simple paso de corriente, en realidad está regido por principios inquebrantables: la electricidad se transforma en materia y viceversa, en un delicado equilibrio que sigue las leyes fundamentales del universo (Amórtegui, 2020).

## 2.2 ELECTRÓLISIS

El proceso en cuestión involucra una compleja reacción de oxidación-reducción, en la que se intercambian electrones de manera estratégica. Por un lado, la oxidación implica la pérdida de electrones, mientras que la reducción la ganancia, creando un delicado balance de

intercambio entre las sustancias involucradas en la reacción. Pero este proceso no se detiene ahí: su objetivo final es romper los enlaces moleculares mientras una corriente eléctrica fluye a través de un circuito cerrado, desatando una cascada de transformaciones químicas. (Amórtegui, 2020)

Para lograrlo, se requiere una solución electrolítica, es decir, una solución en la que el soluto se disuelve de tal manera que forma iones. Estos iones, flotando libremente en la disolución, facilitan el desarrollo de una reacción electrolítica, también conocida como electrólisis. A medida que la corriente pasa, los iones se activan, se liberan y reaccionan, en un proceso cargado de energía que transforma los compuestos originales, rompiendo las barreras moleculares y dando lugar a nuevas configuraciones químicas. Así, lo que parece ser simplemente un flujo de electrones, se convierte en un intrincado y dinámico juego de reacciones donde los enlaces se rompen y la materia se reconfigura, todo bajo el mando de una corriente eléctrica cuidadosamente controlada (Amórtegui, 2020) (Moradi y Moussavi, 2018).

### **2.2.1 CELDA ELECTROLÍTICA**

“La celda electrolítica es el aparato empleado para llevar a cabo la electrolisis” (Nemer, 2006). Si la celda electroquímica consume corriente de una fuente externa, como consecuencia almacena energía química, tenemos una celda electrolítica (Rull & Floristán, 2014). En la figura 1 se puede observar la fuente de energía externa y los componentes como son los dos electrodos (cátodo y ánodo) los cuales están inmersos en una solución electrolítica.

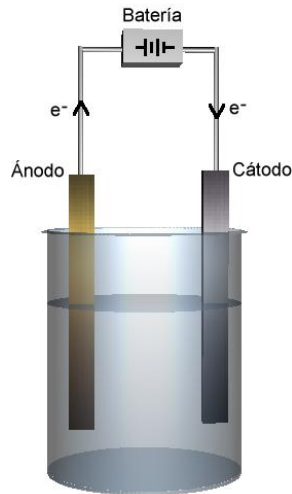


Figura 1. Celda Electrolytica. Fuente: (Rull & Floristán, 2014)

## 2.3 CELDAS ELECTROQUÍMICAS

### 2.3.1 CELDA GALVANICA

Si la celda electroquímica produce energía eléctrica, causada por el consumo de energía química, se dice que tenemos una celda galvánica o pila (Rull & Floristán, 2014). En la figura 2, podemos observar los electrodos sumergidos en fuentes electrolíticas diferentes conectados por un puente salino que hace pasar los electrones de un lado al otro, produciendo energía eléctrica.

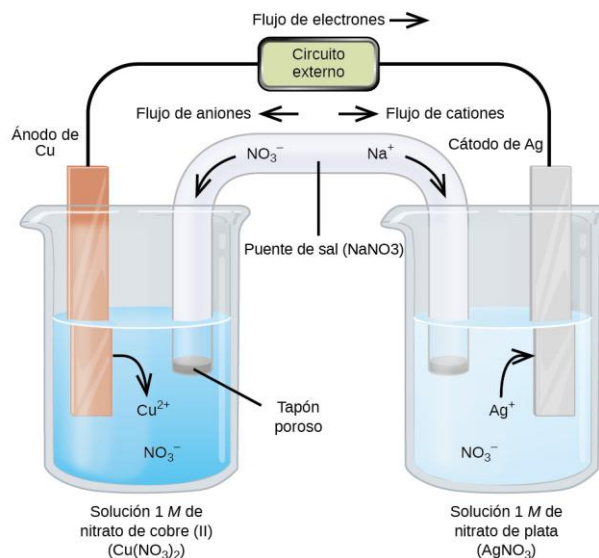


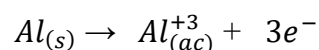
Figura 2. Celda Galvánica. Fuente: (Flowers et al., 2022)

## 2.4 PROCESO DE ELECTRÓLISIS

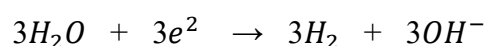
La electrólisis, un proceso químico fascinante y lleno de complejidades, descompone las sustancias presentes en una solución dentro de una celda electrolítica, que en este caso sería el electrocoagulador. Al aplicar corriente eléctrica, desencadena una serie de reacciones químicas y físicas de gran profundidad. Durante la electrólisis que tiene lugar en la electrocoagulación, emergen múltiples procesos simultáneamente: átomos y moléculas interactúan, electrones saltan entre capas energéticas, mientras las sustancias se transforman de formas que muchas veces son impredecibles a primera vista. Así, lo que ocurre va mucho más allá de una simple reacción (Beltrán, 2015).

En el corazón de una celda electroquímica, se encuentran varios electrodos, cuidadosamente conectados con cargas tanto positivas como negativas. (Beltrán, 2015) Estos electrodos, lejos de ser meras piezas de metal, juegan un papel crucial al proporcionar iones, ya sean positivos (catión) o negativos (anión), desencadenando una serie de reacciones cuya naturaleza depende directamente del material del que están hechos (Beltrán, 2015).

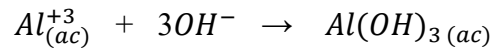
El ánodo, también conocido como el electrodo de sacrificio, es el que cede iones metálicos positivos. La placa metálica se disuelve progresivamente, y a través del proceso de oxidación electrolítica, libera los codiciados iones de  $Al^{3+}$ , los cuales son responsables de formar la sustancia química que actuará como coagulante. (Beltrán, 2015) (Murugananthan et al., 2004).



Mientras tanto, el cátodo, más resistente, no se disuelve; en su lugar, a través de la electrólisis, descompone las moléculas de agua, produciendo radicales hidroxilos ( $OH^{-}$ ) y átomos de hidrógeno ( $H^{+}$ ), desencadenando una serie de reacciones clave (Beltrán, 2015).



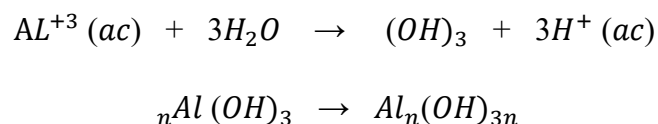
Cuando el  $Al^{3+}$  se encuentra con el radical hidroxilo ( $OH^-$ ) en soluciones alcalinas (es decir, con un pH mayor a 7), surge la especie coagulante conocida como hidróxido de aluminio,  $Al(OH)_3$  (Beltrán, 2015).



Este hidróxido de aluminio es el verdadero protagonista del proceso, actuando como coagulante al desestabilizar las cargas de las partículas contaminantes en el agua residual. Neutraliza esas cargas superficiales, provocando que las partículas se adhieran a él, dando lugar a los coágulos que facilitarán la eliminación de los contaminantes (Beltrán, 2015).

Lo interesante de la electrocoagulación es que todo el coagulante se forma in situ, a través de las reacciones que disuelven el metal del electrodo de sacrificio, liberando  $Al^{3+}$  justo cuando se necesita (Beltrán, 2015).

Una vez que las cargas de las partículas contaminantes han sido neutralizadas, comienza el proceso de coagulación en sí, donde las partículas se suspenden, dejando el agua limpia (Beltrán, 2015).



Este proceso no es al azar; sigue la ley de Faraday, que establece que la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es directamente proporcional a la cantidad de carga que pasa por el sistema. La cantidad de moles de sustancia formadas está estrictamente relacionada con la electricidad que se introduce en el sistema, lo que da a todo el proceso un carácter predecible pero altamente dinámico (Beltrán, 2015).

$$m = \frac{I * t}{96500} * \frac{M}{n}$$

$m$  = masa de la sustancia por electrodo (g)

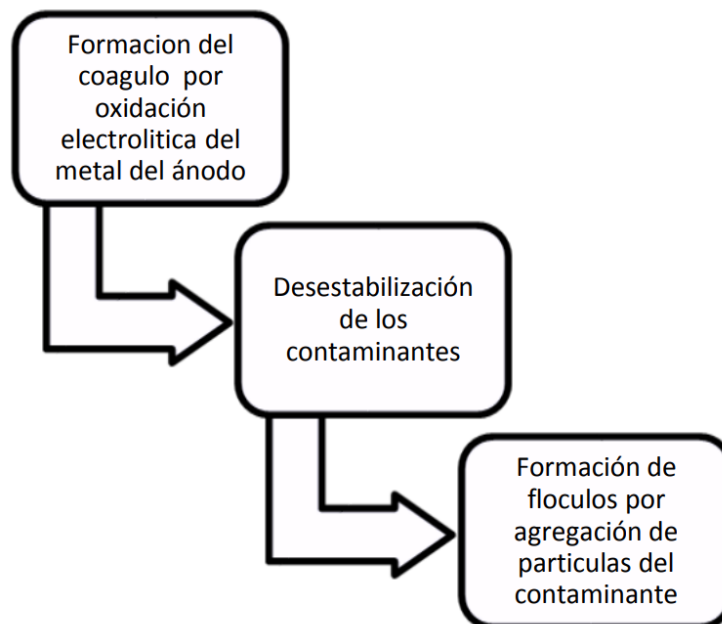
$I$  = Corriente eléctrica (A)

$t$  = tiempo transcurrido (s)

$M$  = Masa molar de la sustancia (g/mol)

$N$  = número de la sustancia como ión en la solución (e-/mol).

Al final, lo que sucede es un impresionante proceso de eliminación de contaminantes. A través de reacciones químicas bien orquestadas, los flóculos que se precipitan y suspenden logran capturar y eliminar las impurezas del agua, completando este ciclo complejo, pero sumamente efectivo (Beltrán, 2015).



*Figura 3. Etapas del proceso electrolítico. Fuente: (Ortiz, 2015)*

## 2.4.1 CARACTERÍSTICAS.

### 2.4.1.1 VIABILIDAD DEL CAPITAL

El tratamiento se configura como una tecnología accesible en términos de costos; no

obstante, la implementación de un diseño meticulosamente adaptado a las exigencias del proceso productivo puede influir considerablemente en el precio final. Factores como el tamaño de la celda electrolítica, el consumo energético, la elección entre electrodos de hierro o aluminio, y la distancia entre estos electrodos para encontrar un recipiente adecuado para la celda electrolítica (Mihir et al., 2024).

#### **2.4.1.2 SEGURIDAD**

El tratamiento se erige como un método seguro en su ejecución, dado que durante este proceso no se requiere el almacenamiento ni la manipulación de reactivos químicos, eliminando así riesgos asociados. Esta característica distintiva lo convierte en una opción particularmente atractiva, asegurando un enfoque más limpio y eficiente (Mollah et al., 2001).

#### **2.4.1.3 VERSATILIDAD**

Con el mismo sistema de tratamiento, se abre la posibilidad de eliminar una variedad de compuestos tóxicos presentes en las muestras disponibles, todo ello sin la necesidad de realizar modificaciones significativas en la celda electrolítica ni en los electrodos utilizados. Esta versatilidad destaca la eficiencia del sistema, permitiendo una adaptación fluida a diversas contaminaciones sin complicaciones adicionales (Mollah et al., 2001).

#### **2.4.1.4 SELECTIVIDAD**

Es sumamente práctico, ya que se presenta la capacidad y la facilidad de controlar el potencial eléctrico dirigido hacia los electrodos empleados ya sea el ánodo o el cátodo, lo que permite llevar a cabo la reacción electroquímica deseada con precisión. Esta habilidad de regulación transforma el proceso en un proceso controlado de interacciones, facilitando

resultados óptimos y personalizados en cada aplicación (Mihir et al., 2024).

#### **2.4.1.5 COMPATIBILIDAD AMBIENTAL**

Si el proceso electroquímico se elabora con una atención meticulosa al diseño, los compuestos tóxicos pueden transformarse en productos de bajo o incluso nulo impacto ambiental. En este contexto, se clasifica como una tecnología limpia y ecológica, dado que no recurre a reactivos químicos; en su lugar, el principal agente reactivo es el electrón. Esta característica resalta su potencial para revolucionar las prácticas de tratamiento, ofreciendo una alternativa sostenible y eficaz (Mihir et al., 2024) (Mollah et al., 2001).

El manejo adecuado de las aguas residuales generadas en la industria petrolera está estrictamente regulado por normativas nacionales, que buscan minimizar los impactos negativos sobre los recursos hídricos y preservar el medio ambiente. En Ecuador, estas normativas están diseñadas para garantizar que las aguas tratadas cumplan con los límites establecidos para su vertido o reutilización ((INEN), 2014), (NACIONAL, 2014).

El diseño y operación del prototipo de tratamiento de aguas basado en electrocoagulación debe cumplir con las normas ambientales ecuatorianas, que establecen límites específicos para parámetros como el pH, sólidos disueltos, salinidad y aceites y grasas. Cumplir con estos límites es fundamental para garantizar que el agua tratada sea apta para su vertido en cuerpos de agua, para su inyección en acuíferos, riego o como uso contra incendios (AMBIENTAL, 2002).

El cumplimiento de las normativas ambientales es crucial para garantizar que el tratamiento de aguas residuales sea sostenible. La no conformidad con los límites establecidos puede ocasionar daños irreparables a los ecosistemas acuáticos, la biodiversidad local y la calidad de los recursos hídricos, afectando directamente a las comunidades cercanas (Alegría Soriano, 2024).

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Sólidos disueltos totales		mg/l	3 000,0
Transparencia de las aguas medidas con el disco secchi.			mínimo 2,0 m
Vanadio	V	mg/l	0,1
Aceites y grasa	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3

Figura 4. Criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola (AMBIENTAL, 2002).

PROBLEMA POTENCIAL	UNIDADES	*GRADO DE RESTRICCIÓN.			
		Ninguno	Ligero	Moderado	Severo
<b>Salinidad (1):</b>					
CE (2)	Milimhos/cm	0,7	0,7	3,0	>3,0
SDT (3)	mg/l	450	450	2000	>2000
<b>Infiltración (4):</b>					
RAS = 0 – 3 y CE		0,7	0,7	0,2	< 0,2
RAS = 3 – 6 y CE		1,2	1,2	0,3	< 0,3
RAS = 6 – 12 y CE		1,9	1,9	0,5	< 0,5
RAS = 12 – 20 y CE		2,9	2,9	1,3	<1,3
RAS = 20 – 40 y CE		5,0	5,0	2,9	<2,9
<b>Toxicidad por ión específico (5):</b>					
- <b>Sodio:</b>					
Irrigación superficial RAS (6)		3,0	3,0	9	> 9,0
Aspersión	meq/l	3,0	3,0		
- <b>Cloruros</b>					
Irrigación superficial	meq/l	4,0	4,0	10,0	>10,0
Aspersión	meq/l	3,0	3,0		
- <b>Boro</b>	mg/l	0,7	0,7	3,0	> 3,0
<b>Efectos misceláneos (7):</b>					
- Nitrógeno (N-NO <sub>3</sub> )	mg/l	5,0	5,0	30,0	>30,0
- Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	meq/l	1,5	1,5	8,5	> 8,5
pH	Rango normal	6,5 –8,4			

Figura 5. Parámetros de calidad admisibles para aguas de uso agrícola (AMBIENTAL, 2002)

## 2.5 ELECTROCOAGULACIÓN

Este proceso innovador emplea los fundamentos de la coagulación-floculación, pero lo hace dentro de un reactor electrolítico, un tipo de contenedor equipado con una fuente de

corriente y múltiples electrodos. El objetivo es generar iones capaces de desestabilizar las partículas coloidales. A diferencia de los tratamientos tradicionales, que dependen de compuestos químicos, aquí los iones se producen mediante la inducción de una corriente eléctrica en el agua. Todo esto ocurre a través de placas metálicas, normalmente de hierro o aluminio, colocadas en paralelo. Así, lo que antes requería productos químicos, ahora lo hace la propia electricidad (Pabón et al., 2020).

### **2.5.1 PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN**

La electrocoagulación es un proceso sorprendentemente eficiente que utiliza la electricidad para separar metales pesados, compuestos orgánicos emulsionados, sólidos en suspensión y contaminantes presentes en aguas residuales que son de particular interés por su presencia en medios acuosos. A través de una corriente eléctrica que se aplica al agua residual mediante placas metálicas paralelas electrodos hechos comúnmente de hierro o aluminio. En su núcleo, el proceso cuenta con un reactor, donde una celda electrolítica, con electrodos sumergidos en el fluido a tratar, aprovecha el agua como medio electrolítico. La magia ocurre cuando una fuente externa de energía eléctrica pone en marcha las reacciones electroquímicas, generadas por el flujo de electrones entre los electrodos y los compuestos presentes en el efluente. El resultado: reducción en el cátodo, y oxidación en el ánodo, produciendo tanto iones metálicos como oxígeno, este último gracias a la hidrólisis del agua. Un sistema donde la química y la física se entrelazan para devolver pureza al agua (Ortiz, 2015).

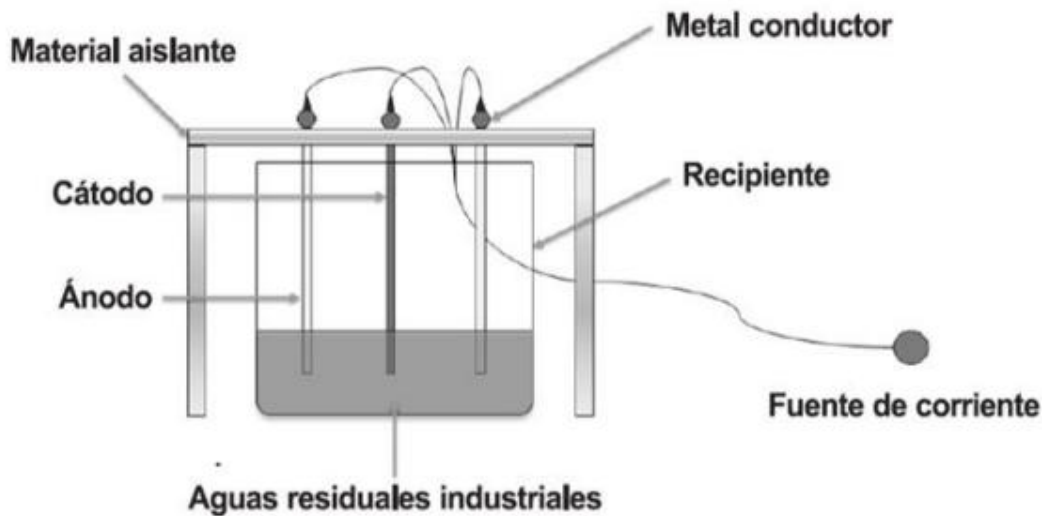


Figura 6. Sistema de electrocoagulación. Fuente: (Posada & Acosta, 2010)

Siguiendo el enfoque previamente descrito, la electrocoagulación es un proceso fascinante que desestabiliza las partículas presentes en los contaminantes, ya sea en estado suspendido, emulsionado o disuelto, mediante la introducción de corriente eléctrica en el medio acuoso a través de placas metálicas de diversos materiales. Este flujo de electricidad desata una cascada de reacciones químicas que culminan en la formación de compuestos hidrófobos. Estos compuestos, incapaces de mantenerse en suspensión, se precipitan, permitiendo su fácil eliminación a través de tratamientos secundarios. Dentro de las reacciones clave que ocurren durante la electrocoagulación, destaca la electrólisis. Este proceso ioniza, genera radicales libres, y modifica de manera significativa las propiedades tanto del agua como de los contaminantes, alterando el sistema de manera que facilita su purificación. (Ortiz, 2015)

Entre las múltiples reacciones que tienen lugar en el proceso de electrocoagulación, la electrólisis es, sin duda, una de las más notables. Este fenómeno ioniza el medio y genera radicales libres, alterando por completo las propiedades del sistema compuesto por el agua y los contaminantes presentes.

Al aplicar electricidad a los electrodos, se desencadenan dos procesos simultáneos. En

primer lugar, el ánodo, también conocido como electrodo de sacrificio, se disuelve, liberando iones metálicos en el agua contaminada. Mientras tanto, en el cátodo, produce una efervescencia de burbujas de hidrógeno gaseoso, que, además de crear un espectáculo visual, ayudan a flotar las partículas hacia la superficie, donde luego pueden ser retiradas fácilmente. Pero aquí no termina todo; un segundo proceso, la coagulación, sigue a la electrólisis. Los contaminantes suspendidos, gracias a la desestabilización de sus cargas, provocada por los iones generados en los electrodos, ven neutralizadas esas cargas que los mantenían dispersos. Como resultado, las partículas antes suspendidas comienzan a agregarse, permitiendo su eventual remoción del medio acuoso (Ortiz, 2015).

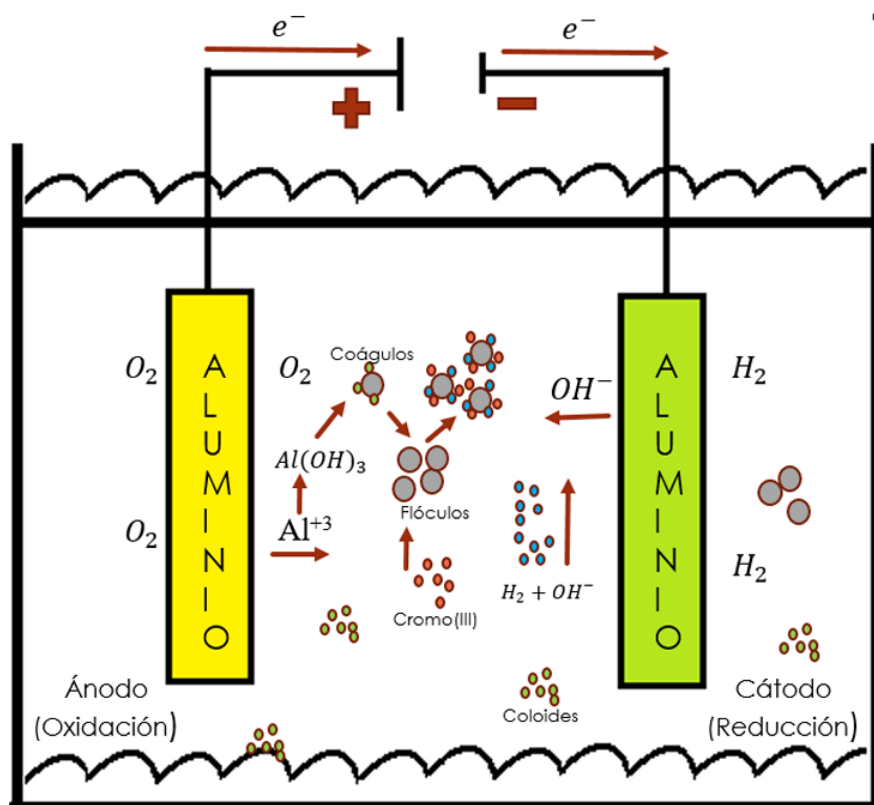


Figura 7. Sistema de electrocoagulación con ánodo y cátodo de aluminio. Fuente: (Tomás, 2016)

## **2.6 FACTORES QUE AFECTAN A LA ELECTROCOAGULACIÓN**

### **2.6.1 pH**

El pH juega un papel fundamental en la determinación de la eficiencia de la corriente durante la solubilización de metales, que culmina en la formación de hidróxidos. Diversos estudios han revelado que el pH fluctúa a lo largo del proceso de electrocoagulación, fluctuaciones que están estrechamente relacionadas tanto con el material del electrodo como con el pH inicial del agua que se está tratando. La efectividad del tratamiento depende en gran medida de la naturaleza del contaminante; se ha observado que los mejores resultados suelen ocurrir cuando el pH se aproxima a 7. Sin embargo, en este rango neutral, el consumo energético tiende a dispararse, ya que la conductividad del agua fluctúa. Es decir, si la conductividad es elevada, el pH no influye tanto. Después de la electrocoagulación, el pH puede cambiar. En aguas residuales ácidas, este valor podría subir, mientras que, en aguas alcalinas, tiende a bajar. Este fenómeno de incremento en ambientes ácidos está relacionado con la reacción que ocurre en el cátodo: el hidrógeno se combina en un proceso que transforma  $H_2O + 2e$  en  $H_2$  y  $2OH^-$ . Así, pequeñas variaciones en el pH pueden alterar significativamente el resultado del tratamiento (Ortiz, 2015).

Durante este proceso, el pH puede aumentar en aguas residuales ácidas, fenómeno atribuido a la generación de hidrógeno molecular en el cátodo. Por el contrario, en aguas residuales alcalinas, el pH puede disminuir y esta alteración, que depende de la naturaleza del contaminante, afecta profundamente la eficiencia general del proceso de tratamiento (Restrepo Mejia et al., 2006).

### **2.6.2 DENSIDAD DE CORRIENTE**

Aunque pueda parecer ventajoso, en realidad, a mayor densidad, más energía eléctrica

se transforma en calor, calentando el agua de manera indeseada y reduciendo drásticamente la eficiencia del sistema. La clave está en seleccionar la densidad de corriente con precaución, teniendo en cuenta otros parámetros operativos igualmente críticos, como el pH y la temperatura del sistema. Un pequeño ajuste puede marcar la diferencia entre un proceso eficiente y uno plagado de complicaciones. (Ortiz, 2015)

La eficiencia de eliminación y el consumo de energía aumentan con el aumento de la densidad de corriente. En ciertos escenarios de conductividad del medio acuoso, el consumo de energía aumenta proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que genera un mayor gasto de energía. A niveles elevados de consumo de energía, se producen pérdidas debido a la conversión de energía eléctrica en energía térmica, lo que resulta en un aumento de la temperatura del medio acuoso. La corriente suministrada al sistema de electrocoagulación es crucial, ya que dicta la liberación de iones de aluminio ( $Al^{3+}$ ) o iones de hierro ( $Fe^{2+}$ ) de sus respectivos electrodos, lo que influye profundamente en la eficacia del tratamiento. (Restrepo Mejia et al., 2006)

En general, un aumento de la densidad de corriente se correlaciona con una mayor eliminación de contaminantes. Sin embargo, una densidad de corriente excesivamente alta puede provocar una caída sustancial de la eficacia. La energía eléctrica suministrada a la celda electroquímica puede manifestarse como corriente alterna (CA) o corriente continua (CC). Las características intrínsecas de cada tipo de corriente que atraviesa el medio acuoso provocan respuestas electroquímicas distintas entre los electrodos y las aguas residuales tratadas. En particular, cuando se emplea corriente continua, se produce un fenómeno en el cátodo que da lugar a la impermeabilización, lo que posteriormente disminuye la eficacia de la eliminación de contaminantes. (Restrepo Mejia et al., 2006)

### 2.6.3 CONDUCTIVIDAD

Un aumento de la conductividad eléctrica conduce a un aumento de la densidad de corriente. Cuando el voltaje suministrado a la celda de electrocoagulación se mantiene constante, junto con un aumento de la conductividad mientras se mantiene una densidad de corriente constante, se produce una reducción en el voltaje aplicado. La introducción de ciertos electrolitos, como NaCl o CaCl<sub>2</sub>, amplifica la conductividad de las aguas residuales. Además, los estudios han revelado que los iones de cloruro pueden mitigar los efectos adversos planteados por iones como HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-</sup>. La presencia de iones de carbonato o sulfato puede instigar la precipitación de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>, lo que resulta en la formación de una capa insoluble en los electrodos, lo que eleva el potencial entre ellos y, en última instancia, disminuye la eficiencia de la corriente. Sin embargo, es aconsejable mantener concentraciones de cloruro alrededor del 20% para procesos de electrocoagulación óptimos (Restrepo Mejia et al., 2006).

### 2.6.4 PRESENCIA DE NaCl

Los iones de cloruro (Cl<sup>-</sup>), juegan un papel interesante al contrarrestar los efectos negativos de ciertos iones como HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-</sup>. La presencia de carbonatos o sulfatos en el agua puede provocar la precipitación de iones como Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>, formando una capa insoluble en los electrodos, un problema que parece pequeño pero que tiene grandes consecuencias: dicha capa aumenta el potencial entre los electrodos, reduciendo drásticamente la eficiencia de la corriente. Es como poner un obstáculo en el flujo de energía. Por eso, aunque suene contradictorio, se recomienda que en un proceso de electrocoagulación normal se mantenga una concentración de cloruro alrededor del 20%, un balance necesario para evitar esos indeseados depósitos y mantener el sistema funcionando de manera óptima. (Ortiz, 2015)

### **2.6.5 TEMPERATURA**

El impacto de la temperatura en la electrocoagulación sigue siendo relativamente poco explorado, pero se ha observado que la eficiencia de la corriente aumenta inicialmente, alcanzando un máximo alrededor de los 60 °C, después de lo cual comienza a disminuir. Este aumento en la eficiencia se atribuye a la mayor actividad en la alteración de la película de óxido de aluminio que recubre la superficie del electrodo. Sin embargo, más allá de este umbral térmico, el proceso se invierte, lo que sugiere una delicada interacción entre el calor y la dinámica electroquímica que justifica una investigación más profunda (Restrepo Mejia et al., 2006).

Influye en múltiples aspectos del proceso de deposición, desde la velocidad a la que ocurre el depósito hasta la activación o descomposición de compuestos químicos delicados. Incluso afecta la resistencia a la corrosión de los equipos utilizados y la capacidad del depósito para adherirse con firmeza a las superficies. Por lo tanto, un ligero cambio en la temperatura puede desencadenar toda una serie de efectos inesperados y complejos en la electrocoagulación. (Ortiz, 2015)

### **2.6.6 TIEMPO**

El factor crítico que debe ser evaluado es el tiempo, ya que el proceso de disolución del metal en el ánodo, impulsado por el paso de la corriente eléctrica, depende en gran medida de una cuidadosa y acertada selección del material anódico. Este aspecto es fundamental para maximizar la eficiencia del tratamiento de las aguas producidas. Un metal incorrecto podría ralentizar el proceso o incluso comprometer la integridad del sistema, mientras que uno adecuado permite optimizar tanto la velocidad de la reacción como la eficiencia de remoción de contaminantes. Según investigaciones previas en el campo de la electrocoagulación, la

eficiencia del proceso puede incrementarse hasta en un 30% si se ajustan adecuadamente parámetros como la densidad de corriente y el tipo de material utilizado (Mihir et al., 2024).

Por lo tanto, la sincronización precisa entre el tiempo de reacción y la selección del material es crucial para obtener los resultados deseados.

### **2.6.7 VARIABLE ELÉCTRICA**

Al abordar el diseño de un prototipo de tratador de agua mediante electrocoagulación, es esencial considerar múltiples variables eléctricas. En primer lugar, la aplicación del voltaje y la corriente eléctrica (el flujo de carga eléctrica a través de un conductor y se mide en amperios (A)) son determinantes cruciales; estos parámetros no solo definen el tipo de alimentación del sistema, sino que también influyen directamente en la eficacia del proceso de electrocoagulación. A medida que se incrementa la corriente eléctrica, la eficiencia en la remoción de contaminantes y el consumo energético tienden a elevarse, aunque este aumento conlleva una notable transformación de energía eléctrica a energía térmica. Esta conversión eleva la temperatura del sistema, lo que podría alterar la dinámica del proceso. La comprensión profunda de estas interacciones es fundamental para optimizar el tratamiento de aguas y maximizar su efectividad. (Patrick et al., 2022)

### **2.6.8 ESPACIAMIENTO ENTRE ELECTRODOS EN LA ELECTROCOAGULACIÓN**

La resistencia eléctrica en un sistema de electrocoagulación se manifiesta como una función directa de la distancia entre los electrodos: cuanto mayor sea esta distancia, mayor será la resistencia que se opone al flujo de corriente. Investigaciones previas han establecido que esta distancia puede variar entre 5 mm y 3 cm, logrando en este rango una notable eficacia en la remoción de contaminantes. Sin embargo, determinar la distancia óptima para un efluente

específico es crucial (Phalakornkule et al., 2009).

Cuando la separación entre electrodos excede este umbral óptimo, se observa una caída en la eficiencia de eliminación de contaminantes. Este fenómeno se debe a que, al aumentar la distancia, el tiempo que tardan los iones en recorrer este trayecto se prolonga, lo que resulta en una disminución de la atracción electrostática. Como consecuencia, se ve comprometida la formación de flóculos necesarios para la coagulación del contaminante. Es fundamental considerar que la dinámica del proceso no solo depende de la distancia, sino también de la naturaleza del contaminante y de las características específicas del agua tratada (Cabralles et al., 2014)

### **2.6.9 ARREGLO DE ELECTRODOS**

La conexión entre los electrodos y el material seleccionado para llevar a cabo el tratamiento electroquímico desempeña un papel fundamental, un elemento crucial que influye significativamente en el análisis de costos de este proceso. Cada parámetro se entrelaza con los demás, creando un panorama dinámico de posibilidades que impacta tanto en la efectividad como en la viabilidad económica (Vinita y Kajal, 2013), (Piña Soberanis et al., 2011).

El arreglo de los electrodos puede adoptar diferentes configuraciones: en forma mono-polar o bi-polar, cada opción encierra un potencial único. Las conexiones, ya sean en serie o en paralelo, también juegan un papel decisivo en la dinámica del proceso, afectando no solo la eficiencia, sino también la viabilidad operativa (Vinita y Kajal, 2013), (Piña Soberanis et al., 2011).

En la figura 8, podemos observar los tipos de arreglos:

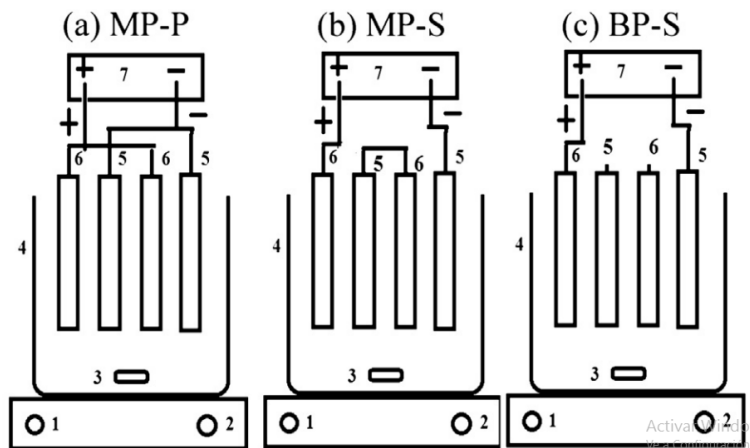


Figura 8. Tipo de conexión de electrodos (Vinita y Kajal, 2013)

### 2.6.9.1 CONEXIÓN EN PARALELO EN ELECTRODOS MONOPOLARES (MP-P)

Los ánodos y cátodos están interconectados en paralelo, una configuración que divide la corriente entre todos los electrodos según la resistencia de cada celda individual. Este arreglo requiere una diferencia de potencial menor en comparación con las conexiones en serie. En esencia, mientras que las configuraciones en serie requieren un voltaje más sustancial para impulsar la corriente, los arreglos en paralelo permiten una distribución más eficiente, optimizando el rendimiento general del sistema. Las complejidades de este diseño influyen significativamente en la dinámica operativa (Vinita y Kajal, 2013).

### 2.6.9.2 CONEXIÓN EN SERIE DE ELECTRODOS MONOPOLARES (MP-S)

En los electrodos monopolares dispuestos en una conexión en serie, cada par de electrodos sacrificables está intrincadamente vinculado entre sí de manera interna. Esta configuración permite que las tensiones de las celdas se acumulen, resultando en una mayor diferencia de potencial para una corriente dada. Esencialmente, a medida que el voltaje de cada celda se suma al de las demás, se amplifica el potencial eléctrico total, creando una fuerza motriz más potente para la corriente. La interacción entre estos elementos muestra un fascinante equilibrio entre conexión y voltaje, destacando la naturaleza sofisticada de los sistemas

electroquímicos (Vinita y Kajal, 2013).

### **9.6.9.2 CONEXIÓN EN SERIE DE ELECTRODOS BIPOLARES (BP-S)**

En este modo de conexión particular, los electrodos exteriores se conectan directamente a la fuente de alimentación, mientras que existe una notable ausencia de conexión eléctrica entre los electrodos internos (Vinita y Kajal, 2013).

## **2.7 VENTAJAS**

### **2.7.1 ALTA EFICIENCIA EN LA ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS**

Combinada con la posibilidad de automatizar el proceso por completo. Porque, al ser un sistema relativamente sencillo, la automatización es no solo viable, sino extremadamente eficiente. (Ortiz, 2015)

### **2.7.2 REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AMPLIO ESPECTRO**

La efectividad en la eliminación de contaminantes se sitúa entre un impresionante 90% y 99%, abarcando un rango de impurezas que otros métodos apenas logran tocar (Ortiz, 2015).

### **2.7.3 ADIÓS A LOS PRODUCTOS QUÍMICOS ALMACENADOS**

Aquí no hace falta preocuparse por el almacenamiento o la manipulación de coagulantes químicos, ya que el coagulante se genera in situ, justo cuando se necesita (Ortiz, 2015).

## **2.7.4 COSTOS DE OPERACIÓN MÁS BAJOS**

En comparación con los procesos tradicionales que emplean polímeros. No se requieren insumos químicos, y el reactor es considerablemente más sencillo que los de métodos convencionales (Ortiz, 2015).

## **2.7.5 LODOS MÁS COMPACTOS Y EN MENOR CANTIDAD**

La electrocoagulación genera lodos que no solo son más compactos, sino que también requieren menos espacio para su disposición, reduciendo problemas logísticos de almacenamiento y eliminación. (Ortiz, 2015)

## **2.7.6 FLÓCULOS GRANDES Y ESTABLES**

Los flóculos generados son más voluminosos que los producidos químicamente, pero contienen menos agua ligada, son antiácidos y mucho más estables. Este mayor tamaño facilita su separación rápida mediante filtración, lo que simplifica enormemente los tratamientos secundarios. (Ortiz, 2015)

## **2.7.7 BURBUJAS DE GAS EFICIENTES**

Las burbujas de gas generadas durante el proceso elevan los contaminantes hacia la superficie, donde se pueden concentrar, recuperar y eliminar fácilmente. Cada fase del proceso es no solo eficaz, sino también sorprendentemente económico. (Ortiz, 2015)

## **2.8 DESVENTAJAS**

### **2.8.1 REPOSICIÓN DE LOS ELECTRODOS DE SACRIFICIO**

La implementación podría generar costos adicionales debido al intercambio de iones entre los electrodos y el agua contaminada, especialmente en el caso del ánodo. (Ortiz, 2015)

### **2.8.2 LA ENERGÍA ELÉCTRICA VARIA SU PRECIO**

Dado que este tratamiento opera específicamente mediante electricidad, en ciertos lugares puede implicar costos elevados asociados al consumo eléctrico. (Ortiz, 2015)

### **2.8.3 COSTOS ADICIONALES POR REPOSICIÓN DEL CÁTODO**

En el cátodo puede formarse una película de óxido impermeable, lo cual reduce la eficiencia del proceso. (Ortiz, 2015)

## **2.9 LEYES DE FARADAY**

En términos generales, los conductores se agrupan en tres categorías principales, cada una con características bastante distintas. La primera incluye los conductores metálicos o electrónicos: metales, aleaciones, e incluso materiales como el carbón. En estos, la corriente fluye libremente, sin arrastrar consigo una cantidad significativa de materia. Simplemente pasa, sin más. La segunda clase, sin embargo, está compuesta por los llamados conductores electrolíticos: soluciones de ácidos, bases, sales fundidas, algunas sustancias sólidas y gases calientes. Aquí, el panorama cambia radicalmente, pues cuando la corriente se desplaza, lo hace acompañada de materia, y al salir del electrolito, deja atrás esa materia, generando efectos químicos únicos. (Mantell, 2021)

Esta diferencia entre la conducción metálica, donde no hay tal movimiento de materia, y la electrolítica, es lo que marca el contraste esencial entre ambas. Finalmente, existe una

tercera clase de conductores, donde la corriente circula de forma híbrida: parte a través de conducción metálica y parte mediante conducción electrolítica. Un ejemplo interesante es el sulfuro de plata en su forma P, o las soluciones de metales alcalinos y alcalinotérreos en amoníaco líquido. En esta obra, enfocaremos nuestra atención especialmente en los efectos químicos que emergen de la conducción electrolítica, y también en los efectos eléctricos necesarios para provocarlos. (Mantell, 2021)

Si tomamos dos láminas o alambres de platino y los sumergimos en una solución diluida de ácido sulfúrico, algo interesante ocurre cuando los conectamos a los polos de una batería o una fuente de corriente continua: se desencadena un proceso de electrólisis. En ese instante, se notará que en la lámina conectada al polo negativo (el cátodo) se libera hidrógeno, mientras que en la lámina conectada al polo positivo (el ánodo) emerge oxígeno. Estos gases, curiosamente, sólo se generan en los electrodos, sin manifestarse a lo largo del recorrido de la corriente a través del electrolito. (Mantell, 2021)

Las láminas, que llamamos electrodos, son los protagonistas silenciosos de esta transformación. Si en vez de ácido sulfúrico, empleamos una solución de nitrato de plata, el escenario cambia nuevamente: la plata se deposita en el cátodo, mientras el oxígeno sigue su escape por el ánodo. Es un proceso fascinante donde la química y la electricidad se entrelazan en un delicado baile de partículas y energía. (Mantell, 2021)

Cualquiera que sea la solución, ocurre que la acción química se produce tan sólo en los electrodos, puntos de entrada y salida de la corriente en el electrolito.

Las investigaciones de Michael Faraday (1791-1867) llevaron al descubrimiento de las relaciones cuantitativas entre la cantidad de electricidad que pasa a través de una solución y relaciones la cantidad de materia separada o precipitada en los electrodos. Estas quedan concretadas en dos leyes que reciben el nombre de dicho físico. (Mantell, 2021)

La primera ley establece que los pesos de las sustancias desprendidas en los electrodos son directamente proporcionales a la cantidad de electricidad que atraviesa la solución. La segunda ley expresa la relación fundamental entre las cantidades de diferentes sustancias separadas en los electrodos por una misma cantidad de electricidad; a saber: una misma cantidad de electricidad separa, en los electrodos, el mismo número de equivalentes químicos de las diferentes sustancias. En otras palabras, la cantidad de plata separada en el cátodo por el paso de 20 coulomb de electricidad, a través de una solución salina de plata, es doble de la que se obtendría mediante el paso de una corriente de 10 coulomb. El paso de una misma cantidad de electricidad a través de soluciones salinas de plata, o de cobre, hierro, zinc, o de un ácido, separará cantidades de plata, cobre, hierro, zinc o hidrógeno que resultarán proporcionales a sus pesos equivalentes. (Mantell, 2021)

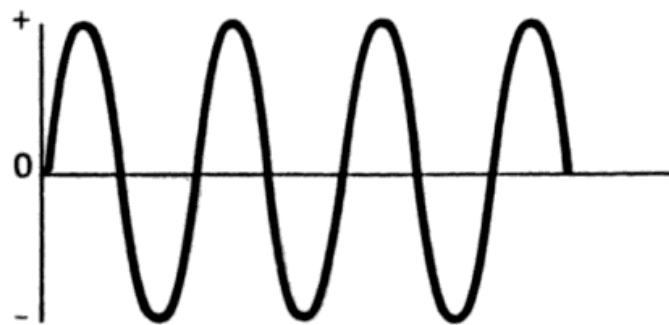
Para explicar estos fenómenos, supuso FARADAY que las moléculas neutras en disolución, de un electrolito, constaban de dos partes cargadas con signos contrarios, a las cuales denominó iones o «caminantes». Los que se desplazan hacia el cátodo fueron llamados cationes y los que se dirigen al ánodo aniones. Cuando circula la corriente, los iones positivos son atraídos hacia el cátodo cargado negativamente, en donde se neutraliza su carga y quedan en libertad. Del mismo modo, los aniones se desplazan hacia el ánodo, en donde son neutralizados. Esta hipótesis de Faraday, puesta de acuerdo con los descubrimientos posteriores y la teoría de la disociación electrolítica, es aceptada hoy universalmente. (Mantell, 2021, p. 21)

## **2.10 CORRIENTE ALTERNA**

Es electricidad en la que el flujo de electrones cambia de dirección a intervalos regulares o en ciclos. Este tipo de corriente es la que circula a través de las líneas eléctricas y la que

usualmente se distribuye en los hogares mediante los enchufes de pared. (Salazar Rodriguez y Dalton, 2023).

La forma de onda más comúnmente asociada con la corriente alterna es, sin duda, la onda senoidal, como se ilustra en la figura 9. Esta elegante y armoniosa curva, que fluye, da vida a lo que conocemos como corriente alterna senoidal. Es fascinante pensar que la corriente alterna que alimenta tanto nuestros hogares como las fábricas, se presenta predominantemente en esta forma (Fowler, 1994).



*Figura 9. Onda Senoidal (Fowler, 1994).*

## **2.11 CORRIENTE CONTINUA**

Es aquella en la que las cargas eléctricas o electrones fluyen constantemente en una sola dirección dentro de un circuito cerrado, desplazándose desde el polo negativo hacia el polo positivo de una fuente de fuerza electromotriz (FEM). Este tipo de corriente es generado por fuentes como baterías, dinamos o cualquier otro dispositivo que produzca corriente continua (Salazar Rodriguez y Dalton, 2023).

En la corriente continua (CC), los electrones siempre fluyen en la misma dirección, lo que facilita la disociación de las moléculas de agua (o de otros compuestos en la solución) en iones que participan en las reacciones electroquímicas (Cane y Sellwood, 1975).

En un proceso electroquímico como la electrólisis, las reacciones en los electrodos dependen de la dirección del flujo de corriente. Con corriente continua, puedes controlar mejor las reacciones de oxidación y reducción, ya que estas ocurren de manera predecible en los electrodos (Cane y Sellwood, 1975).

## **CAPITULO III: METODOLOGÍA**

### **3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Dado que es necesario evaluar el efecto del proceso de electrocoagulación en la calidad del agua generada por el sector petrolero, este estudio es un examen experimental. Este tipo de investigación es adecuado, porque permite medir los cambios en los parámetros contaminantes del agua y manipular factores importantes, como las condiciones del proceso (voltaje, tipo de electrodo y duración del tratamiento). Dado que se trata del diseño y desarrollo de un sistema de tratamiento, se requieren pruebas controladas para determinar la eficacia del proceso, lo que respalda el uso de este enfoque para recopilar datos puntuales y verificables (Rodríguez Moguel, 2005).

### **3.2 MATERIALES Y EQUIPOS**

#### **3.2.1 MUESTRA INICIAL DEL AGUA DE PRODUCCIÓN**

Pacipetrol S.A. proporcionó las muestras de agua de producción utilizadas en el estudio, las cuales fueron tomadas de pozos de la parroquia Santa Elena (Ancón). El volumen de agua generada requerido para los análisis y pruebas fue suministrado por la empresa (Alegria Soriano, 2024).

Antes de iniciar los experimentos de electrocoagulación en la primera parte del estudio, se realizó un minucioso examen de laboratorio para conocer la salinidad, sólidos disueltos, saturación de oxígeno, pH y contenido de cloruros del agua de producción, entre otras características fisicoquímicas importantes. Gracias a estos análisis preliminares se estableció una línea de base para evaluar cómo afectaba el tratamiento de electrocoagulación a las propiedades del agua.

Con la ayuda del biólogo William Santos, que proporcionó las herramientas y el equipo necesarios para la evaluación, el análisis se llevó a cabo en los laboratorios de la Facultad de Ciencias del Mar. Las muestras se caracterizaron utilizando las siguientes herramientas específicas. Espectrofotómetro: se utiliza para determinar la cantidad de cloruros y otras sustancias particulares presentes en el agua. Refractómetro: Permitió cuantificar con precisión la salinidad de las muestras. Multiparámetro: Aparato que evalúa varios parámetros, incluida la saturación de oxígeno. Peachímetro: Sirve para determinar con precisión el valor de pH de cada muestra de agua. Kits de ensayo: Utilizados para medir rápidamente una serie de factores adicionales (Alegría Soriano, 2024).

Los fines logrados en primera instancia (véase Tabla 1) son claves, por motivo de que con estos valores constatados se podrá cotejar el grado de limpieza, logrado con el proceso electrolítico realizado posteriormente.

*Tabla 1. Análisis de muestra de agua de producción*

*Fuente: Elaboración propia.*

pH	7.23
Salinidad	21 ppt
Solidos disueltos (D20/20)	1.016 g/L
Saturación de oxígeno	92.6%

### **3.2.2 CREACIÓN DE LA CELDA ELECTROLITICA**

Los electrodos son uno de los componentes utilizados en el desarrollo y la construcción de la célula electrolítica: Para garantizar una distribución uniforme del campo eléctrico, se dispusieron cuatro electrodos en placas -dos de aluminio y dos de hierro- alternativamente y en paralelo (MP-P), con una separación constante de 2 cm entre ellos. Estos electrodos estaban conectados a una fuente de tensión que controlaba la corriente entre 0 y 75 A. Material para los espaciadores: Se utilizaron doce tiras de goma de 2 cm de largo por 2 cm de ancho para

garantizar que los electrodos estuvieran separados y alineados con precisión, evitando el contacto directo entre las placas de distintos materiales. Recipiente: Recipiente de plástico de 6 litros destinado a contener el volumen de agua tratada, permitiendo la inmersión completa de los electrodos y una circulación suficiente del fluido. Sistema de conexión: Dos cables de cobre que se configuran como puntos de entrada y salida de corriente se fijan a pequeñas placas de cobre. Esta técnica facilitó la conexión de la fuente de alimentación a los electrodos de forma segura y fiable (Valcárcel Cases, 2021).

Los electrodos de aluminio se crearon con las siguientes dimensiones mostradas en la tabla 2.

*Tabla 2. Dimensiones del Electrodo de Aluminio.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Características	Dimensiones (cm)
Altura	19
Largo	9.5
Ancho	1



*Figura 10. Electrodo de Aluminio.*

*Fuente: (Alegria Soriano, 2024).*

De igual manera los electrodos de aluminio se crearon con las siguientes dimensiones mostradas en la tabla 3.

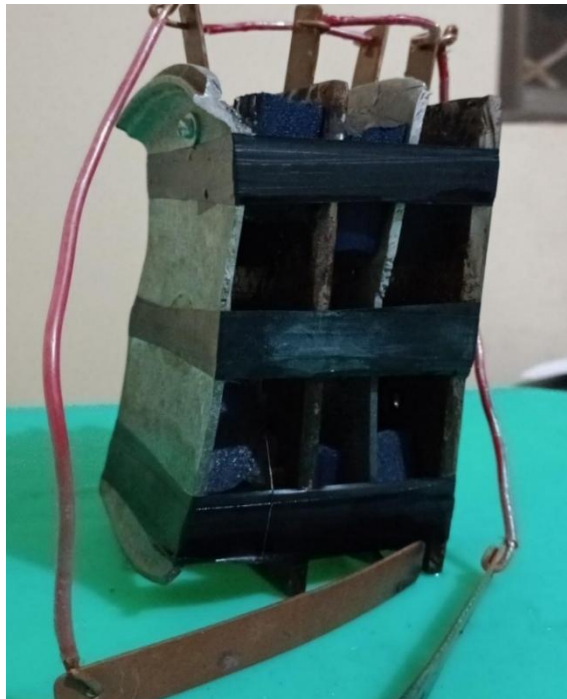
*Tabla 3. Dimensiones del Electrodo de Hierro.*

*Fuente: Elaboración Propia.*

Características	Dimensiones (cm)
Altura	19
Largo	9.5
Ancho	2



*Figura 11. Electrodo de Hierro.  
Fuente: (Alegria Soriano, 2024).*



*Figura 12. Celda Electrolítica.  
Fuente: (Alegria Soriano, 2024).*

En la figura 12 se observa el resultado de la creacion de la celda electrolitica finalizada.

### 3.2.3 EQUIPOS

El ingeniero Enrique Montenegro, que supervisa el taller de soldadura de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería del programa de Ingeniería Industrial, fue consultado para adquirir el equipo necesario para el proceso de electrocoagulación. Él supervisó la manipulación de las herramientas necesarias, que incluían equipos de protección individual (EPI), dos conectores tipo «lagarto» y una fuente de alimentación de corriente continua. Para que el equipo se instalara y configurara correctamente y funcionara bien durante los estudios, el apoyo técnico de Montenegro fue crucial (Cane y Sellwood, 1975).

Los elementos mencionados anteriormente nos ofrecen una imagen del sistema prototípico de electrolisis (véase la figura 13).



*Figura 13. Equipo usado para los ensayos.*

*Fuente: (Alegria Soriano, 2024).*

Al pasar la corriente por los lagartos de conexión, los electrodos de aluminio y hierro que están unidos a la fuente de energía empiezan a interactuar, creando un circuito que permite la coagulación en la región de tratamiento (véase la Figura 14).



*Figura 14. Proceso de Electrocoagulación.  
Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*

### **3.3 ENSAYOS DEL PROCESO ELECTROQUÍMICO**

El proceso de electrocoagulación, en el que la celda electrolítica funciona con dos ánodos (positivo) y dos cátodos (negativo), se utilizó en tres pruebas. El ánodo es el electrodo donde se oxida el metal, y el cátodo es el electrodo donde se produce la reducción, en este caso del agua (Fernández Romero et al., 2021).

Los electrodos de hierro liberan iones  $Fe^{2+}$  que crean coagulantes cuando se disuelven en agua en condiciones reguladas al acoplarse a una fuente de corriente continua (CC). Mediante la floculación -proceso por el que las partículas en suspensión atraen y encapsulan

las impurezas, eliminándolas del agua a medida que se asientan y flotan-, estos iones reaccionan con el agua para generar hidróxidos de hierro, útiles para atrapar contaminantes (Fernández Romero et al., 2021).

Los electrodos de aluminio son eficaces para el tratamiento porque crean estructuras ligeras y porosas que capturan compuestos orgánicos y sólidos en suspensión. Cuando se conectan a una fuente de corriente continua (CC), liberan iones  $Al^{3+}$  en el agua, que reaccionan para formar hidróxidos de aluminio, que también funcionan como agentes coagulantes (Fernández Romero et al., 2021).

Al aumentar el amperaje en la fuente de energía, el proceso se optimiza acelerando las reacciones en el proceso electrolítico (Paredes et al., 2020).

Se pueden producir más hidroxilos con tiempos de electrocoagulación más largos, pero demasiado tiempo puede hacer que el agua se sobrecargue de metales (Paredes et al., 2020).

La tabla 4 muestra los resultados de las pruebas realizadas.

*Tabla 4. Ensayos del proceso de electrocoagulación.  
Fuente: Elaboración Propia*

HIERRO	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Tiempo (min)	3-6-9	3-6-9	3,6-9
Intensidad (amperaje)	10	15	20
ALUMINIO	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Tiempo (min)	3-6-9	3-6-9	3,6-9
Intensidad (amperaje)	10	15	20

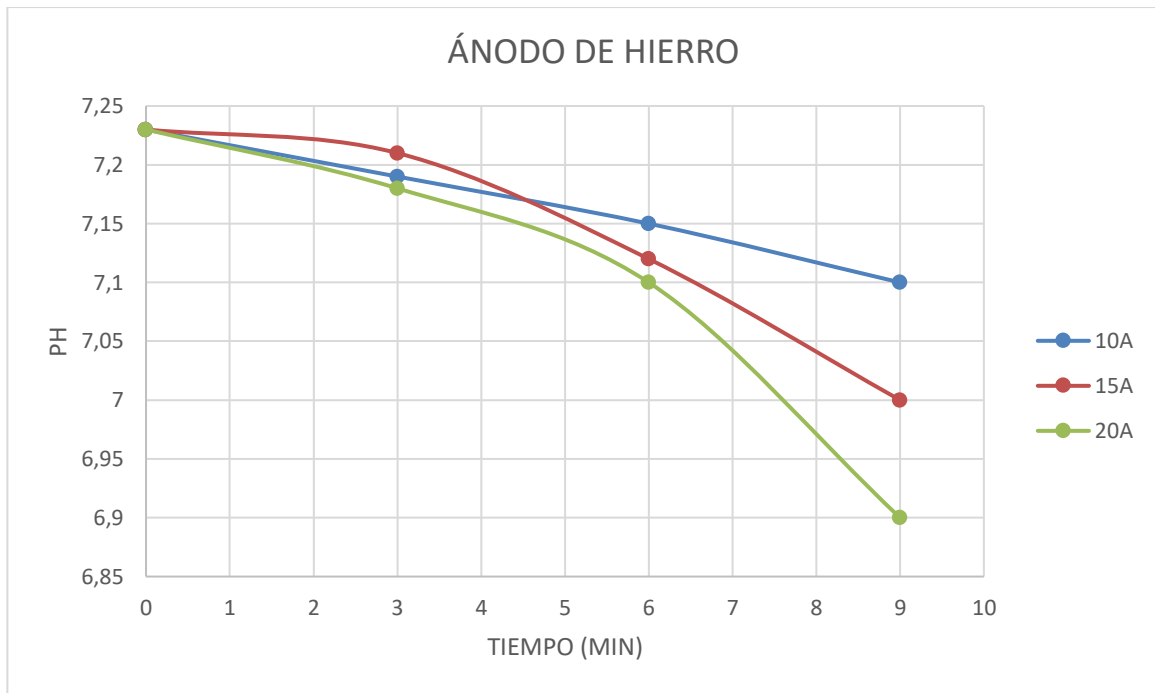
## CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

A lo largo de este estudio se realizaron una serie de constataciones que se muestran en los diversos gráficos que siguen. En el laboratorio especializado de la asignatura de Biología, ubicado en la Facultad de Ciencias del Mar de la UPSE que combina la precisión científica con la complejidad de los procedimientos experimentales empleados, se midieron meticulosamente los valores correspondientes a las variables y características.

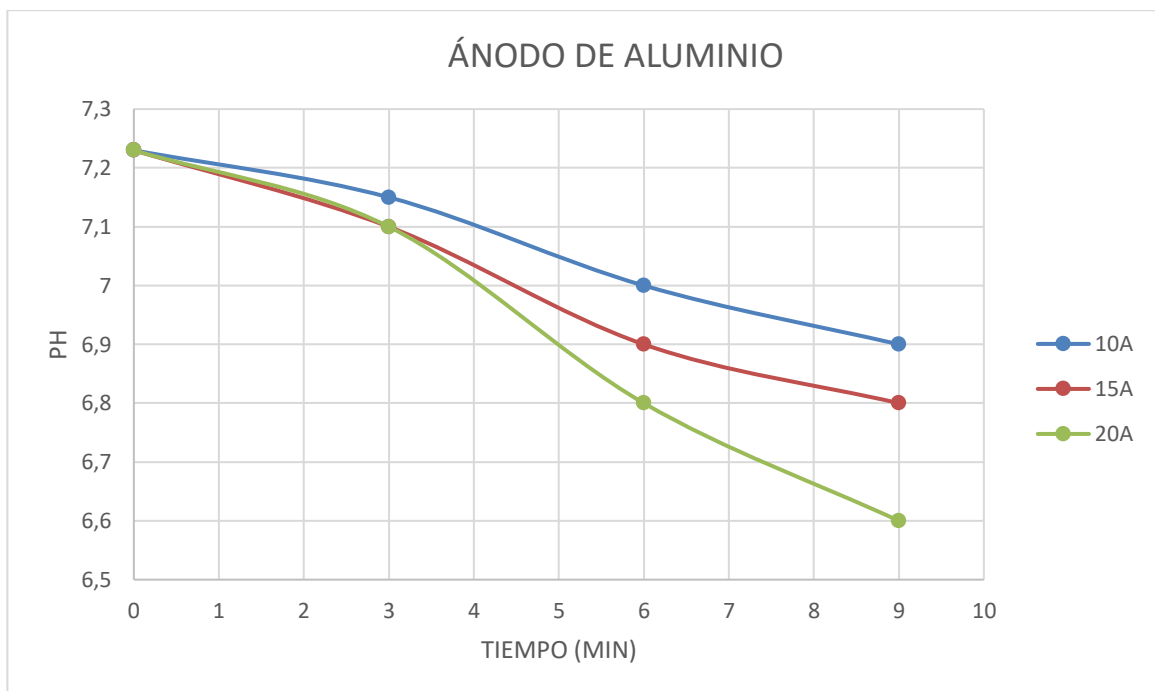
En la manipulación del prototipo se observa una disminución del pH, en los lapsos escogidos para los análisis propuestos, los tiempos en los que se realiza los ensayos son de 3 minutos, 6 minutos y 9 minutos (véase el grafico 1 - grafico 2). Antes de tratar el agua tenemos un pH de 7.23, al usar las placas de hierro como ánodo o las placas de aluminio como ánodo tenemos una diferencia en los resultados, producidos por la composición propia de cada electrodo los cuales actúan reaccionando a la estimulación eléctrica (Alegría Soriano y García García, 2024).

Cuando se disuelven, los electrodos de aluminio tienen tendencia a emitir iones  $Al^{3+}$ . Estos iones tienen la capacidad de reaccionar con el agua para formar hidróxido de aluminio ( $Al(OH)_3$ ), que libera iones  $H^+$  y produce un entorno ácido. Como el aluminio se disuelve más fácilmente y provoca una acidificación más notable, tiende a producir una mayor caída del pH en las proximidades del electrodo. (Prieto García F. et al., 2014).

En los resultados podemos observar una mayor disminución del pH con el aluminio que con el hierro, por lo que la valencia del hierro es menor que la del aluminio, el hierro tiende a formar menores enlaces y así la liberación de  $H^+$  de la solución acuosa es menor, siendo el pH una medida de concentración de hidrogeno su disminución dependerá de la mayor cantidad de  $H^+$  liberados en el agua a tratar (Alegría Soriano y García García, 2024).



Gráfica 1. Variación del pH con ánodo de hierro (Alegría Soriano, 2024).

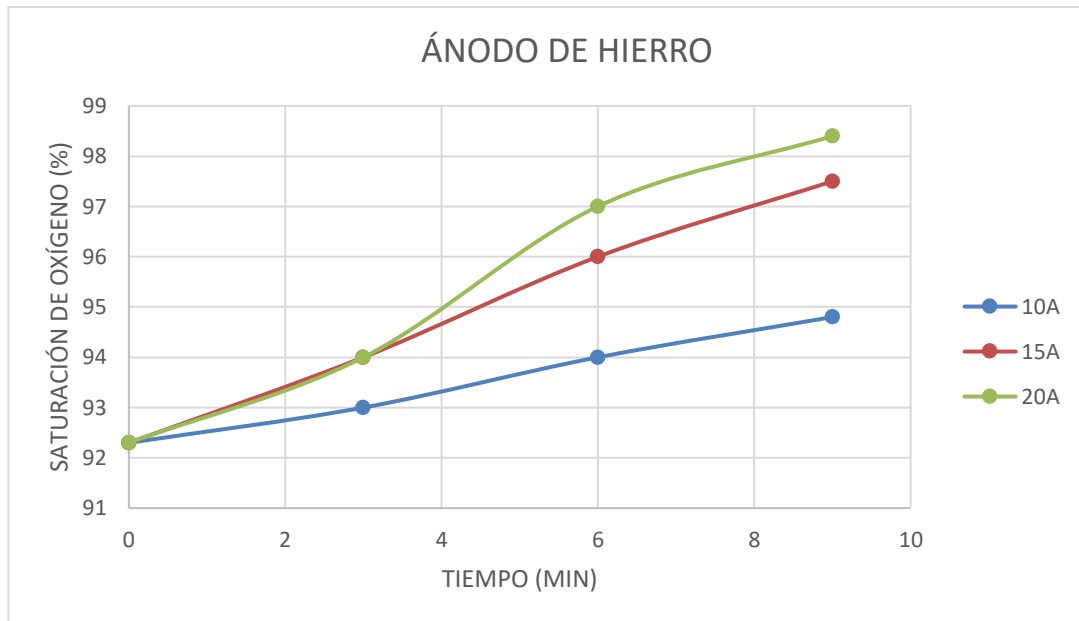


Gráfica 2. Variación del pH con ánodo de aluminio (Alegría Soriano, 2024).

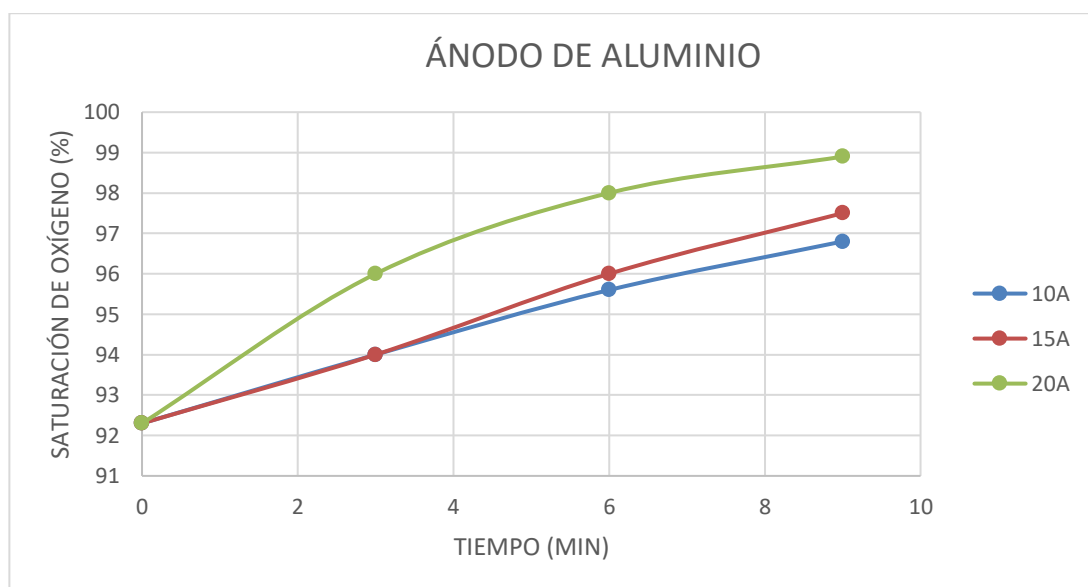
Al usar el electrodo de hierro como ánodo y el electrodo de aluminio como ánodo podemos observar un aumento de la saturación de oxígeno tabulados en la gráfica 3 y gráfica 4 (Alegría Soriano y García García, 2024).

La oxidación del agua en el ánodo durante el proceso de electrocoagulación libera oxígeno:  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ .

Este oxígeno tiene la capacidad de elevar el nivel de saturación de oxígeno del agua. (Prieto García F. et al., 2012).

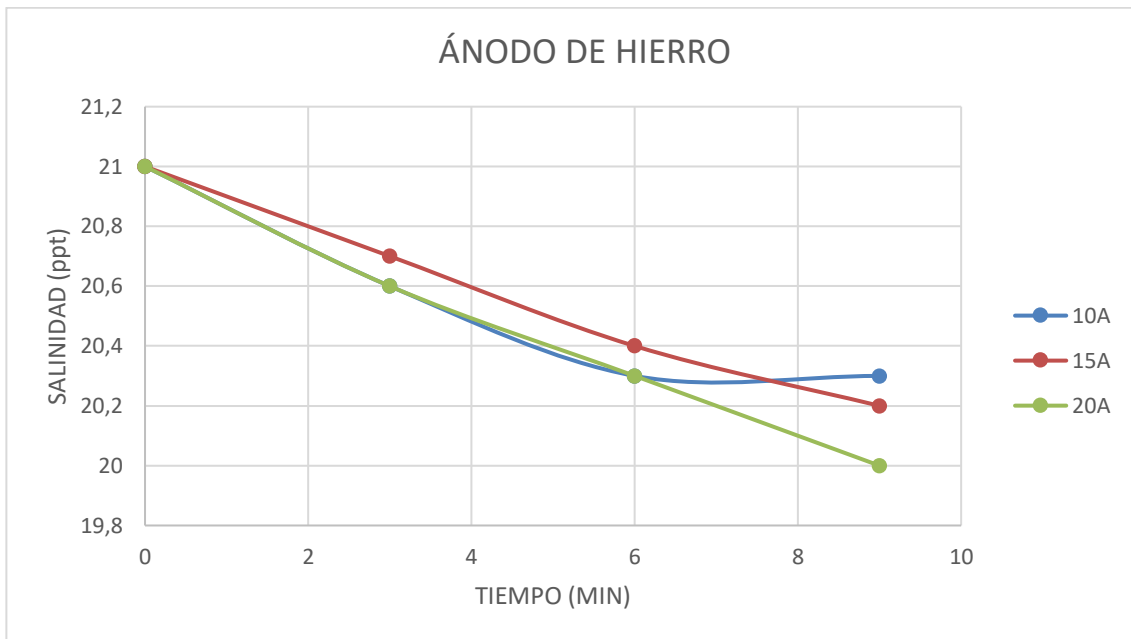


Gráfica 3. Variación de la saturación de oxígeno en el ánodo de hierro (Alegria Soriano, 2024).

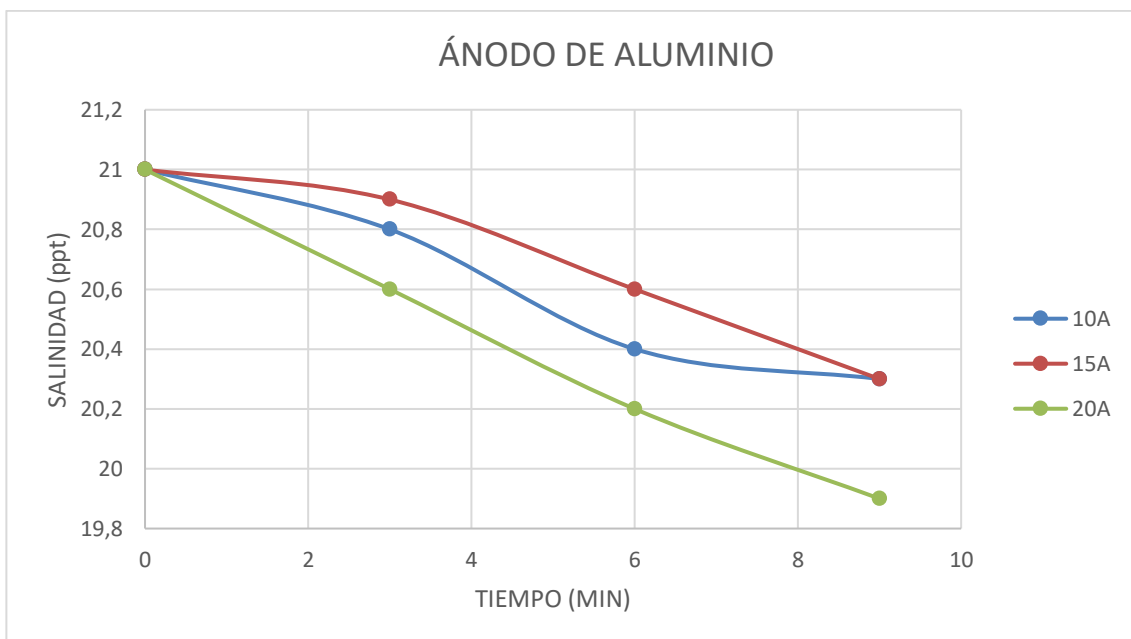


Gráfica 4. Variación de la saturación de oxígeno con el ánodo de aluminio (Alegria Soriano, 2024)

Las reacciones químicas del ánodo provocan pequeñas variaciones en la salinidad de la muestra de agua, dando lugar a flocúlos que pueden eliminarse posteriormente. En los gráficos 5 y 6 se muestra la fluctuación de la salinidad frente al tiempo con la intensidad de corriente correspondiente.



Gráfica 5. Variación de la salinidad con el ánodo de hierro (Alegria Soriano, 2024).



Gráfica 6. Variación de la salinidad con el ánodo de aluminio (Alegria Soriano, 2024).

Las reacciones creadas en el proceso como la del cloruro de aluminio o la del cloruro ferroso disminuyen la salinidad al poder ser extraídos como lodo durante el experimento.

Las diferencias entre la disminución de los sólidos disueltos usando aluminio como ánodo o hierro como ánodo son tabulados en las grafica 6 y la gráfica 7.

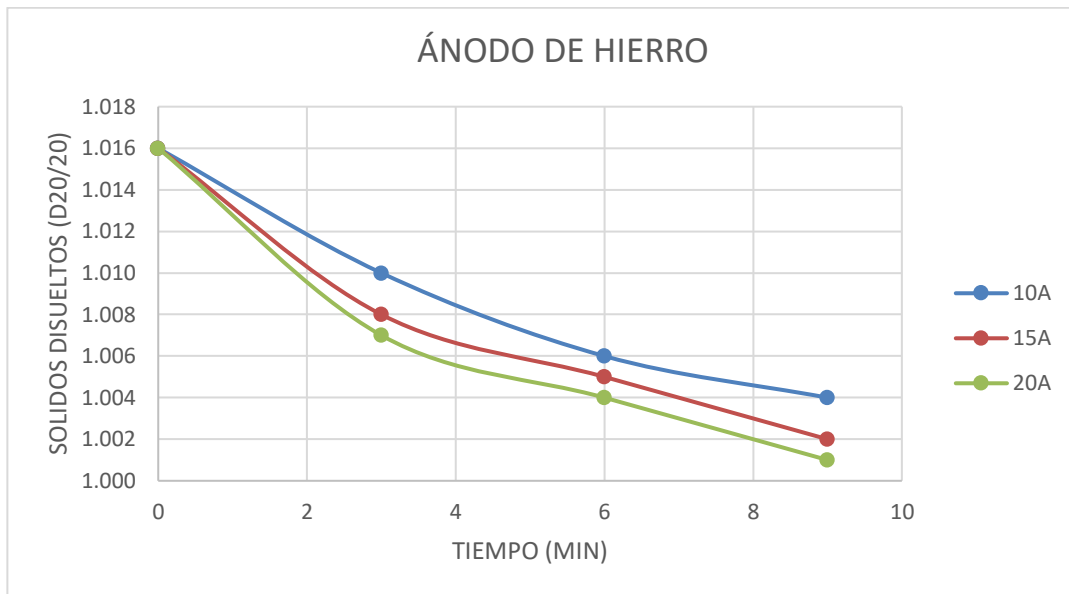


Gráfico 6. Variación de los sólidos disueltos, ánodo de hierro (Alegria Soriano, 2024).



Gráfica 7. Variación de los sólidos disueltos ánodo de aluminio (Alegria Soriano, 2024).

Al producir iones metálicos que reaccionan con sólidos disueltos como compuestos

orgánicos, sales minerales u óxidos metálicos, el proceso de electrocoagulación crea coágulos que atrapan los materiales disueltos y facilitan su eliminación.

## **4.1 IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL**

El tratamiento de aguas producidas mediante electrocoagulación representa una alternativa altamente sostenible y eficiente frente a métodos tradicionales, que suelen depender de productos químicos y generan una mayor cantidad de residuos. En el contexto de la industria petrolera ecuatoriana, donde las operaciones generan significativas cantidades de aguas residuales con altos niveles de contaminantes, la implementación de esta tecnología ofrece varias ventajas ambientales clave:

### **1. Reducción de Contaminantes**

El proceso de electrocoagulación demostró ser altamente eficiente en la eliminación de sólidos suspendidos, metales pesados y compuestos químicos presentes en las aguas producidas. Estos contaminantes, si no son tratados adecuadamente, pueden infiltrarse en los suelos o llegar a fuentes de agua dulce, causando graves daños a ecosistemas acuáticos y terrestres.

El tratamiento realizado durante este estudio logró disminuir los niveles de contaminantes a valores aceptables según las normativas ambientales ecuatorianas, como las establecidas en el TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente).

El TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente) establece límites para la calidad de aguas residuales en Ecuador según su uso o disposición. Estos valores varían dependiendo del destino final del agua tratada, como ríos, lagos, riego o

inyección en pozos. A continuación, algunos valores típicos para descargas en cuerpos de agua dulce (según el Anexo 1 del Libro VI del TULSMA, normativa vigente en Ecuador):

**Límites de calidad aceptables según el TULSMA:**

1. pH: Entre 6.0 y 9.0.
2. Oxígeno Disuelto (OD): Mayor al 80%.
3. Demanda Química de Oxígeno (DQO): Máximo 250 mg/L.
4. Sólidos suspendidos totales (SST): Máximo 100 mg/L.
5. Aceites y grasas: Máximo 30 mg/L.

**2. Minimización de Residuos**

A diferencia de los métodos convencionales, la electrocoagulación produce cantidades significativamente menores de lodos. Además, estos lodos son más compactos y contienen menos agua, lo que facilita su manejo, transporte y disposición final. Esta reducción en los residuos contribuye directamente a minimizar el impacto ambiental asociado a los procesos de disposición (Ortiz, 2015).

**3. Conservación de Recursos Hídricos**

El agua tratada mediante electrocoagulación puede ser reutilizada en aplicaciones industriales como reinyección en pozos, sistemas de enfriamiento o riego de áreas verdes. Esto reduce la extracción de agua dulce de fuentes naturales, promoviendo una gestión más sostenible del recurso hídrico en regiones con estrés hídrico, como ciertas áreas petroleras de Ecuador.

## **4. Disminución de la Huella Química**

La eliminación de la necesidad de coagulantes químicos disminuye el riesgo de contaminación química secundaria en el entorno. Esto es especialmente importante en zonas cercanas a comunidades vulnerables, donde la seguridad ambiental es prioritaria.

## **5. Contribución a Políticas de Sostenibilidad**

La adopción de tecnologías limpias como la electrocoagulación se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible promovidos por el gobierno ecuatoriano y las agencias internacionales (ONU), específicamente con los objetivos relacionados con la gestión sostenible del agua (ODS 6) y la acción por el clima (ODS 13).

### **ODS 6: Agua limpia y saneamiento**

#### **1. Calidad del agua:**

El tratador contribuye a reducir contaminantes como sólidos suspendidos, metales pesados y compuestos orgánicos, mejorando la calidad del agua residual generada en las operaciones petroleras. Esto está alineado con la meta 6.3 del ODS 6, que busca reducir la contaminación y mejorar la calidad del agua mediante la eliminación de desechos peligrosos.

#### **2. Reutilización del agua:**

Al tratar las aguas producidas para reutilización en procesos como la reinyección en pozos o riego, tu proyecto fomenta una gestión sostenible del recurso hídrico, que es otro aspecto clave del ODS 6.

### **3. Sostenibilidad en el manejo del agua:**

La implementación de un sistema basado en electrocoagulación, que evita el uso de productos químicos y produce menos residuos, promueve un tratamiento sostenible del agua, contribuyendo a la meta de gestionar los recursos hídricos de forma eficiente.

#### **Relación con el ODS 13: Acción por el clima**

##### **1. Mitigación de impactos ambientales:**

Al reducir la cantidad de contaminantes liberados en el ambiente, tu tratador disminuye los riesgos de emisiones de gases de efecto invernadero asociados con la degradación de residuos orgánicos o químicos en cuerpos de agua. Esto apoya las metas del ODS 13 enfocadas en reducir impactos ambientales adversos.

##### **2. Adaptación a condiciones climáticas:**

El uso eficiente del agua tratada ayuda a las industrias a adaptarse a la creciente escasez hídrica, que es una de las consecuencias del cambio climático. Por ejemplo, en áreas donde el agua es limitada, el reciclaje y la reutilización del agua producida son esenciales para mantener las operaciones sostenibles.

# CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 5.1 CONCLUSIONES

El método de electrocoagulación utilizado en el diseño y las pruebas del sistema de tratamiento del agua generada tuvo mucho éxito a la hora de modificar características importantes. Éstas comprendían la salinidad, los sólidos disueltos, el pH y la saturación de oxígeno, todos los cuales tenían efectos diferentes pero conectados. Los efectos del tipo de electrodo, la intensidad de la corriente y el tiempo de tratamiento fueron cruciales a lo largo de las pruebas experimentales, produciendo resultados que pusieron de relieve la resistencia y versatilidad del sistema.

Como conclusión de los experimentos realizados podemos observar que el aluminio usado como ánodo de sacrificio produjo una reducción mayor en el pH que el hierro como ánodo de sacrificio, por parte del aluminio se redujo el pH hasta un valor de 6.6 en su mayor tiempo de exposición y a la mayor intensidad eléctrica en cambio el hierro como ánodo, redujo en su mayor tiempo y al máximo amperaje expuesto a un valor de pH de 6.9, siendo ambos valores aceptables.

Por otra parte, los valores de la saturación de oxígeno aumentaron en un 98.9 por ciento con el aluminio usado como ánodo y en un 98.4 por ciento usando las placas de hierro como ánodo de sacrificio, la salinidad y los sólidos disueltos también disminuyeron, con mayor efectividad usando el aluminio como ánodo, como consecuencia la limpieza del agua fue significativa y con resultados contundentes para la prueba piloto.

Dado que en el proceso se usaron varios lapsos de tiempo e intensidades de corriente diferentes, se llegó a la conclusión que, a mayor tiempo de exposición, mayor será la limpieza

en el agua, así como a mayor sea la cantidad de amperios, el proceso de coagulación se acelerara, pero como consecuencia pueden quedar metales disueltos en el agua lo cual sería una desventaja en el empleo de este método de tratamiento.

Al final, este sistema de electrocoagulación va más allá del simple ajuste de parámetros. Proporciona una forma sistemática y ecológica de garantizar que el agua tratada cumpla con estándares ecológicos estrictos. Es adaptable, eficiente y sustentable, y está preparado para proteger los ecosistemas naturales al tiempo que satisface las necesidades cambiantes de la industria petrolera.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Antes de aplicar el tratamiento de electrocoagulación del agua generada, es necesario realizar investigaciones de laboratorio previas. Dado que las circunstancias y la composición del agua fluctúan significativamente entre los depósitos, esto permite evaluar el procedimiento y adaptarlo a las características únicas de cada muestra. Sería conveniente alternar distancias de las placas, diferentes intensidades, voltajes y tiempos de aplicación de estos mismos, para el desarrollo óptimo del tratamiento, con esto hacer un uso adecuado de la energía. Hay aspectos fundamentales como los valores de acides y alcalinidad en el agua a tratar, las distancias que hay entre las placas de aluminio y hierro, y teniendo en cuenta las conexiones (monopolar en paralelo, monopolar en serie y bipolar en serie), todo esto sirve para garantizar un adecuado trabajo. Los resultados obtenidos durante el experimento, usando el prototipo fueron favorables en el tratamiento del agua a pequeña escala sin embargo en procesos masivos sería conveniente adecuar proporcionalmente los elementos del sistema de tratamiento y así poder verificar la validez del experimento. Como último punto se recomienda usar un adecuado equipo de protección personal durante el uso de las herramientas y elementos en el proceso de electrocoagulación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (INEN), I. E. (2014). Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1108:2015: Calidad del agua – Límites permisibles de contaminantes. INEN.  
<https://www.insistec.ec/images/insistec/02-cliente/07-descargas/NTE%20INEN%201108%20-%20AGUA%20POTABLE.%20REQUISITOS.pdf>
- Alegría Soriano, C. (2024). Santa Elena, Ecuador.
- AMBIENTAL, L. D. (2002). NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA.  
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6078/36/LIBRO%20VI%20Anexo%201%20Normas%20Recurso%20Agua.pdf>
- Amórtegui, J. J. (2020). La electólisis del agua como propuesta de trabajo práctico para la promoción del uso de conceptos asociados a la conservación de la energía en estudiantes de ciclo v. *Pontificia Universidad Javeriana*, 58.
- Beltrán, K. (2015). Diseño y construcción de un electrocoagulador controlado por labview. *Universidad Santo Tomás*, 22.
- Cabrales, M., Nilson, y Martínez, M. (2014). *Evaluation of Electrochemical Reactors as a New Way to Environmental Protection*. Research Signpost.  
[https://doi.org/https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/52010689/Libro\\_Publicado\\_en\\_Mexico\\_ISBN978-81-308-0549-8-libre.pdf?1488551174=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLibro\\_Publicado\\_en\\_Mexico\\_ISBN.pdf&Expires=1728755502&Signature=Dy95denDEmwSIOfmB22yCK1c](https://doi.org/https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/52010689/Libro_Publicado_en_Mexico_ISBN978-81-308-0549-8-libre.pdf?1488551174=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLibro_Publicado_en_Mexico_ISBN.pdf&Expires=1728755502&Signature=Dy95denDEmwSIOfmB22yCK1c)
- Cane, B., y Sellwood, J. (1975). *Química básica I*. REVERTÉ.  
[https://www.google.com.ec/books/edition/Sustancia\\_y\\_sus\\_cambios/fnd\\_zsk9-](https://www.google.com.ec/books/edition/Sustancia_y_sus_cambios/fnd_zsk9-)

DsC?hl=es&gbpv=0

Chen, L. X. (2024). Au-TiO<sub>2</sub> nanoparticles enabled catalytic treatment of oil and gas produced water in slurry and vacuum membrane distillation systems. *Journal Of Water Process Engineering*.

Fahim, I. S., & Said, A. L. (2023). *Wastewater Treatment Recycling, Management, and Valorization of Industrial Solid Wastes*. CRC Press.  
[https://www.google.com.ec/books/edition/Wastewater\\_Treatment/qTW9EAAAQBAJ?hl=es&gbpv=0&kptab=overview](https://www.google.com.ec/books/edition/Wastewater_Treatment/qTW9EAAAQBAJ?hl=es&gbpv=0&kptab=overview)

Fernández Romero, A. J., García Antón, J., y Ignasi Sirés, M. R. (2021). *Aplicaciones medioambientales y energéticas de la tecnología electroquímica*. Reverte.  
[https://www.google.com.ec/books/edition/Aplicaciones\\_medioambientales\\_y\\_energ%C3%A9t/OCU6EAAAQBAJ?hl=es&gbpv=0](https://www.google.com.ec/books/edition/Aplicaciones_medioambientales_y_energ%C3%A9t/OCU6EAAAQBAJ?hl=es&gbpv=0)

Floristán, R. &. (2014). *Suministro, distribución y evacuación interior de agua sanitaria*. Marcombo.

Fowler, R. J. (1994). *Electricidad principios y aplicaciones*. Reverte.  
[https://www.google.com.ec/books/edition/Electricidad\\_principios\\_y\\_aplicaciones/LdzhG3XZd2IC?hl=es&gbpv=1&dq=CORRIENTE%20ALTERNA&pg=PA164&printsec=frontcover](https://www.google.com.ec/books/edition/Electricidad_principios_y_aplicaciones/LdzhG3XZd2IC?hl=es&gbpv=1&dq=CORRIENTE%20ALTERNA&pg=PA164&printsec=frontcover)

García Segura, S., Eiband, M. M., de Melo, J. V., y Martínez Huitle, C. A. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 267-299.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047>

Khandegar Vinita, S. K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - A review. *Journal of environmental management*, 128C, 949-963.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043>

Mantell, C. L. (2021). *Ingeniería electro-química*. Reverte.

Mihir, K. P., Pranjali, P. D., y Mukesh, S. (2024). *Electrocoagulation Based Treatment of Water and Wastewater: Overview and Applications*. Elsevier Science.

Mollah Y.A., M., Morkovsky, P. M., Gomes, J. A., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. L. (2004, Agosto 18). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 114, 199-210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>.

Mollah, M. Y., Schennach, R., Parga, J. R., y Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC) – Science and Applications. *Journal of Hazardous Materials*, 114(1-3), 29-41. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5)

Moradi, M., y Moussavi, G. (2018). Enhanced treatment of tannery wastewater using the electrocoagulation process combined with UVC/VUV. *Chemical Engineering Journal*, 358, 1038-1046. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.069>

Moussa, D. T., El-Naas, M. H., Nasser, M., y Al-Marri, M. J. (2017). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*, 186(2), 24-41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032>.

Murugananthan, M., Bhaskar Raju, G., y Prabhakar, S. (2004). Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 109(1-3), 37-44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2003.12.009>

NACIONAL, R. D. (2014). LEY ORGÁNICA DE RECURSOS HÍDRICOS, USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA. [https://www.etapa.net.ec/Portals/0/TRANSPARENCIA/Literal-a2/LEY-ORGANICA-DE-RECURSOS-HIDRICOS\\_-USOS-Y-APROVECHAMIENTO-](https://www.etapa.net.ec/Portals/0/TRANSPARENCIA/Literal-a2/LEY-ORGANICA-DE-RECURSOS-HIDRICOS_-USOS-Y-APROVECHAMIENTO-)

DEL-AGUA.pdf

- Ortiz, J. P. (2015). REMOCIÓN DE METALES PESADOS PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES A. *Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral*, 6.
- Pabón, S., Benítez, R., y Sarria, R. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. *Scielo*, 4(27).
- Paredes, E., Yopla, M., Chilicaus, G., y Licapa Redolfo, G. (2020). Influencia del amperaje y tiempo de residencia sobre la remoción de metales pesados en aguas ácidas por electrocoagulación. *Perspectiva*. <https://doi.org/10.33198/rp.v20i2.00056>
- Patrick, D., R., D. T., Rao, Y. S., Song, Y., Tian, C. Z., y Xiaolei, Z. (2022). *Electro-Coagulation and Electro-Oxidation in Water and Wastewater Treatment*. American Society of Civil Engineers.
- Phalakornkule, C., Polgumhang, S., y Tongdaung, W. (2009). Performance of an Electrocoagulation Process in Treating Direct Dye: Batch and Continuous Upflow Processes. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 57. <https://doi.org/doi.org/10.5281/zenodo.1080179>
- Piña Soberanis, M., Martín Domínguez, A., González Ramírez, C., Prieto García, F., Guevara Lara, A., y Espinoza, G. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(2), 257-271. [https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-27382011000200010&lng=es&tlng=es](https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000200010&lng=es&tlng=es).
- Prieto García, F., Callejas Hernández, J., Reyes Cruz, V. E., Marmolejo Santillán, Y., y Prieto Méndez, J. (2014). *Electrodissolution aluminum electrode during an electrocoagulation acid whey*. *Dyna*. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/dyna.v81n187.40757>

- Prieto García, F., Callejas Hernández, J., Reyes Cruz, V. E., y Marmolejo Santillán, Y. (2012). Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lactosuero residual. *REVISTA AIDIS*, 5(3), 51-77.  
<https://doi.org/https://biblat.unam.mx/hevila/RevistaAIDISdeingenieriaycienciasambientales/2012/vol5/no3/6.pdf>
- Rahman, N. A., Jol, C. J., Linus, A. A., Taib, S. L., Parabi, A., Borhan, W. S., . . . Dayang Faidatul , A. A. (2024). Application of batch electrocoagulation treatment system with aluminium electrodes for simultaneous removal of organic and heavy metal contaminants from Borneo urban rivers. *Desalination and Water Treatment*, 320.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100737>
- Ren, M., Song, Y., Xiao, S., Zeng, P., y Peng, J. (2011). Treatment of berberine hydrochloride wastewater by using pulse electro-coagulation process with Fe electrode. *Chemical Engineering Journal*, 169(1-3), 84-90.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.056>
- Restrepo Mejia, A. P., Arango Ruiz, Á., y Garcés Giraldo, L. F. (2006). Electrocoagulation: Challenges and opportunities in water treatment . *Producción + Limpia*, 1(2), 76.
- Rodríguez Moguel, E. A. (2005). *Metodología de la Investigación*. México : Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
[https://www.google.com.ec/books/edition/Metodolog%C3%ADa\\_de\\_la\\_Investigaci%C3%B3n/r4yrEW9Jhe0C?hl=es&gbpv=0](https://www.google.com.ec/books/edition/Metodolog%C3%ADa_de_la_Investigaci%C3%B3n/r4yrEW9Jhe0C?hl=es&gbpv=0)
- S. E. Pabón, R. B. (2020). Water contamination by heavy metals, analysis methods and removal technologies.
- Salazar Rodriguez, y Dalton, A. (2023). Diseño de una planta de tratamiento de aguas de formación por electrocoagulación. 17.
- Shamaei, L., Khorshidi, B., Perdicakis, B., & Sadrzadeh, M. (2018). Treatment of oil sands

produced water using combined electrocoagulation and chemical coagulation techniques. *Science of The Total Environment*, 645. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.387>.

Valcárcel Cases, M. (2021). *Técnicas analíticas de separación*. Reverte. [https://www.google.com.ec/books/edition/T%C3%A9cnicas\\_anal%C3%ADticas\\_de\\_separaci%C3%B3n/Q9MfEAAAQBAJ?hl=es&gbpv=0](https://www.google.com.ec/books/edition/T%C3%A9cnicas_anal%C3%ADticas_de_separaci%C3%B3n/Q9MfEAAAQBAJ?hl=es&gbpv=0)

Vinita, K., y Kajal, S. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - A review. *Journal of environmental management*, 128C, 949-963. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043>

## **ANEXOS**

Tabla 5. Variación del pH con ánodo de hierro (Alegria Soriano, 2024).

10A		15A		20A	
TIEMPO (min)	pH	TIEMPO (min)	pH	TIEMPO (min)	pH
0	7.23	0	7.23	0	7.23
3	7.19	3	7.21	3	7.18
6	7.15	6	7.12	6	7.1
9	7.1	9	7	9	6.9

Tabla 6. Variación del pH con ánodo de aluminio (Alegria Soriano, 2024).

10A		15A		20A	
TIEMPO (min)	pH	TIEMPO (min)	pH	TIEMPO (min)	pH
0	7.23	0	7.23	0	7.23
3	7.1	3	7.1	3	7.15
6	6.8	6	6.9	6	7
9	6.6	9	6.8	9	6.9

Tabla 7. Variación de saturación de oxígeno con ánodo de hierro (Alegria Soriano, 2024).

10A		15A		20A	
TIEMPO (min)	%	TIEMPO (min)	%	TIEMPO (min)	%
0	92.3	0	92.3	0	92.3
3	93	3	94	3	94
6	94	6	96	6	97
9	94.8	9	97.5	9	98.4

Tabla 8. Variación de saturación de oxígeno con ánodo de aluminio (Alegria Soriano, 2024).

10A		15A		20A	
TIEMPO (min)	%	TIEMPO (min)	%	TIEMPO (min)	%
0	92.3	0	92.3	0	92.3
3	94	3	94	3	96
6	95.6	6	96	6	98
9	96.8	9	97.5	9	98.9

Tabla 9. Variación de la Salinidad con ánodo de hierro (Alegría Soriano, 2024).

10A		15A		20A	
TIEMPO (min)	ppt	TIEMPO (min)	ppt	TIEMPO (min)	ppt
0	21	0	21	0	21
3	20.6	3	20.7	3	20.6
6	20.3	6	20.4	6	20.3
9	20.3	9	20.2	9	20

Tabla 10. Variación de la salinidad con ánodo de aluminio (Alegría Soriano, 2024).

10A		15A		20A	
TIEMPO (min)	ppt	TIEMPO (min)	ppt	TIEMPO (min)	ppt
0	21	0	21	0	21
3	20.8	3	20.9	3	20.6
6	20.4	6	20.6	6	20.2
9	20.3	9	20.3	9	19.9

Tabla 11. Variación de solidos disueltos con ánodo de hierro (Alegría Soriano, 2024).

10A		15A		20A	
TIEMPO (min)	D20/20	TIEMPO (min)	D20/20	TIEMPO (min)	D20/20
0	1.016	0	1.016	0	1.016
3	1.010	3	1.008	3	1.007
6	1.006	6	1.005	6	1.004
9	1.004	9	1.002	9	1.001

Tabla 12. Variación de solidos disueltos con ánodo de aluminio (Alegría Soriano, 2024).

10A		15A		20A	
TIEMPO (min)	D20/20	TIEMPO (min)	D20/20	TIEMPO (min)	D20/20
0	1.016	0	1.016	0	1.016
3	1.010	3	1.008	3	1.007
6	1.005	6	1.004	6	1.003
9	1.003	9	1.001	9	1.001



*Figura 15. Muestra de agua de producción.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



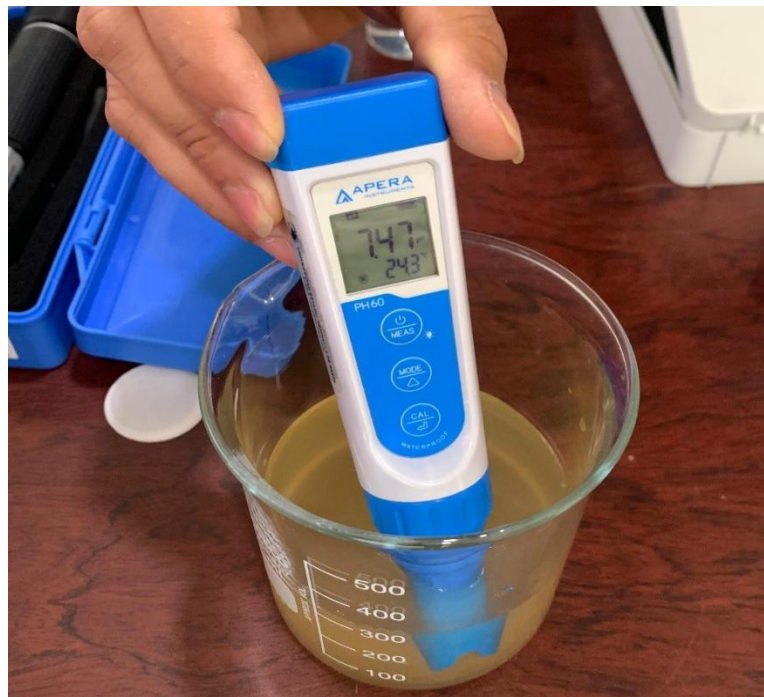
*Figura 16. Uso del Oximetrometro.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



*Figura 17. Recorte de Placas*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



*Figura 18. Uso del multiparámetro.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



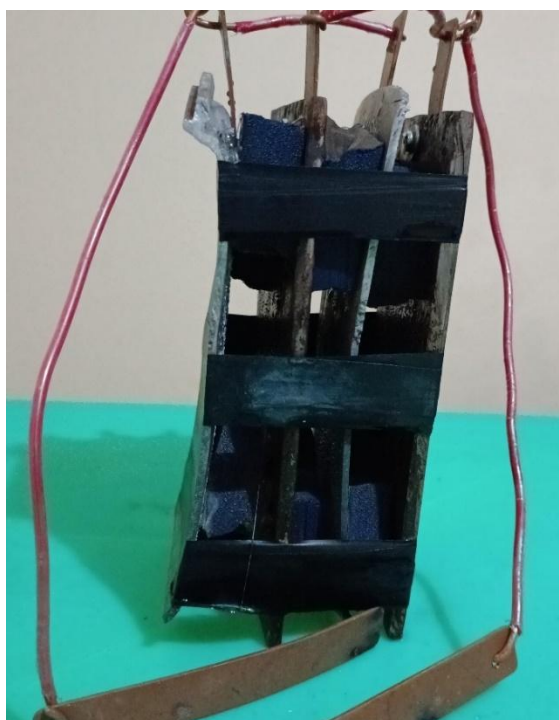
*Figura 19. Placas pequeñas de cobre.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



*Figura 20. pulido de placas.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



*Figura 21. Celda Electrolítica.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



*Figura 22. Celda Electrolítica. con muestra de agua.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



*Figura 23. Verificación de equipos.*

*Fuente: (Alegria Soriano, 2024).*



*Figura 24. Verificación de equipos.*

*Fuente: (Alegria Soriano, 2024).*



*Figura 25. Verificación de equipos.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



*Figura 26. Verificación de equipos.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



*Figura 27. Inicio de ensayos.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



*Figura 28. Proceso de electrocoagulación.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024)*



*Figura 29. Proceso de electrocoagulación exitoso.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



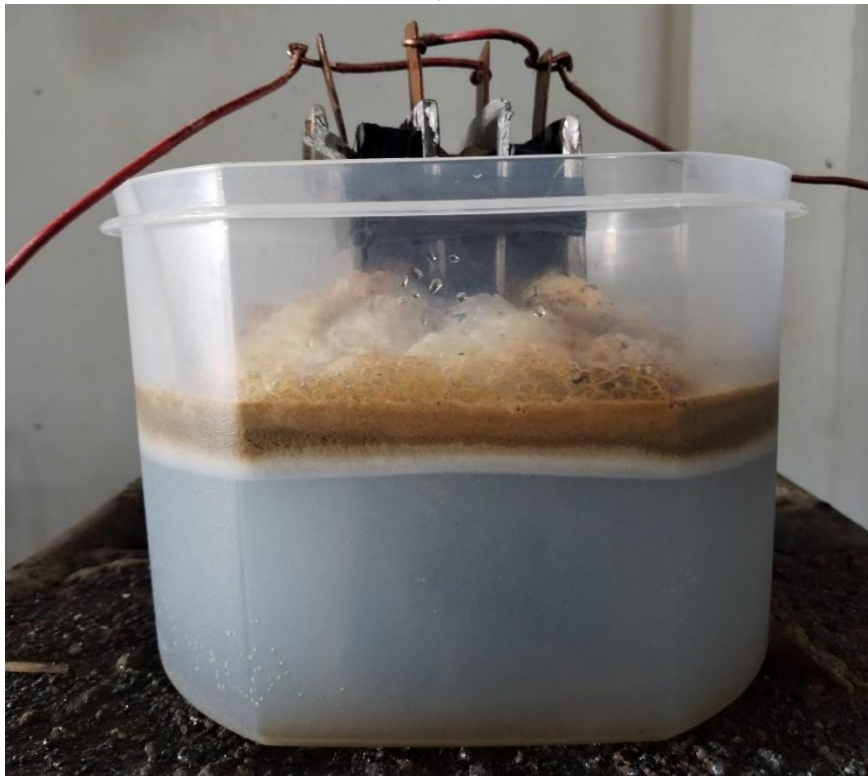
*Figura 30. Limpieza de agua.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024)*



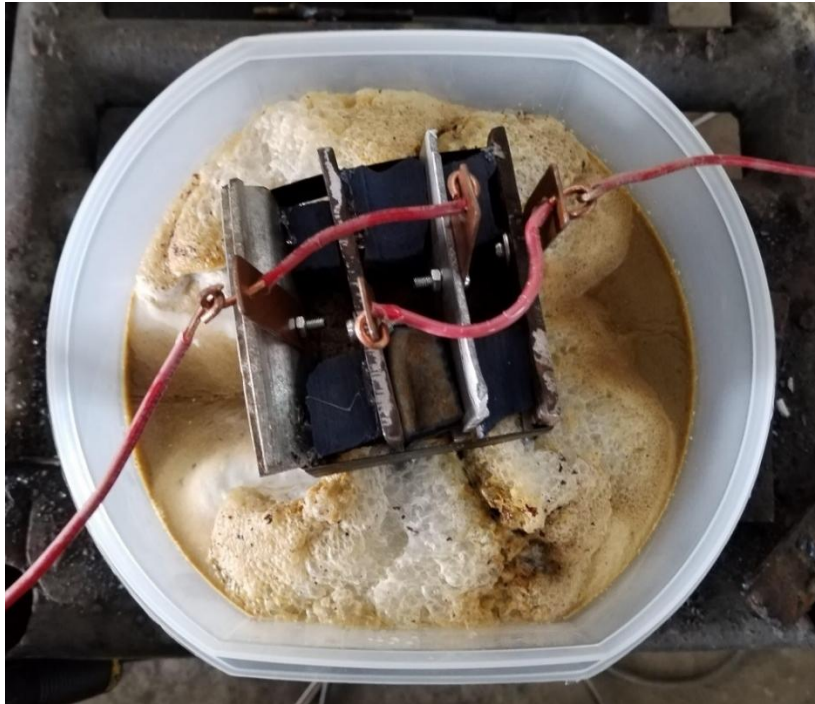
*Figura 31. Limpieza de agua.*

*Fuente: (Alegria Soriano, 2024)*



*Figura 32. Limpieza de agua.*

*Fuente: (Alegria Soriano, 2024)*



*Figura 33. Lodos residuales.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



*Figura 34. Análisis posteriores a la electrocoagulación.*

*Fuente: (Alegría Soriano, 2024).*



*Figura 35. Análisis posteriores a la electrocoagulación.*

*Fuente: (Alegria Soriano, 2024)*