

# **OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA:**

**Aplicada en la reducción de contaminantes  
refractarios y metales pesados**

Bermeo Garay Martha  
Alvarado Aguilar Marina  
Mendieta Bravo Jairo

# **OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA:**

**Aplicada en la reducción de contaminantes  
refractarios y metales pesados**

Bermeo Garay Martha  
Alvarado Aguilar Marina  
Mendieta Bravo Jairo

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica del mismo.

© Publicaciones Editorial Grupo Compás  
Guayaquil - Ecuador  
compasacademico@icloud.com  
<https://repositorio.grupocompas.com>



Bermeo, M., Alvarado, M., Mendieta, J. (2022) OXIDACIÓN  
ELECTROQUÍMICA: Aplicada en la reducción de contaminantes  
refractarios y metales pesados. Editorial Grupo Compás

© Bermeo Garay Martha  
Alvarado Aguilar Marina  
Mendieta Bravo Jairo  
Universidad de Guayaquil Facultad de Ingeniería Química

**Diagramación:** MSc. Arnaldo Rodriguez Mateo

**ISBN: 978-9942-33-642-2**

El copyright estimula la creatividad, defiende la diversidad en el ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y favorece una cultura viva. Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

# CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>VII</b>
<b>1. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES</b>	<b>11</b>
1.1. Antecedentes	11
1.2. Definiciones	12
1.3. Aguas residuales industriales de industria textil	15
1.3.1. Generalidades	16
1.3.2. Características	16
1.4. Colorantes empleados en la industria textil	18
1.4.1. Estructura química de un colorante	18
1.4.2. Colorantes reactivos	19
1.4.3. Colorantes ácidos	19
1.4.4. Colorantes directos	19
1.4.5. Colorantes Básicos	20
1.4.6. Colorantes dispersos	20
1.4.7. Colorantes sulfurosos	20
1.4.8. Colorantes azoicos	20
1.4.9. Colorantes mordantes	21
1.4.10. Colorantes de antroquinona	21
1.5. Normas Ambientales aplicables en el Ecuador	21
1.5.1. Objeto de la norma	21
1.5.2. Normas aplicables según el uso y descarga de agua.	22
<b>2. OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA</b>	<b>29</b>
2.1. Generalidades	29
2.2. Factores que afectan al método	30
2.2.1. Naturaleza de las placas	30
2.2.2. Condiciones de pH	32
2.2.3. Polarización	32
2.2.4. Tensión de trabajo	33
2.2.5. Contaminantes refractarios y metálicos.	33
2.3. Fundamentos de la Oxidación electroquímica	34
2.4. Objetivo del proceso	35

# CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>VII</b>
<b>1. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES</b>	<b>11</b>
1.1. Antecedentes	11
1.2. Definiciones	12
1.3. Aguas residuales industriales de industria textil	15
1.3.1. Generalidades	16
1.3.2. Características	16
1.4. Colorantes empleados en la industria textil	18
1.4.1. Estructura química de un colorante	18
1.4.2. Colorantes reactivos	19
1.4.3. Colorantes ácidos	19
1.4.4. Colorantes directos	19
1.4.5. Colorantes Básicos	20
1.4.6. Colorantes dispersos	20
1.4.7. Colorantes sulfurosos	20
1.4.8. Colorantes azoicos	20
1.4.9. Colorantes mordantes	21
1.4.10. Colorantes de antroquinona	21
1.5. Normas Ambientales aplicables en el Ecuador	21
1.5.1. Objeto de la norma	21
1.5.2. Normas aplicables según el uso y descarga de agua.	22
<b>2. OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA</b>	<b>29</b>
2.1. Generalidades	29
2.2. Factores que afectan al método	30
2.2.1. Naturaleza de las placas	30
2.2.2. Condiciones de pH	32
2.2.3. Polarización	32
2.2.4. Tensión de trabajo	33
2.2.5. Contaminantes refractarios y metálicos.	33
2.3. Fundamentos de la Oxidación electroquímica	34
2.4. Objetivo del proceso	35

2.5. Acción oxidativa y electroquímica	35
2.6. Proceso	36
2.6.1. Ventajas y desventajas	36
2.6.2. Problemas frecuentes	37
<b>3. MÉTODO Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES</b>	<b>41</b>
3.1. Volumen, recolección y preservación de la muestra	41
3.2. Caracterización del agua residual industrial	41
3.3. Unidades empleadas en el desarrollo de la investigación	42
3.4. Metodología	43
3.5. Pruebas de campo	44
3.6. Plan de ensayos de tratabilidad	46
3.7. Procedimientos de operación	47
3.7.1. Toma de la muestra (agua cruda)	47
3.7.2. Calibración de la fuente de energía	48
3.7.3. Procedimiento universal para el desarrollo de los ensayos en las diferentes etapas.	48
3.7.4. Procedimientos de análisis de parámetros.	48
3.8. Gestión de datos	49
<b>4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>53</b>
4.1. Criterios de la investigación	53
4.2. Levantamiento de información de campo. Fase preliminar.	53
4.2.1. Procedimiento operativo general de ensayos.	53
4.3. Resultados	54
4.3.1. Etapa experimental. Fase Preliminar.	54
4.3.2. Gráficos de ensayos primera etapa fase preliminares	56
4.3.3. Primera etapa fase preliminar – Comparativo por parámetro ensayo vs eficiencia de remoción	60
4.3.4. Levantamiento de información de campo. Fase Final	62
4.3.5. Procedimiento operativo general de ensayos	62
4.3.6. Etapa experimental. Fase Final	62
4.3.7. Primera etapa fase preliminar costos de operación	65
4.3.8. Segunda etapa / Fase final. Comparativo por parámetro. Ensayo vs. Eficiencia de remoción	66

4.3.9. Segunda etapa fase final costo de operación	68
4.4. Interpretación y análisis de los resultados por parámetros	69
<b>5. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>73</b>



# 1. INTRODUCCIÓN

Con la creación de la industria textil, comprendiendo la industria manufacturera, la cual se dedica a la producción de fibras naturales y sintéticas, como son telas, hilados, y productos relacionados con la ropa y vestimenta, en la fabricación de ropa, prendas de vestir, alineándose al desarrollo de la industria textil o maquila.

La industria textil se ha convertido en una de las actividades más importantes en la economía a nivel del mundo debido a la demanda y uso de ropa, vestimenta y prendas de vestir, para cubrir las necesidades de la población, pero a la vez una de las actividades más contaminantes por la generación de sus aguas residuales industriales que se derivan de su proceso productivo.

Para poder atenuar, minimizar, reducir, controlar, atenuar, etc., el impacto que ocasiona la generación del agua residual industrial de la industria textil, se han propuesto diferentes tratamientos a nivel mundial, primarios, secundarios biológicos, entre otros.

El presente texto presenta un tratamiento basado en resultados de los autores en una fase de experimentación, analizando a nivel de laboratorio una muestra de 40 litros de muestra sintética de efluente textil la misma que representa características propias y particulares, derivadas de las actividades de los procesos industriales en el tinturado de algodón.

Particularmente para conocimiento del lector la muestra sintética se caracteriza mediante parámetros físicos-químicos, como también la caracterización de metales pesados presentes en la muestra analizados y descritos en el presente texto, así como también el planteamiento y la investigación del método y materiales utilizados para el tratamiento.

La presente obra está dirigida a profesionales y estudiantes utilizados en el tratamiento de aguas residuales industriales de la industria textil y en general, los mismos que con los resultados reportados y la metodología del tratamiento pueden construir criterios aplicables en el desarrollo de nuevas tecnologías de tratabilidad para poner en práctica el tratamiento de características similares de aguas residuales o el tratamiento de aguas residuales de diferentes características.

Además, el lector encontrará información relevante de uso práctico y de aplicabilidad para la resolución de problemas medioambientales por contaminación de aguas residuales industriales.





# **CAPÍTULO 1**

## **AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES**



# 1. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

## 1.1. Antecedentes

Las aguas residuales en general son desechos líquidos, que se general como desechos domésticos o de los distintos procesos industriales, los mismos que para ser vertidos a un cuerpo hídrico receptor tienen que ser tratados para no causar contaminación ambiental y afectación a la salud humana.

De acuerdo a lo mencionado, las aguas residuales se clasifican según su punto de generación en aguas residuales domésticas y aguas residuales industriales. Las mismas que en su composición pueden contener componentes orgánicos e inorgánicos, tales como: proteínas, carbohidratos, nitrógeno, fósforo, aceites, grasas, fenoles, etc. Los contaminantes inorgánicos pueden ser arenas, sales, óxidos, ácidos y bases inorgánicas, metales, entre otros.

### *Aguas residuales industriales*

Las aguas residuales industriales se generan por distintos procesos presentes en la industria siendo de orígenes distintos en cada una de ellas, pueden ser usadas como medios de lavados, enjuague, transporte, agua como medio de solvente en las transformaciones químicas de los respectivos procesos, como subproductos de procesos físicos de destilación, filtración y otros procesos industriales. También dentro de los procesos industriales se generan metales pesados, sustancias orgánicas, tintas y materiales refractarios como lo es en las industrias textiles.

De acuerdo a las normativas ambientales de la Republica del Ecuador, las aguas residuales industriales para ser vertidas a un cuerpo hídrico receptor, para riego o al sistema de alcantarillado tienen que ser sometidas a un tratamiento de aguas residuales industriales y así cumplir con los parámetros ambientales vigentes dispuestos en la Normativa Ecuatoriana, para sus respectivas descargas.

En el Ecuador existen un sinnúmero de empresas que generan aguas residuales industriales, siendo el caso particular de la provincia del Guayas, ciudad de Guayaquil, para tener un estimado y una proyección de las empresas que descargan sus aguas al estero salado, y el cumplimiento de un muestreo por parte del ministerio de ambiente ponemos a su consideración la siguiente información.

Tabla 1. Empresas que descargan sus aguas al Estero Salado.

Detalle	Número	Competencia
Empresas que incumplen con la norma ecuatoriana	120	Municipio Guayaquil
	16	Ministerio del Ambiente
Empresas que cumplen con la norma ecuatoriana	54	Municipio Guayaquil
Total, de empresas	190	

Fuente: Ministerio del Ambiente

## 1.2. Definiciones

Referente a las presentes definiciones que se establecen en el presente texto servirán para entender las palabras y sus significados técnicos (Acuerdo 097-A-2015).

**Agua residual:** es el agua de composición variada proveniente de uso doméstico, industrial, comercial, agrícola, pecuario o de otra índole, sea público o privado y que por tal motivo haya sufrido degradación en su calidad original.

**Agua residual industrial:** agua de desecho generada en las operaciones o procesos industriales.

**Agua residual doméstica:** mezcla de: desechos líquidos de uso doméstico evacuados de residencias, locales públicos, educacionales, comerciales e industriales.

**Afluente:** es el agua, agua residual u otro líquido que ingrese a un cuerpo de agua receptor, reservorio, planta de tratamiento o proceso de tratamiento.

**Carga contaminante:** Cantidad de un contaminante aportada en una descarga de aguas residuales, o presente en un cuerpo receptor expresada en unidades de masa por unidad de tiempo.

**Caracterización de aguas residuales:** proceso destinado al conocimiento integral y estadísticamente confiable de las características del agua residual (doméstica e industrial) e integrado por la toma de muestras, medición de caudal e identificación de los componentes físicos, químicos, biológicos y microbiológicos.

**Contaminación del agua:** cualquier alteración de las características físicas, químicas o biológicas, en concentraciones tales que la hacen no apta para el uso deseado, o que causa un efecto adverso al ecosistema acuático, seres humanos o al ambiente en general.

**Criterio de la calidad del agua:** concentración numérica o enunciado descriptivo recomendado sobre parámetros físicos químicos y biológicos para mantener determinado uso

benéfico del agua. Los criterios de calidad para diversos usos del agua son la base para determinación de los objetivos de calidad en los tramos de un cuerpo receptor. Esta determinación generalmente demanda un proceso de modelación del cuerpo receptor en donde se consideran las condiciones más críticas de caudales del cuerpo receptor, las cargas futuras de contaminantes y la capacidad de asimilación del recurso hídrico.

**Cuerpo receptor:** río, cuenca, cauce o cuerpo de agua que sea susceptible de recibir directa o indirectamente el vertido de aguas residuales.

**Depuración o tratamiento de aguas residuales:** término usado para significar la purificación o remoción de contaminantes de las aguas residuales.

**Descarga controlada:** (1) Término empleado a las descargas de desechos líquidos industriales después de la compensación. (2) término usado en lagunas de almacenamiento y vertido controlado, normalmente con propósitos de reúso agrícola.

**Descarga de aguas residuales:** Acción de verter aguas residuales a un sistema de alcantarillado o cuerpo receptor.

**Descarga Puntual:** cualquier fuente definida de la cual se descargan o pueden descargarse contaminantes.

**Descarga no puntual:** es aquella en la que no se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo receptor, tal es el caso de descargas provenientes de escorrentía pluvial, escorrentía agrícola u otros similares

**Eficiencia de tratamiento:** relación entre la masa o concentración removida, de un parámetro específico y la correspondiente masa o concentración en el afluente, para un proceso o planta de tratamiento. Generalmente se expresa en porcentaje.

**Efluente:** Descarga o vertido líquido proveniente de un proceso productivo o de una actividad determinada.

**Metales pesados:** elementos con densidad relativa mayor de 4 o 5, localizados en la tabla periódica con número atómico 22 a 34 y 40 a 52, así como los de la serie de los lantánidos y los actínidos.

**Monitoreo de la calidad en cuerpos de agua:** implica el seguimiento sistemático a través del muestreo y toma de datos de campo a intervalos de tiempo definidos para la obtención de información que permite evaluar que los parámetros de calidad guarden relevancia con los usos del cuerpo receptor. (Ver Campañas para red de monitoreo).

**Muestra compuesta:** formada por mezcla de alícuotas de muestras individuales, tomadas

a intervalos y durante un período de tiempo predeterminado.

**Muestra puntual:** muestra individual, tomada al azar (con relación al tiempo y/o lugar de un volumen de agua), representa la calidad del agua en el tiempo y en lugar en que fue tomada.

**Muestreo:** es el proceso de tomar una porción, lo más representativa, de un volumen de agua para el análisis de varias características definidas.

**Norma (estándar) de calidad del agua:** documento reconocido en leyes o reglamentos de control de la contaminación del agua, a nivel gubernamental.

**Oxígeno disuelto:** es la concentración de oxígeno en el agua.

**Planta de tratamiento de aguas residuales:** conjunto de obras, facilidades y procesos, implementados para mejorar las características del agua residual doméstica e industrial.

**Pretratamiento:** operaciones y/o procesos destinados a la reducción de la concentración de contaminantes de las descargas de aguas residuales antes de su descarga al sistema público de alcantarillado o cuerpos receptores.

**Punto de muestreo:** lugar de extracción para toma de muestras de agua.

**Reúso de aguas residuales:** utilización de aguas residuales debidamente tratadas para un propósito específico (reúso agrícola, industrial, etc.).

**Tratamiento convencional de aguas residuales:** es aquel que está conformado ya sea por un tratamiento preliminar, un tratamiento primario, un tratamiento secundario y un tratamiento avanzado aplicado de manera individual o en conjunto de acuerdo a la eficiencia requerida.

**Tratamiento preliminar:** procesos para remoción de sólidos gruesos, flotantes, grasas, procesos de compensación y ajustes de pH.

**Tratamiento primario:** contempla el uso de operaciones físicas para la reducción de sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual, como: cribado, desarenado, sedimentación y manejo y disposición final de sólidos generados en este proceso.

**Tratamiento secundario:** contempla el empleo de procesos biológicos y/o químicos para reducción principalmente de compuestos orgánicos biodegradables, y sólidos suspendidos. El tratamiento secundario generalmente está precedido por tratamiento primario, incluye generalmente procesos de desinfección.

**Tratamiento avanzado:** es el tratamiento adicional necesario para remover nutrientes y

sustancias principalmente disueltas que permanecen después del tratamiento secundario.

### 1.3. Aguas residuales industriales de industria textil

La industria textil requiere gran cantidad de agua para sus procesos productivos. De 100 a 200 L de agua son necesarios para producir un kilogramo de productos textiles (Carvalho et al. 2016).

El agua residual resultante está altamente contaminada debido a la presencia de colorantes, surfactantes, sales inorgánicas y distintos compuestos químicos empleados en el proceso productivo (Buscio et al. 2015).

Los valores reportados para la demanda química de oxígeno (DQO) son de alrededor de 900 a 5000 mg/L y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) —con relaciones de biodegradabilidad (DBO5/DQO)— son inferiores a 0.15 (Cheshmeh y Safari 2016, Naje et al. 2016, Yurtsever et al. 2016).

Por lo tanto, su descarga a cuerpos de agua, sin el tratamiento adecuado, es un riesgo para la calidad de los recursos hídricos, que son cada vez más escasos debido a la creciente población y demanda de agua (Doumic et al. 2015).

Los tratamientos de aguas residuales textiles convencionales involucran la coagulación química con sales de hierro o aluminio combinada con procesos biológicos o adsorción (Verma et al. 2012, Vedrenne et al. 2012).

El proceso de coagulación es eficiente para la remoción de coloides y sólidos suspendidos; diferentes estudios reportan que este tipo de contaminantes representan alrededor de 50 % de la DQO total de un efluente textil (Jorfi et al. 2016, GilPavas et al. 2017).

Por consiguiente, se emplea generalmente como etapa de pretratamiento, de ahí que sea necesario efectuar un tratamiento posterior con el objeto de eliminar los contaminantes remanentes y satisfacer la legislación ambiental. Después del proceso de coagulación, los compuestos orgánicos remanentes en este tipo de efluentes son compuestos con estructuras aromáticas complejas y detergentes con alta solubilidad en agua, resistentes a la degradación mediante procesos biológicos (Naje et al. 2016). Esto implica que los métodos convencionales son insuficientes y se requiere buscar alternativas eficientes para el tratamiento de este tipo de aguas residuales.

### 1.3.1. Generalidades

La Industria Textil es una de las industrias que más agua consume, entre 100 y 200 litros por kilogramo de tela procesada, variable según la naturaleza del material. La cantidad de agua empleada en la fabricación de prendas varía según el tipo de fibras (algodón, lana, nylon, poliéster, etc.) y la maquinaria empleada en cada uno de los procesos.

Es además una de las industrias que más residuos líquidos contaminantes emite dada la gran cantidad de reactivos que aplica en las etapas de su proceso, siendo mayoritariamente no biodegradables y persistentes en el medio, especialmente el medio acuoso.

Los pigmentos utilizados son agentes altamente contaminantes ya que son fabricados para ofrecer una gran resistencia a la degradación biológica y gran durabilidad. En el proceso de fabricación se pueden perder hasta 200.000 toneladas de pigmentos y colorantes al año si el agua no es eficientemente tratada.

En las últimas décadas no solo interesa el tratamiento del agua residual para el cumplimiento de las restricciones de vertido, cada vez más y más severas, además se diseñan e instalan nuevas tecnologías para la reutilización del agua y recuperación de los tintes para garantizar la sostenibilidad de la industria.

Los *tintes* se consideran los elementos más contaminantes ya que suponen un *gran impacto para el medio ambiente*: reducen el oxígeno de los cuerpos de agua por el bloqueo de la luz provocando condiciones sépticas, además son agentes mutagénicos y carcinógenos para los animales y humanos, y tóxicos para las plantas ya que inhiben la fotosíntesis.

La producción textil cuenta con diversas etapas en su proceso de producción, cada una de ellas vierte un agua residual de características específicas, sin embargo, para poder tratar la totalidad de las emisiones de agua residual de una industria se procede a la homogeneización del agua residual de todas las líneas de proceso, como: lavado, blanqueado, mercerizado, tinturado.

### 1.3.2. Características

Las características del agua residual dependerán del tipo de fibras trabajadas, las etapas de proceso aplicadas y la maquinaria.

Las operaciones donde se generan mayor descarga de desechos líquidos son el lavado, la tintura, el estampado y el acabado. Las aguas residuales textiles son irregulares y variables en su composición ya que dependen de la unidad de proceso y la operación que se efectuó. Las industrias textiles son contaminantes en términos de volumen y complejidad de sus efluentes ya que cada una de las actividades que realizan genera agua residual de características muy variables.

Además las aguas residuales textiles se caracterizan por tener pH que varía de acuerdo al proceso, altos valores de DQO, DBO, altos niveles de color, turbiedad, una alta concentración de sólidos suspendidos y descargas a altas temperaturas. Valores típicos de DQO y DBO para industrias dedicadas al acabado textil son 1700 mg O<sub>2</sub> /L y 550 mg O<sub>2</sub> /L. Las aguas residuales de teñido y de procesos de acabado de la industria textil con una demanda química de oxígeno que exceda 1600 mg O<sub>2</sub>/L.

El agua residual de una industria textil es fuertemente coloreada, deficiente en nutrientes y con una baja presencia de microorganismos. Estas aguas residuales, son generalmente de naturaleza alcalina, con un elevado valor de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y de Demanda Química de Oxígeno (DQO). 8 Son vertidas a temperaturas elevadas y pueden llegar a presentar metales pesados provenientes de los procesos de teñido y acabado y agentes surfactantes, humectantes y otras sustancias químicas complejas provenientes de diversos procesos a saber:

1. Generación de fibras de origen natural (algodón, lana, seda, etc.) o de fuentes manufacturadas (poliéster, rayón, nylon, etc.)
2. Producción de hilo para telas tejidas.
3. Preparación, coloración, impresión y acabado de una tela terminada. (Yonni F. Fasoli H. Giai M., 2008)

Tabla 2. Características de las aguas residuales de la industria textil.

Proceso	Propósito	Compuestos presentes en el afluente textil
Directo y reactivo	Coloración del algodón	Coloración azul o verde(sales de cobre), agentes surfactantes, antiespumantes, secuestrantes, agentes niveladores y retardantes, Diluyentes, ácido acético, fijadores.
Disperso	Coloración de poliéster	Colorantes, acido acético, EDTA; fosfatos, transportadores(benzoato de fenilo), lubricantes, diluyentes, Hidróxido de sodio, hidrosulfito de sodio.
Impresión	Rayón	Soluciones de Urea

Fuente: Yonni F. Fasoli H. Giai M, 2008

## 1.4. Colorantes empleados en la industria textil

Los colorantes se clasifican en tipo natural extraídos de plantas y animales o de síntesis industrial; es decir, que son obtenidos por una reacción química a gran escala. (quimiNet/ Textil, 2012). Los colorantes sintéticos tienen una amplia aplicación en las industrias; tal es el caso, de la industria textil que por su producción, rapidez de reacción y variedad de colores en comparación con los colorantes naturales.

### 1.4.1. Estructura química de un colorante

Los colorantes se encuentran estructurados de un grupo de átomos denominado cromóforo; estos presentan uno o más enlaces insaturados y es el responsable de dar color a la molécula, y sustituyentes donadores de electrones denominados auxócromos que intensifican el color del cromóforo y mejora la afinidad del colorante por la fibra.

Los cromóforos más importantes son:

- Azo (-N=N-)
- Carbonil (-C=O)
- Nitro (-NO<sub>2</sub>)
- Antraquinónicos
- Triazolometanos (Manikandan B. Ramamurthi V. Karthikeyan R. Sundararaman T., 2009)

Entre los auxócromos están:

- Amina (-NH<sub>2</sub>)
- Carboxil (-COOH)
- Sulfatos (-SO<sub>3</sub>H)
- Hidroxilo (-OH)
- Reactivos
- Ácidos
- Directos
- Básicos
- Mordantes
- Dispersos (Santos A. Cervantes F. Van Lier J. , 2007)

Los grupos sulfato le confieren una alta solubilidad en agua a los colorantes y los grupos azo están generalmente conectados a anillos de benceno y naftaleno, así como a heterociclos aromáticos y grupos alifáticos que son los responsables del color característico de cada colorante (Haig, 2001)

### 1.4.2. Colorantes reactivos

Estos colorantes contienen grupos químicos que se unen por un enlace covalente a la tela. En el tintado de algodón se realiza con un pH de entre 9,5 y 11, pH que se consigue con  $\text{NaCO}_3$  y/o  $\text{NaOH}$ . Hasta un 40% del colorante puede ser hidrolizado con agua, lo que le lo vuelve inerte. Esto desemboca en la presencia de colorantes reaccionados (inertes) en las aguas residuales que son difíciles de aislar (son solubles en agua). Se utiliza sal ( $\text{NaCl}$ ) para incrementar la liberación de colorantes en los baños.

Los electrolitos suprimen la acumulación de cargas negativas en la tela ocasionadas por el uso de colorantes aniónicos y, por tanto, potencian la absorción de colorantes. Se pueden utilizar cantidades de hasta 100g/l de colorante, aunque las cargas necesarias pueden variar de una materia colorante a otra (Walters, A; Santillo, D & Johnston, P., 2005).

El uso de colorantes catiónicos o bien de un tratamiento previo de la tela basado en polímeros catiónicos, alivia la necesidad de utilizar electrolitos y reduce el consumo de agua. (Walters, A; Santillo, D & Johnston, P., 2005)

### 1.4.3. Colorantes ácidos

Suelen ser brillantes, con una durabilidad variable al momento de lavado. Estructuralmente, las moléculas de los colorantes varían mucho e incluyen algunos complejos metálicos. La característica que define a este grupo es la presencia de grupos sulfonados, que son los que aportan la solubilidad en el agua. Las fuerzas de Van der Waals proporcionan una interacción adicional de adherencia. El grado de interacción, y por tanto, el grado de durabilidad del color depende directamente del tamaño de la molécula del colorante.

Los colorantes se aplican en condiciones de acidez (utilizando ácido fórmico o acético), dependiendo el grado de acidez de las propiedades individuales del colorante. (Walters, A; Santillo, D & Johnston, P., 2005).

### 1.4.4. Colorantes directos

Estos colorantes son moléculas largas más planas que se pueden alinear con las macromoléculas de las fibras. Estas se fijan por fuerzas (electroestáticas) de Van der Waals y por puentes de hidrogeno. El 75% del consumo se destina al tintado de las fibras de celulosa. Se utilizan auxiliares similares a los de los colorantes reactivos. Se aplican electrolitos (cloruro sódico o sulfato sódico) para favorecer el agregado de moléculas de colorante sobre la fibra. Se aplican humectantes (generalmente surfactantes no iónicos) para contribuir a una absorción uniforme y completa del colorante. (Walters, A; Santillo, D & Johnston, P., 2005).

Para contribuir a una buena durabilidad del color aplican un tratamiento posterior que blo-

quean los grupos hidrófilos en la molécula del colorante y ocasiona una reducción en la solubilidad en agua. Predominan los compuestos cuaternarios de amonio con largas cadenas de hidrocarburo. Estas forman compuestos similares a la sal con la molécula del colorante. Los compuestos cuaternarios del amonio suelen ser tóxicos para los organismos vivos. (Walters, A; Santillo, D & Johnston, P., 2005).

#### **1.4.5. Colorantes Básicos**

Son sales amónicas o complejos formados por cloruro de cinc o aminas. Algunos colorantes básicos, de elevado peso molecular, son absorbidos por el algodón y el rayón. (Walters, A; Santillo, D & Johnston, P., 2005).

#### **1.4.6. Colorantes dispersos**

El colorante disperso tiene un 50% de compuestos azoicos y un 25% antraquinonas. Se pueden caracterizar por la falta de grupos polares y, en general, se trata de moléculas pequeñas las cuales penetran las fibras con mayor facilidad. Estas moléculas no se adhieren a la fibra, lo que produce la fijación. La falta de un fuerte nexo químico permite cierto grado de migración fuera de la fibra, lo que produce la alta incidencia de dermatitis de contacto asociada con las materias colorantes dispersas. Se utilizan agentes químicos para facilitar la penetración del colorante y a temperaturas bajas en el caso del poliéster y la lana. (Walters, A; Santillo, D & Johnston, P., 2005).

#### **1.4.7. Colorantes sulfurosos**

Se utilizan principalmente para teñir telas de celulosa. Forman compuestos insolubles en agua y con alto peso molecular haciendo reaccionar compuestos sulfurosos con aminas y ácidos. Muchos colorantes contienen grupos sulfurosos, pero solo se clasifican como colorantes sulfurosos aquellos que se vuelven solubles en agua tras la reacción con el monosulfuro sódico en condiciones alcalinas. El uso de sulfuros y de hidrosulfuro sódico para producir una forma del colorante soluble en agua provoca ciertas preocupaciones medioambientales. (Walters, A; Santillo, D & Johnston, P., 2005).

#### **1.4.8. Colorantes azoicos**

Son colorantes que se distinguen por su método de fijación, donde; más de la mitad de los colorantes utilizados en la actualidad contienen 16 grupos azoicos. El nexo azoico se sintetiza sobre la tela formando una molécula insoluble de colorante a partir de dos fragmentos solubles en agua; un compuesto de naftol y un compuesto diazotizado. A los dos fragmentos solubles se acoplan con hidróxido sódico y con nitrito sódico y ácido clorhídrico formando una materia colorante insoluble. Los compuestos azoicos tienen grandes cualidades aromáticas y son de colores vivos. Cabe cierto grado de mezcla y combinación y distintas combinaciones de componentes acoplantes con bases diazóticas producen distintos colores.

(Walters, A; Santillo, D & Johnston, P., 2005).

#### **1.4.9. Colorantes mordantes**

Facilitan la fijación del colorante a la fibra, de manera uniforme y estable al contacto con la luz y el agua. Actualmente se utilizan sales solubles de metales como aluminio, cobre, hierro y estaño como mordientes. El tipo de metal determina la tonalidad del color. Los mordientes se usan en poca cantidad, para no dañar la fibra. Utilizados en exceso pueden dejarla rígida y áspera. (Maria,DS; Marta,M , 2007)

#### **1.4.10. Colorantes de antroquinona**

Es el segundo grupo de importancia de los colorantes sintéticos, por detrás de los azoicos, y se emplean para teñir algodón y cuero; mientras los colorantes azoicos dominan los tonos amarillo, naranja y rojo, las antraquinonas dominan el azul y el turquesa. La razón por la que los colorantes de tipo antraquinona tienen menos importancia es meramente económica; por un lado, presentan una menor absorción molar que los azoicos, y por otro, las materias primas son menos versátiles. (Maria,DS; Marta,M , 2007)

### **1.5. Normas Ambientales aplicables en el Ecuador**

En el Ecuador existen muchas normas ambientales las cuales centran en la aplicación de parámetros correctos en el tratamiento de aguas residuales industriales de acuerdo a su disposición después del tratamiento siendo esto a un cuerpo hídrico receptor, sistema de alcantarillado sanitario u otro determinado para dicha acción.

La norma que se aplica en el Ecuador es el (Acuerdo Ministerial 097-A – 2015) con sus respectivos anexos, donde establece los parámetros de descarga de un agua residual industrial después de su tratamiento, adecuando esta a los límites máximos permisibles.

#### **1.5.1. Objeto de la norma**

La norma tiene como objeto la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, en lo relativo al recurso agua.

El objetivo principal de la presente norma es proteger la calidad del recurso agua para salvaguardar y preservar los usos asignados, la integridad de las personas, de los ecosistemas y sus interrelaciones y del ambiente en general. Las acciones tendientes a preservar, conservar o recuperar la calidad del recurso agua deberán realizarse en los términos de la presente Norma.

### **1.5.2. Normas aplicables según el uso y descarga de agua.**

Dentro de la aplicabilidad según el uso y la descarga de agua, básicamente nos centraremos en la descarga de agua residual industrial tratada al sistema de alcantarillado sanitario, donde se establecerá, los parámetros de descarga y los límites máximos permisibles del (Acuerdo 97-A-2015).

#### **Norma de calidad Ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua**

##### ***Introducción***

La presente norma técnica ambiental revisada y actualizada es dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental y se somete a las disposiciones de éstos, es de aplicación obligatoria y rige en todo el territorio nacional.

La presente norma técnica (Acuerdo 97-A-2015) determina o establece:

1. Los principios básicos y enfoque general para el control de la contaminación del agua;
2. Las definiciones de términos importantes y competencias de los diferentes actores establecidas en la ley;
3. Los criterios de calidad de las aguas para sus distintos usos;
4. Los límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para las descargas en cuerpos de aguas o sistemas de alcantarillado;
5. Permisos de descarga;
6. Los parámetros de monitoreo de las descargas a cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado de actividades industriales o productivas, de servicios públicas o privadas;
7. Métodos y procedimientos para determinar parámetros físicos, químicos y biológicos con potencial riesgo de contaminación del agua.

##### ***Clasificación***

#### **Criterios de calidad de las aguas para sus distintos usos**

1. Criterios de calidad para aguas destinadas al consumo humano y uso doméstico, previo a su potabilización.
2. Criterios de calidad para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuarios.
3. Criterios de calidad de aguas para riego agrícola.
4. Criterios de calidad para aguas de uso pecuario.
5. Criterios de calidad para aguas con fines recreativos.
6. Criterios de calidad para aguas de uso estético.

## Normas generales de descarga de efluentes

1. Normas generales para descarga de efluentes, tanto al sistema de alcantarillado como a los cuerpos de agua.
2. Límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para descarga de efluentes al sistema de alcantarillado.
3. Límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para descarga de efluentes a un cuerpo de agua o receptor.
  - a. Descarga a un cuerpo de agua dulce.
  - b. Descarga a un cuerpo de agua marina.
4. Permisos de descarga

## Normas generales para descarga de efluentes al sistema de alcantarillado

1. Se prohíbe la descarga de residuos líquidos sin tratar hacia el sistema de alcantarillado, provenientes del lavado y/o mantenimiento de vehículos aéreos y terrestres, así como el de aplicadores manuales y aéreos, recipientes, empaques y envases que contengan o hayan contenido agroquímicos u otras sustancias tóxicas. Las descargas tratadas deben cumplir con los valores establecidos en la Tabla 3.
2. Las descargas líquidas provenientes de sistemas de potabilización de agua no deberán disponerse en sistemas de alcantarillado, a menos que exista capacidad de recepción en la planta de tratamiento de aguas residuales, ya sea en funcionamiento o proyectadas en los planes maestros o programas de control de la contaminación, en implementación. En cuyo caso se deberá contar con la autorización de la Autoridad Ambiental Nacional o la Autoridad Ambiental Competente que corresponda.
3. Se prohíbe descargar en un sistema público de alcantarillado sanitario, combinado o pluvial cualquier sustancia que pudiera bloquear los colectores o sus accesorios, formar vapores o gases tóxicos, explosivos o de mal olor, o que pudiera deteriorar los materiales de construcción en forma significativa. Esto incluye las siguientes sustancias y materiales, entre otros:
  - a) Fragmentos de piedra, cenizas, vidrios, arenas, basuras, fibras, fragmentos de cuero, textiles, etc. (los sólidos no deben ser descargados ni aún después de haber sido triturados).
  - b) Resinas sintéticas, plásticos, cemento, hidróxido de calcio.
  - c) Residuos de malta, levadura, látex, bitumen, alquitrán y sus emulsiones de aceite, residuos líquidos que tienden a endurecerse.
  - d) Gasolina, petróleo, aceites vegetales y animales, aceites minerales usados, hidrocarburos clorados, ácidos, y álcalis.
  - e) Cianuro, ácido hidrazoico y sus sales, carburos que forman acetileno y sustancias

tóxicas.

4. La EPS podrá solicitar a la Entidad Ambiental de Control, la autorización necesaria para que los regulados, de manera parcial o total descarguen al sistema de alcantarillado efluentes, cuya calidad se encuentre por encima de los estándares para descarga a un sistema de alcantarillado, establecidos en la presente norma. La EPS deberá cumplir con los parámetros de descarga hacia un cuerpo de agua, establecidos en esta Norma.

5. Las descargas al sistema de alcantarillado provenientes de actividades sujetas a regularización, deberán cumplir, al menos, con los valores establecidos en la Tabla 3, en la cual las concentraciones corresponden a valores medios diarios.

Tabla 3. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público.

Parámetros	Expresados como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	Sust. Solubles en hexano	mg/l	70,0
Explosivos o inflamables	Sustancias	mg/l	Cero
Alkil mercurio	-----	mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN-	mg/l	1,0
Cinc	Zn	mg/l	10,0
Cloro activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo	mg/l	0,1
Cobalto total	Co	mg/l	0,5
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/l	0,2
Compuestos organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,05
Cromo Hexavalente	Cr6	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de oxígeno (5días)	DBO5	mg/l	250,0
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	500,0
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,0
Fosforo total	P	mg/l	15,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Hierro total	Fe	mg/l	25,0
Manganeso total	Mn	mg/l	10,0
Mercurio (total)	Hg	mg/l	0,01
Niquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno Total kjedahl	N	mg/l	60,0
Organofosforados	Especies Totales	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,5
Plomo	Pb	mg/l	0,5
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,5
Sólidos Sedimentables	SD	mg/l	20,0
Sólidos Suspendedos Totales	SST	mg/l	220,0
Solidos totales	ST	mg/l	1600,0
Sulfatos	SO4-2	mg/l	400,0
Sulfuros	S	mg/l	1,0
Temperatura	°C		<40,0
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	2,0
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0
Tricloroetileno	Tricloroetileno	mg/l	1,0

Fuente: Acuerdo 97-A-2015





## **CAPÍTULO 2**

### **OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA**



## 2. OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA

### 2.1. Generalidades

Los colorantes presentes en los efluentes de la industria textil, en su mayoría son refractarios siendo resistentes a los tratamientos biológicos convencionales, por lo que la biodegradación directa del residuo no constituye una verdadera solución (García et al., 2012).

Por otra parte García et al. (2012), utilizó el proceso de oxidación avanzada - reacción Fenton, se utilizan como reactivos peróxido de hidrógeno y sales de  $\text{Fe}^{2+}$  soportados en carbón activado obtenido a partir de residuos de rosas, para la remoción de colorantes sintéticos, La máxima remoción del 98,33% para colorante el negro reactivo 5, al utilizar el catalizador de 3% Fe.

El método de la electroquímica en el tratamiento de efluentes contaminados con compuestos orgánicos permite reducirlos, transformarlos o eliminarlos (Linares Hernández et al., 2011). Mediante la selección adecuada de los electrodos y del electrolito, se generan durante el proceso electroquímico, oxirradicales con un poder oxidante superior al de cualquier sustancia química oxidante convencional, los cuales dan lugar a la oxidación de la materia orgánica, dando como productos  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (Martín de Vidales, 2015; Cifuentes et al., 2015).

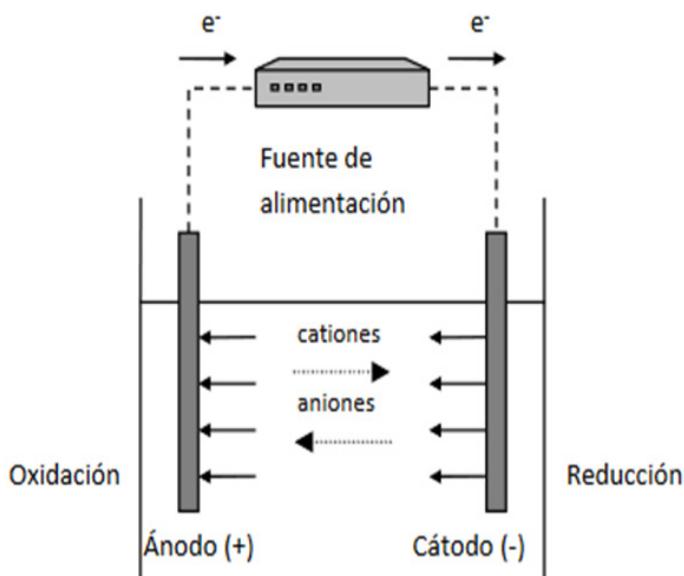


Figura 1. Esquema de una celda electroquímica  
Fuente: Martín de Vidales, 2015; Cifuentes et al., 2015

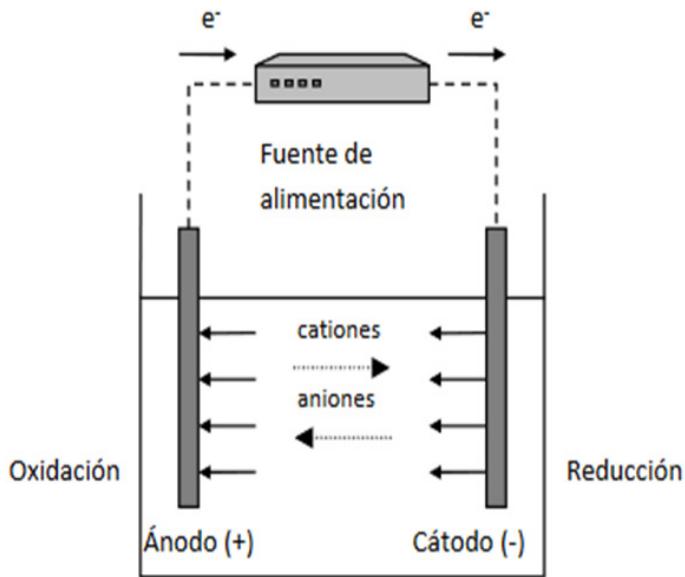


Figura 2. Mecanismos de oxidación en un reactor electroquímico.  
a) Reacción directa. b) Reacción indirecta  
Fuente: Martín de Vidales, 2015

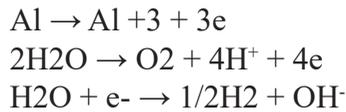
En la figura 2 se presentan los mecanismos de reacción electroquímicos, pueden ser: los procesos anódicos con oxidación directa y los procesos de oxidación indirecta, esto es debido a que en los procesos de oxidación electroquímica, tiene especial interés la presencia de los agentes oxidantes/reductores, que son los encargados de desencadenar la reacción redox (reducción-oxidación) (Martín de Vidales, 2015).

Es de conocimiento investigativo que los procesos electroquímicos avanzados de oxidación son muy eficaces para el tratamiento de aguas residuales por las características básicas de trabajo: trabaja a presión atmosférica, temperatura inferior a  $100^{\circ}\text{C}$ , La velocidad de la reacción está comandada por la densidad de corriente aplicada ( $\text{A}/\text{m}^2$ ), entre otros (Bes Monge et al., 2016).

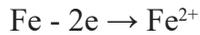
## 2.2. Factores que afectan al método

### 2.2.1. Naturaleza de las placas

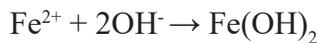
En la superficie de los electrodos cuando existe una diferencia de potencial se generan reacciones conocidas como reacciones heterogéneas, en las cuales existe dependencia entre la velocidad de reacción y la naturaleza de la superficie. Los electrodos son la fuente y el sumidero de los electrones en las reacciones de transferencia de electrones entre las fases y es importante la selección del material. Al utilizar electrodos de aluminio se busca un proceso de coagulación electroquímica donde es importante la disolución del metal, además de la oxidación y reducción del agua; lo cual ocurre en el contexto de las siguientes ecuaciones (Cañizares, Carmona, Lobato, Martínez, & Rodrigo, 2005).



Para ánodo de hierro:



En medio alcalino:



En medio ácido:



La electrólisis del agua produce oxígeno e hidrógeno según (Piña–Soberanis, y otros, 2011) de la siguiente forma:

En el ánodo:



En el cátodo:

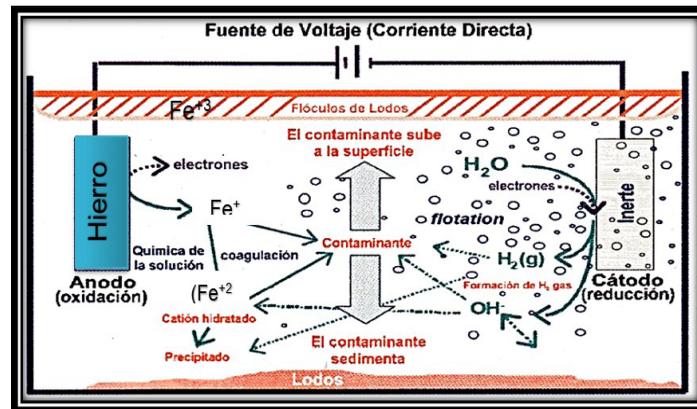
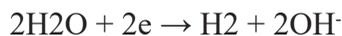


Figura 3. Remoción de contaminantes con electrodo de Hierro.

Fuente: Martín de Vidales, 2015

Adicional a estas reacciones es de interés el proceso químico que ocurre como una coagulación asistida electroquímicamente. Al solubilizarse el aluminio, ocurre la oxidación de éste; y en conjunto con la reducción de las moléculas de agua a hidrogeno molecular se establece la siguiente ecuación que resume el proceso (Cañizares, Carmona, Lobato, Martínez, & Rodrigo, 2005).



### 2.2.2. Condiciones de pH

Para la reacción anterior es importante la influencia del pH en el proceso de disolución del metal, observándose que el valor de este parámetro se incrementa alcanzando valores alcalinos durante el proceso. Además, una vez que el aluminio se solubiliza se genera un proceso importante definido como especiación de los coagulantes en donde diferentes especies se forman dependiendo del pH de la solución (Cañizares, Carmona, Lobato, Martínez, & Rodrigo, 2005).

En cada electrodo (ánodo y cátodo) existen condiciones de pH independientes alrededor de cada celda; en el ánodo debido al proceso de oxidación del agua se genera una alta concentración de protones lo que induce a un pH bajo, por otro lado en el cátodo un proceso de reducción del agua forma iones hidroxilo y por tal un pH más alto que afecta la velocidad de disolución del metal. (Cañizares, Carmona, Lobato, Martínez, & Rodrigo, 2005).

### 2.2.3. Polarización

Próxima a la superficie de cada electrodo o en delgadas películas contiguas a estos en donde se generan los procesos electroquímicos, la descarga de un ion en el cátodo generara una reducción en los iones en la película que envuelve dicho electrodo. En consecuencia, el potencial de éste, tiende a acentuar su valor negativo, empezando la polarización catódica. Si aumenta el valor de la densidad de corriente, la concentración de iones en la película que envuelve al cátodo tenderá a disminuir, mediante la agitación mecánica se reduce la polarización de la concentración (MANTELL, 1980).

Si aumenta la intensidad de corriente, de modo que la concentración de iones de metal en la superficie del cátodo prácticamente quede anulada, no podrá circular ya una corriente de intensidad máxima y depende de la concentración de la solución, la temperatura y la velocidad de agitación de la solución. La polarización puede ser considerada como resistencia óhmica que forma parte del circuito y que hay que evitarla ya que si llega a ser suficientemente alta puede modificar y originar nuevos y nocivos procesos (MANTELL, 1980).

#### 2.2.4. Tensión de trabajo

Los casos donde se anotan los arreglos monopolares, en la práctica no se han considerado como parte del plan de pruebas final, ya que debido a las características de la fuente de energía empleada (tensión de trabajo) no aplica, físicamente no es viable ya que al tener un rango de tensión superior al recomendado para un funcionamiento adecuado del material seleccionado como aportante en este pudiese producirse una pasivación forzada de dicho material, inhibiendo el paso de corriente a través del sistema por lo que no se darían las reacciones requeridas para el estudio aquí planteado. (INVESTIGACION EXPERIMENTAL 2022).

#### 2.2.5. Contaminantes refractarios y metálicos.

Dentro de los contaminantes del agua residual de la industria textil se encuentran los compuestos orgánicos refractarios de alta toxicidad. Entre ellos están los fenoles, sulfuros, cromo y colorantes, todos considerados refractarios y posibles de ser removidos mediante la técnica de electrocoagulación. Los colorantes, en especial los de origen sintético, presentes en las aguas residuales, son responsables de muchos de los efectos nocivos sobre la flora y la fauna acuática. Los más significativos son la disminución del oxígeno disuelto, la eutrofización, la formación de compuestos recalcitrantes y tóxicos para las células y la obstaculización del paso de la luz a los cuerpos de agua y su deterioro estético (Álvarez, 1999).

Por otra parte, a partir de derivados del petróleo se obtienen colorantes sintéticos con características superiores a la de los colorantes naturales, tanto en lo referido a las propiedades físico-químicas como a las ventajas funcionales de su aplicación luego del teñido. Estos colorantes presentan resistencia a la degradación (Red Argentina, 2012).

La clasificación industrial, creada por la Corporación para la Investigación Socioeconómica y Tecnológica de Colombia, cataloga a los efluentes del sector textil como de alto impacto ambiental y los define como vertidos de “Alta Significación Ambiental - ASA”. El mayor impacto negativo en este sector industrial lo originan los efluentes líquidos (Corporación para la Investigación Socioeconómica, 1990).

En esta investigación se emplean procesos de oxidación electroquímica, con aporte de energía, específicamente electroquímica y se aplica electrocoagulación a las aguas residuales de industrias textiles.

Para el caso de la investigación en particular objeto de análisis del presente texto se ha determinado los siguientes compuestos refractarios y metálicos los mismos que se caracterizan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Compuestos refractarios y metales agua residual industria textil.  
a.- Parámetros físicos químicos

Parámetro	Abrev.	Unidad
Potencial de Hidrógeno	pH	U. de pH
Color verdadero		Pt-Co
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/L

b.- Metales pesados

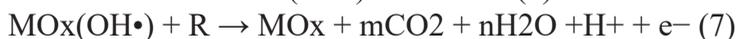
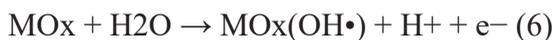
Parámetro	Unidad
Cadmio (Cd)	mg/L
Cobalto (Co)	mg/L
Cobre (Cu)	mg/L
Cromo Hexavalente (Cr 6+)	mg/L
Hierro (Fe)	mg/L
Plomo (Pb)	mg/L
Tensoactivos	mg/L
Fenoles	mg/L

Fuente: Corporación para la Investigación Socioeconómica, 1990

### 2.3. Fundamentos de la Oxidación electroquímica

La electroquímica aplicada al tratamiento de efluentes contaminados con compuestos orgánicos lleva a reducirlos, transformarlos o eliminarlos (Patiño et al., 2012). La oxidación electroquímica, se basa en la generación de especies oxidantes a través de la imposición de una diferencia de potencial entre 2 placas metálicas. Con la aplicación de estos procesos se logra la oxidación total (mineralización) o parcial (conversión de la materia orgánica a compuestos más sencillo como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O que más fácilmente degradables y menos contaminantes) de la materia orgánica (López et al., 2021).

Los mecanismos de reacción con electrodos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, es la reproducción de radicales hidroxilo debido a la electrolisis del agua, y los radicales •OH quedan fisisorbidos en la superficie del material del electrodo (ánodo) Este mecanismo de reacción se da en forma no selectiva entre las sustancias orgánicas contaminantes con los radicales hidroxilos (OH•), lográndose la oxidación total; o sea, la mineralización hasta CO<sub>2</sub> y agua de acuerdo a la reacción (7) (López-Ojeda et al., 2015).



Así, experimentalmente se indica que la eficiencia de un proceso de tratamiento de aguas residuales estriba de varios factores y variables, que se pueden abarcar en las condiciones experimentales, los métodos analíticos y las condiciones de operación. Las variables de control que se destacan por su influencia en el proceso: electrolito de soporte, pH del medio, temperatura, concentración del compuesto orgánico, y el tipo de material anódico donde se llevarán a cabo las reacciones de oxidación. (López-Ojeda et al., 2015)

La experimentación se fundamentó en los principios de oxidación electroquímica aplicando la reacción electrolítica de oxidación directa por la cual se realizó la depuración de los contaminantes refractarios presentes en un efluente textil industrial con el propósito de disminuir el color, turbiedad, DQO, metales, suspendidos, para lo cual se midieron las concentraciones de los mismos antes y después del tratamiento con el fin de determinar el porcentaje de remoción de cada uno de los parámetros evaluados (Gilpavas, 2008).

#### 2.4. Objetivo del proceso

El objetivo de esta investigación fue depurar contaminantes refractarios de un efluente de la industria textil, aplicando tecnologías avanzadas con aporte de energía, (por oxidación electroquímica) para minimizar el impacto ambiental en los cuerpos de agua.

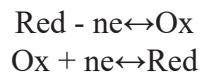
#### 2.5. Acción oxidativa y electroquímica

Se puede establecer que cuando se ejecuta un procedimiento electroquímico, se producen simultáneamente seis funciones básicas entre los electrodos y en la solución electrolítica:

1. *Oxidación*: Se proporcionan electrones al ánodo para oxidar las impurezas presentes en la solución.
2. *Reducción*: se proporcionan electrones por el cátodo para reducir las impurezas presentes en la solución.
3. *Electroforesis*: Los iones con carga o cargas positivas se mueven desde el ánodo al cátodo; mientras que los iones con carga o cargas negativas se mueven desde el cátodo al ánodo.
4. *Ataque electroquímico*: Si el ánodo está hecho de un metal barato, el ánodo se somete a una ionización de modo de oxidación para liberar cationes mediante la aplicación de un voltaje adecuado entre los dos electrodos, para hacer que la solución tenga la conductividad apropiada.
5. *Electrolisis*: El agua se descompone en hidrógeno y oxígeno.
6. *Polarización*: Las impurezas y las moléculas de agua se polarizan en respuesta a la aplicación del campo eléctrico formado entre los dos electrodos cuando se aplica el voltaje adecuado, de forma que los iones con carga o cargas negativas se acumulan cerca del ánodo y los iones con carga o cargas positivas se acumulan cerca del cátodo (Borckris & A., 2003).

Las reacciones electroquímicas son la causa de las transformaciones químicas que sufren las sustancias cuando se trabaja en un proceso de electrólisis, con paso de corriente eléctrica a través de los electrodos (Borckris & A., 2003).

Las transformaciones químicas generadas consisten en una ganancia o pérdida de electrones (reducción u oxidación) mediante la intervención de un electrodo, que hace de soporte de electrones y de la disolución electrolítica, que permite el transporte de sustancias que se van a electrolizar desde la disolución hasta los electrodos. En la siguiente imagen se puede observar que la interface 1 se produce una reacción electroquímica de oxidación o anódica, y en la interface 2 se produce una reacción electroquímica o catódica (Borckris & A., 2003).



Para la aparición de estas reacciones electroquímicas, se necesitan los siguientes elementos: célula electrolítica, electrodos, generador de energía eléctrica, conductores y aparatos de control o de medida, además de las disoluciones de electrolito y las sustancias que se van a electrolizar (Borckris & A., 2003).

## 2.6. Proceso

### 2.6.1. Ventajas y desventajas

El método ofrece en principio una serie de ventajas que se mencionan a continuación (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006):

1. Pueden ser tratadas las cargas coloidales más pequeñas, debido a que pueden moverse más fácilmente que sus homólogos más grandes dentro de un campo eléctrico, esto facilita la coagulación. Además, tal movimiento evita la necesidad de agitación mecánica, el cual si es incontrolado puede destruir los precipitados tan pronto como son formados.
2. La cantidad de productos químicos requeridos es mucho más baja (del orden de 1/10). Por ejemplo, en el proceso convencional de neutralización por cal, se incrementa la dureza del agua. Con el proceso de electrocoagulación la dosis de cal es inferior, mejorando el proceso y la calidad de las aguas.
3. Se producen pequeñas cantidades de lodo en su acción de coagulación, debido al alto contenido de sólidos secos. Además, el lodo producido por tratamiento electroquímico es más hidrófobo, lo que origina residuos más compactos, igualmente se reducen los tiempos de decantación.
4. No se requiere mezcla de productos químicos.
5. La durabilidad de los electrodos reduce los bajos tiempos improductivos para el mantenimiento o sustitución.
6. La reducción de materia orgánica, incluyendo materia orgánica no biodegradable, es más efectiva, esto facilita el tratamiento biológico siguiente.
7. La dosificación de coagulante, así como el sobre potencial necesario, puede ser fácilmente

te calculado y controlado.

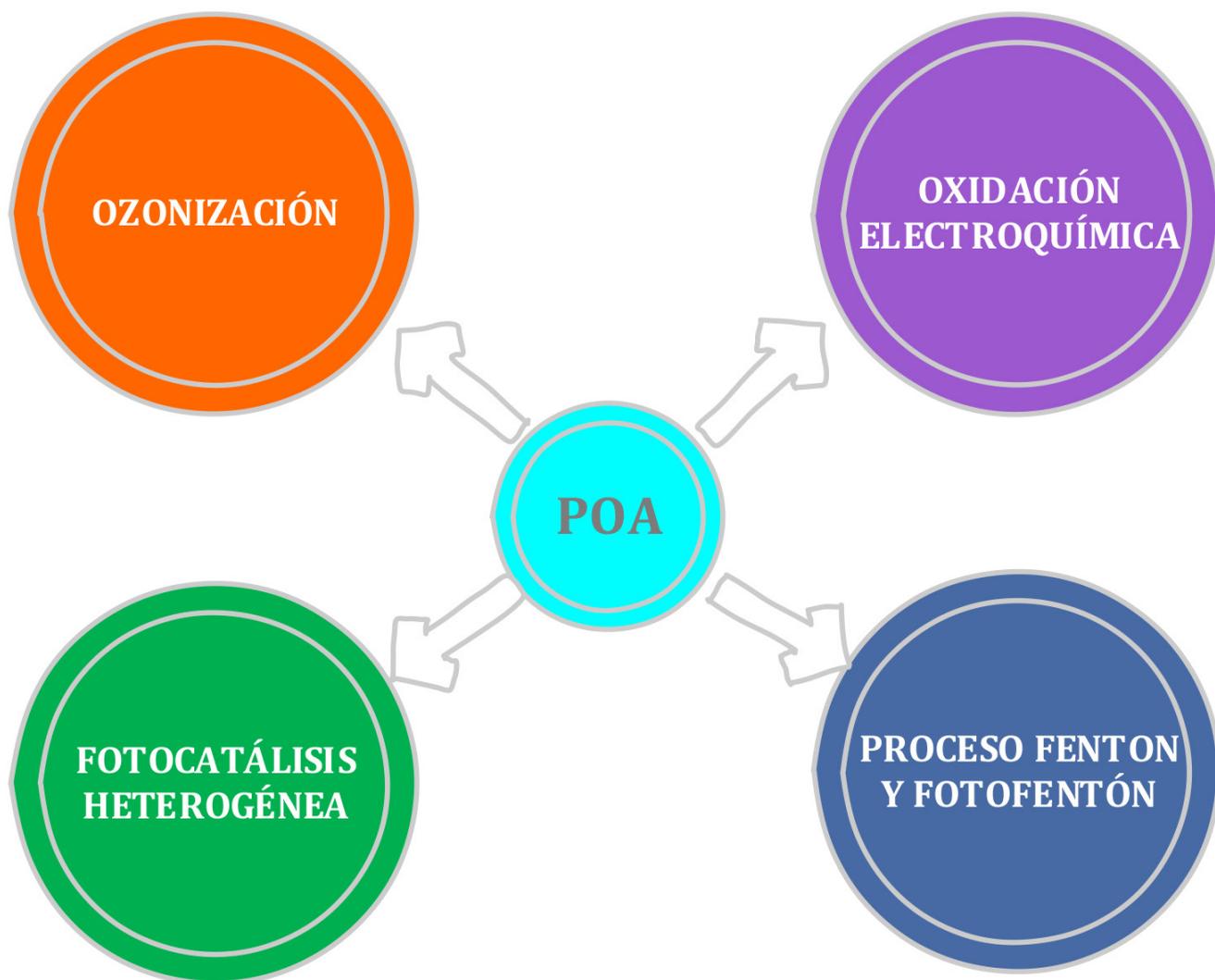
8. Estos procesos son apropiados para pequeñas plantas de tratamiento.
9. Se observa normalmente un aumento de pH, el cual ayuda en la eliminación de iones de metales pesados por su precipitación como hidróxidos o por la adsorción en otros flóculos o precipitados.
10. A menudo, no es necesario el control de Ph, a menos que éste parámetro adquiera valores externos.
11. Con el sistema de electrocoagulación puede conseguirse una alta reducción de sólidos, altas eficiencias (aproximadamente 90%) en sistemas bien diseñados.
12. Se requieren tiempos de retención cortos. Por ejemplo, son suficientes 8 minutos para el tratamiento de la decoloración de aguas residuales procedentes de la industria textil.
13. Los costos de operación son mucho más bajos comparados con tecnologías convencionales equivalentes, que garanticen los mismos resultados.

### 2.6.2. Problemas frecuentes

Los problemas más importantes a considerar en los procesos de electrocoagulación, son los siguientes (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006):

1. La producción de H<sub>2</sub> en el cátodo, puede impedir la decantación apropiada de la materia coagulada.
2. La concentración de iones aluminio o hierro en el efluente muy probablemente se incrementará. Un cuidadoso control de pH sería necesario, si el contenido de Al o Fe se saliese de los límites admisibles.
3. Estos procesos con corriente continua, pueden agruparse entre los electrodos, dificultando su producción adicional. Las alternativas, como solución a este problema, incluyen el uso de un ánodo móvil, provocando una alta turbulencia, introducción de gas, o agitación mecánica. Los electrodos de lecho fluidizado han sido utilizados para limpiar las superficies de los electrodos con una corriente erosiva moderada.
4. Estos procesos con corriente continua están frecuentemente acompañados de la pasivación del ánodo y la deposición de lodo sobre los electrodos. Para prevenir esto, se puede usar corriente alterna con impulsos inversos controlados, o la activación del ánodo por la adición de iones como cloruro con el fin de bajar considerablemente la polarización anódica requerida y facilitar continuamente la renovación de la superficie de los electrodos del metal oxidado en el impulso siguiente. Por otro lado, la generación de hidrógeno provoca el debilitamiento de adherencia entre el lodo y el electrodo, permitiendo su desprendimiento y separación. Este procedimiento tiene la ventaja adicional de duplicar el tiempo requerido para la sustitución del electrodo.
5. Los costos de inversión son relativamente altos, aunque los costos de operación tienden ser más bajos que otras técnicas.





## **CAPÍTULO 3**

### **MÉTODO Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES**



## 3. MÉTODO Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

### 3.1. Volumen, recolección y preservación de la muestra

Para poder cumplir con la planificación inicial (hoja de ruta) es imprescindible entender la naturaleza intrínseca del problema a resolver, es decir, que se requiere un conocimiento previo, claro y preciso del problema a abordar, así como también los factores que influyen en su generación, esto con la finalidad de favorecer una perspectiva real de la dimensión de la situación y sus posibles alternativas de solución a la hora de fijar los objetivos a conseguir.

Se recolectaron aproximadamente 40 gal de un efluente residual de una industria textil, ubicada en el Km 16,5 de la vía a Daule, del tinturado de algodón luego del tratamiento primario (cribado, desarenado y sedimentación primaria). Las muestras se almacenaron en contenedores de plástico a 4°C para su transporte, evitando la degradación de compuestos, de acuerdo a los procedimientos (Baird & Eaton, 2017).

La muestra presentó un color rojo intenso, muy persistente en dilución. Esto se debe a que para la obtención de dicho tinte se requiere de mezclar hasta tres tipos de pigmento diferentes de los que se desconoce las cantidades, su grado de pureza, la naturaleza química ni los porcentajes aportados de estos en la fórmula final del tinte empleado, ya que todo lo señalado anteriormente forma parte del secreto industrial y el acervo tecnológico de la empresa que proporcionó la materia prima objeto de estudio.

### 3.2. Caracterización del agua residual industrial

La caracterización inicial del agua se realizó por triplicado en el Laboratorio de aguas de la Facultad de Ingeniería Química en la Universidad de Guayaquil y en el Laboratorio ELI-CROM, los valores promedios obtenidos se presentan en la tabla 5, 6, junto con el límite permisible de descarga a sistema de alcantarillado público, establecidos en la legislación ecuatoriana (Ministerio del Ambiente del Ecuador [MAE], 2015).

Tabla 5. Caracterización agua residual industrial (Parámetros Físico químicos)

Parámetro	Abrev.	Unidad	Resultado	Límite de descarga a sistema de alcantarillado público
Potencial de Hidrógeno	pH	U. de pH	10.77	6-9
Color verdadero		Pt-Co	38800	1/20
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	1167	500
Sólidos Suspendedos Totales	SST	mg/L	160	220

Fuente: Laboratorio de aguas. Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Guayaquil

Tabla 6. Caracterización agua residual industrial (agua cruda). Metales pesados

Parámetro	Unidad	Resultado	Límite de descarga a sistema de alcantarillado público
Cadmio (Cd)	mg/L	0.37	0.02
Cobalto (Co)	mg/L	1.65	0.5
Cobre (Cu)	mg/L	0.50	1.0
Cromo Hexavalente (Cr 6+)	mg/L	10.10	0.5
Hierro (Fe)	mg/L	1.64	10
Plomo (Pb)	mg/L	0.0337	0.2
Tensoactivos	mg/L	0.038	2.0
Fenoles	mg/L	0.282	0.2

Fuente: Laboratorio ELICROM

### 3.3. Unidades empleadas en el desarrollo de la investigación

Para el desarrollo de las pruebas o ensayos experimentales se requiere de un equipamiento de singulares características, tanto en su uso, como en su funcionamiento y naturaleza constitutiva. En el siguiente cuadro se describen los equipos requeridos para el trabajo de campo:

Tabla 7. Reactivos para análisis de los parámetros de respuesta

Reactivo	Parámetro	Rango	Resultado
Solución de digestión	COD	20 - 1500	435
Chroma Ver 3	Cromo(Cr 6+)	0.01 – 0.700	90
FerroVer	Hierro	0.0 – 3.0	265
Ftalato - Fosfato	Níquel	0.006 – 1.000	340
	Cobalto	0.01 – 2.00	110
PAN solución 0.3%	Níquel	0.006 – 1.000	340
	Cobalto	0.01 – 2.00	110
EDTA	Ni / Co		

Fuente: Los autores -2022

Tabla 8. Unidades de trabajo de campo

Cantidad	Equipo / Unidad	Uso
1	Fuente de energía.	Abastecimiento eléctrico general del sistema
1	Reactor discontinuo.	Evolución de ensayos.
1	Bomba manual para muestras	Extracción y agitación de muestra en RD.
1	Multímetro digital DT 9208A	Medición de Variables de operación.
1	Pinza amperométrica HP-870C	Medición de Variables de operación.
10	Láminas de hierro negro	Electrodos (ánodos de sacrificio; cátodos)
1	Espectrofotómetro	Análisis de parámetros: muestras.
1	Digestor. Spectroquant <sup>®</sup>	Digiere reactivo para determinación de DQO.
5	Pipetas 10 ml	Análisis de muestras.
100	Frascos de 120 ml.	Toma de muestras.
5	Vasos de precipitación 0.25 L	Toma de muestras.

Fuente: Los autores -2022

### 3.4. Metodología

La experimentación se fundamentó en los principios de oxidación electroquímica aplicando la reacción electrolítica de oxidación directa por la cual se realizó la depuración de los contaminantes refractarios presentes en un efluente textil industrial con el propósito de disminuir el color, turbiedad, DQO, metales, suspendidos, para lo cual se midieron las concentraciones de los mismos antes y después del tratamiento con el fin de determinar el porcentaje de remoción de cada uno de los parámetros evaluados (Gilpavas, 2008).

Para el estudio por oxidación electroquímica se utilizó reactor discontinuo cilíndrico de vidrio refractario con capacidad de 0.865 litros tipo batch (figura 1), empleando electrodos de placas planas de hierro con medidas de 8 cm x 5 cm y 0,18 cm de espesor, un área efectiva de reacción total del hierro activo es de  $A_a=40,83 \text{ cm}^2$ . La Celda para electro oxidación, con las siguientes características en 3 series 3 paralelos; en 2 series 2 paralelo y en 2 series, la separación entre electrodos de 6 mm, 12 mm y 18 mm respectivamente y se conectaron a una fuente de energía, DC Power supply 3005B (0 – 20 A/ 0 - 30 V) marca Protek, la corriente directa variable accionada por un potenciómetro con diferentes valores de amperaje.

Espectrofotómetro. Marca HACH; modelo DR 2010. Tiene cuatro celdillas de cristal para los análisis, y un adaptador plástico para medir los reactivos de DQO. Fuente de poder y cables de conexión a la red de energía eléctrica.

Bomba manual para muestras. Está conformada con materiales inertes para que no influyan

en el resultado al extraer las muestras parciales desde el seno del reactor discontinuo. Cuenta con un volumen de traslado de 10 mm, por cada vez que se acciona Digestor. Spectroquant ® Marca MERCK; modelo T320. Digiere el reactivo para la determinación de DQO (solución de digestión COD HR). Multímetro digital (Modelo DT9208A). Permite realizar la valoración en tiempo real de las variables de operación, tal como la tensión, temperatura, resistencia, entre otros. Un sistema de desagüe para la recolección de la espuma y flóculos, formados por la desestabilización de las partículas coloidales.

Se procedió a realizar experimentos preliminares bajo el criterio de selección, analizando el comportamiento de las variables fisicoquímicas en el medio acuoso, registrando los resultados para determinar los valores de corriente eléctrica, tiempo de tratamiento, pH óptimos. Habiendo seleccionado las condiciones del arreglo del reactor electroquímico, según la tabla 2, Con cada arreglo en el reactor electroquímico tipo bach con un reservorio en forma de cilíndrica de un volumen neto 0.865 litro con derivación lateral de vidrio transparente refractario. Se realizaron los ensayos por triplicado. Para cada ensayo se colocó en el reactor 0,7 litros de agua residual industrial con una coloración rojo intenso, debido a los colorantes utilizados en esa industria al momento de toma de muestra. La operación se desarrolló a temperatura ambiente (25°C) con agitación constante y pH 11 correspondiente a la muestra.

La densidad de corriente fue de 15 voltios y 28,86 amperios. A los 120 seg se evidenció la evolución de la reacción cambiando la coloración del agua, y se extrajeron 50 ml del agua procesada para análisis de eficiencias de remoción de la carga contaminante: color, turbidez, DQO. En la Tabla 3 se muestran los resultados experimentales (por triplicado) con las muestras A, B y C, referente a las tres acomodaciones del reactor.

Tabla 9. Elementos de las celdas electrolíticas

Elemento	Material	Área (cm <sup>2</sup> )	Función
Lámina metálica	Hierro	40.83	Electrodos (ánodo; cátodo; bipolar)
Conector	Cobre	4.13	Terminal de conexión a la fuente de energía
Soporte	Polycarbonato		Separador/distanciador

Fuente: Los autores -2022

### 3.5. Pruebas de campo

El desarrollo de la investigación ha sido enteramente práctico, y para la consecución de los resultados hubo que implementar algunos procedimientos de trabajo especiales. Al ser escasas las referencias literarias respecto al desarrollo de este tipo de experiencias, no se cuenta en realidad con una guía o patrón específico de referencia al cual atenerse, dando por lo tanto un amplio margen de acción para la creación de técnicas propias a fin de obtener los resultados buscados.

Otro factor que se consideró al momento de desarrollar dichos procedimientos empíricos, es la naturaleza de los equipos e instrumentos usados, tanto para aplicar los tratamientos, así como para realizar los análisis con los que se puede verificar la variación en los parámetros de referencia. Los ensayos se orientan a obtener la mayor eficiencia en las reacciones (mayor velocidad de reacción), considerando siempre las condiciones óptimas, mecánicas y de operación, de los materiales usados en los ánodos estudiados.

Debido a los impedimentos obvios tanto en lo referente a la disponibilidad de muestra cruda (objeto de estudio), como en la capacidad física (volumen útil) de las unidades empleadas, la configuración y/o arreglos posibles de las celdas electrolíticas para realizar las pruebas se ven seriamente limitadas, es así que para trabajar con una separación de celda de 0.6 cm, únicamente puede trabajarse con los arreglos:

Tabla 10. Elementos de las celdas electrolíticas

Tipo	N° de láminas	N° DE CELDAS/ ARREGLO			Tensión de celda	Referencia
		Serie	Paralelo	Área de trabajo	V (DC)	
Monopolar	10	//	9	40,83 (x9)	V total /1	
Bipolar	10	9	//	40,83 (x1)	V total /9	
Bipolar	10	3	3	40,83 (x3)	V total /3	
Bipolar	9	4	2	40,83 (x2)	V total /4	
Bipolar	9	2	4	40,83 (x4)	V total /2	

Fuente: Los autores -2022

Tabla 11. Configuraciones posibles de electrodos, con separación de 12 mm (1,2 cm)

Tipo	N° de láminas	N° DE CELDAS/ ARREGLO			Tensión de celda	Referencia
		Serie	Paralelo	Área de trabajo	V (DC)	
Monopolar	5	//	4	40,83 (x4)	V total /1	
Bipolar	5	4	//	40,83 (x1)	V total /4	
Bipolar	5	2	2	40,83 (x2)	V total /2	
Bipolar	4	3	//	40,83 (x1)	V total /3	

Fuente: Los autores -2022

Siguiendo con la mecánica anterior, para trabajar con una separación de 1.8 cm, sólo será posible un tipo de arreglo, siendo este de dos celdas en serie.

Aclaración 1.- Los casos donde se anotan los arreglos monoplares, en la práctica no se han considerado como parte del plan de pruebas final, ya que debido a las características de la fuente de energía empleada (tensión de trabajo) no aplica, físicamente no es viable ya que

al tener un rango de tensión superior al recomendado para un funcionamiento adecuado del material seleccionado como aportante en este pudiese producirse una pasivación forzada de dicho material, inhibiendo el paso de corriente a través del sistema por lo que no se darían las reacciones requeridas para el estudio aquí planteado.

### 3.6. Plan de ensayos de tratabilidad

Tabla 12. Ensayos de tratabilidad: Cronograma

Nomenclatura		Configuración	Separación
Preliminar 1		4 serie	separación 12 mm
Preliminar 2		3 serie	separación 12 mm
Preliminar 3		3 serie – 3 paralelo	separación 6 mm
Preliminar 4		4 serie - 2 paralelo	separación 6 mm
Preliminar 5		2 serie - 4 paralelo	separación 6 mm
Preliminar 2		2 serie - 2 paralelo	separación 12 mm
Preliminar 7		2 serie	separación 24 mm
Final A	A 1	3 serie – 3 paralelo	separación 6 mm
	A 2	3 serie – 3 paralelo	separación 6 mm
	A 3	3 serie – 3 paralelo	separación 6 mm
Final B	B 1	2 serie - 2 paralelo	separación 12 mm
	B 2	2 serie - 2 paralelo	separación 12 mm
	B 3	2 serie - 2 paralelo	separación 12 mm
Final C	C 1	2 serie	separación 24 mm
	C 2	2 serie	separación 24 mm
	C 3	2 serie	separación 24 mm

Fuente: Los autores -2022

La planificación comprende las siguientes etapas:

**1.- Primera etapa / Fase preliminar.** Ensayos de tratabilidad y/o calibración. En el reactor discontinuo, con un volumen constante de muestra, se le aplica el tratamiento electroquímico (electrocoagulación). Estas pruebas son necesarias para determinar la facilidad para tratar el efluente y así poder evaluar su comportamiento con respecto al tratamiento (técnicas y procedimientos). También se evalúa de forma cuantitativa los parámetros de control a la vez que se estudia la evolución de los ensayos frente al tiempo de duración de la prueba. Son pruebas donde se realizan los cambios necesarios para una mejor comprensión de la experiencia práctica, probando las alternativas y variaciones que se consideren necesarias tales como por ejemplo la separación entre electrodos, el tiempo de tratamiento, las tensiones (voltajes) e intensidades (amperaje), material de la celda, entre otras posibles.

**2.- Segunda etapa / Fase final.** Ensayos finales. Ya definidos los rangos efectivos de operación de las variables, en la etapa anterior, se efectúan los últimos ensayos, y se realiza

una caracterización más amplia de las muestras sometidas al tratamiento. Obteniendo más elementos de juicio para la evaluación de la eficiencia –práctica- en la remoción de los parámetros (variables) de control y el análisis costos.

La diferencia principal con la etapa anterior, radica en la forma de evaluar ya que a más de ser cualitativa la evolución del ensayo experimental, se pondera los resultados por medio de análisis a los diferentes parámetros. Se cuantifica la potencia requerida y los cambios que se suceden. En esta fase los ensayos son realizados por triplicado como base para la comparación estadística de los resultados, en la figura siguiente se puede visualizar dicha metodología:

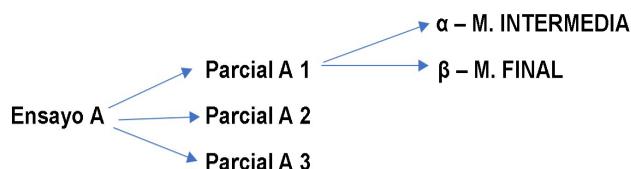


Figura 3. Descripción de la metodología de los ensayos de la fase final

Fuente: Los autores -2022

### 3.7. Procedimientos de operación

En la aplicación de la técnica estudiada (electrólisis) a una determinada muestra de agua, no existe mayor complicación, ya que es relativamente sencilla de implementar y manejar, una vez se definen y calibran los parámetros de operación óptimos en cada caso particular. Pudiendo percibirse la versatilidad de los procesos electroquímicos en el tratamiento de aguas, debido a que cuenta con un amplio rango funcional.

Los procedimientos aplicados para el desarrollo de los ensayos se detallan a continuación:

#### 3.7.1. Toma de la muestra (agua cruda)

Las muestras sujetas a estudio se tomaron en el punto de descarga a la planta de tratamiento ubicado dentro de las instalaciones de la empresa. La muestra captada no cuenta con ningún tipo de tratamiento previo. Cada muestra tiene un volumen aproximado de 20 litros, teniendo un volumen final de muestra de 40 litros aproximadamente.

Se toma una alícuota representativa de la muestra a estudiar. Para este caso de seiscientos mililitros (0.6 L) que equivale al 10 % del volumen total.

Depositarse la alícuota separada dentro del reactor discontinuo, donde se realizarán los ensayos experimentales.

### 3.7.2. Calibración de la fuente de energía

Siendo la finalidad de este paso la comprobación de la tensión de trabajo, previo a la operación de la unidad. Para esto los electrodos pueden estar, o no, conectados a la fuente de alimentación, pero definitivamente no sumergidos en la muestra a tratar, a esto se conoce como, prueba en vacío.

- a. Conectar la fuente de energía a la red de abastecimiento eléctrico apropiada (120 VAC). Esta debe tener el interruptor de arranque o puesta en funcionamiento en la posición de apagado.
- b. Verificar que los cables conectores, que se acoplan a las celdas de estudio, se encuentre separados entre sí. Con la finalidad expresa de evitar cortos circuitos en el sistema.
- c. Activar el interruptor de encendido de la fuente para iniciar la calibración del parámetro (verificar la tensión).
- d. Observar con atención en el indicador de tensión (voltímetro), se fija el rango deseado para el ensayo.
- e. Con la tensión ya establecida, se apaga la unidad, para poder realizar la conexión del electrodo con el que se realizará el ensayo.

### 3.7.3. Procedimiento universal para el desarrollo de los ensayos en las diferentes etapas.

- a. Definir los puntos en donde se captarán las muestras para la realización de las pruebas o ensayos.
- b. Delinear el programa de pruebas a realizar y sus posibles variantes.
- c. Caracterizar la muestra inicial. Determinar los parámetros referenciales iniciales: pH, conductividad, turbidez, color, etc.
- d. Introducir la muestra a estudiar –alícuota- en el reactor discontinuo.
- e. Introducir el electrodo (celda electrolítica) con la configuración deseada en el reactor discontinuo. Previamente ajustado el parámetro de tensión de operación.
- f. Accionar el interruptor de la fuente de energía; I/O.
- g. De acuerdo con el programa de pruebas realizar las variaciones recomendadas (literal b).
- h. Realizar el levantamiento de información (datos). Anotar en tabla.
- i. Una vez concluida la prueba, apagar la fuente de energía.
- j. Desconectar y retirar los electrodos. Enjuagar.
- k. Caracterizar la muestra final. Determinar los parámetros referenciales finales: conductividad, pH, turbidez, etc.
- l. Evaluar las observaciones realizadas y los resultados.

### 3.7.4. Procedimientos de análisis de parámetros.

La caracterización de los parámetros de control se realiza a través de instrumentos y/o equipos específicos, por lo que debe aplicarse una técnica diferente en cada caso. Por ejemplo,

para la valoración de los parámetros anotados en la tabla 3, se procede de acuerdo a las técnicas proporcionadas por el fabricante (de la marca HACH) y que se encuentran recopiladas en su “Manual de Análisis de Agua”, disponible de manera gratuita en formato digital en la red. Para medir los demás parámetros se lo realiza de manera más o menos intuitiva, siguiendo criterios prácticos.

### 3.8. Gestión de datos

La totalidad de los ensayos se dividen según las etapas descritas anteriormente, se realizaron dieciséis ensayos válidos. La cantidad de ensayos considerados válidos en cada etapa se detalla a continuación:

Tabla 13. Ensayos experimentales

Etapa	Fase	Tipo de ensayo	Cantidad
1	Preliminar	Tratabilidad	7
2	Final	Definitivo	9

Fuente: Los autores -2022

Teniendo la calidad de ensayo válido, a aquellos a los que se les practicó algún tipo de análisis o determinación, y principalmente valorando los parámetros físico-químicos.

La recopilación de datos obtenidos a partir de las experiencias realizadas, está ordenada de manera cronológica, por orden numérico ascendente para una mejor comprensión de la evolución del tratamiento. Considerando el orden de las etapas programadas, es decir, ensayos de tratabilidad, ensayos preliminares de calibración y ensayos definitivos.





## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**



## 4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 4.1. Criterios de la investigación

Los procedimientos analíticos empleados para la valoración de los parámetros de control en el presente trabajo de investigación fueron realizados mediante los procedimientos del “Standard Methods for Examination of Water”. Edición 23

### 4.2. Levantamiento de información de campo. Fase preliminar.

#### 4.2.1. Procedimiento operativo general de ensayos.

En la realización los ensayos de esta fase se aplicó el siguiente procedimiento general previo a la obtención de las muestras para los análisis de los parámetros de control.

**Calibración y/o ajuste de la fuente de energía.** Comprobación de la tensión de trabajo (en vacío) que en adelante será la referencia para realizar los cálculos de la potencia y es la que se anotará en la tabla de datos.

**Configuración de la celda electrolítica.** Esto se refiere a la construcción y/o montaje de las láminas metálicas (electrodos de hierro) de acuerdo al plan de ensayos general.

**Toma de alícuota para tratamiento.** Previamente a la toma del volumen requerido debe agitarse la muestra para obtener una buena homogenización en el seno de la solución, luego se separa el volumen requerido (0.7 L) para la realización del ensayo.

**Configuración final del sistema completo.** Se introduce el volumen de muestra previamente separado (y homogenizado) dentro del reactor discontinuo, paso seguido se introduce la celda electrolítica dentro del reactor. Para realizar este paso la fuente de energía debe estar desactivada (stand by).

**Instalación de los dispositivos de medición.** A fin de obtener la mayor cantidad de datos experimentales, deben conectarse en diferentes puntos del circuito eléctrico los dispositivos que medirán las variables de operación durante el desarrollo de los ensayos. Estos datos servirán luego para la valoración económica de las pruebas.

**Verificación del control de tiempo.** Cronómetro a cero.

**Activación de fuente de energía.** Marca el inicio del ensayo, se activa el cronómetro y se realizan acciones para mantener en movimiento (agitación manual) el seno de la disolución con la bomba manual.

**Toma de muestras parciales.** Se tomarán tantas muestras como el desarrollo de la prueba

lo permita tanto por el tiempo de tratamiento aplicado, así como por el volumen requerido para cada muestra parcial. Los datos de las variables de operación serán anotados para ser analizados luego.

**Final del ensayo.** De manera simultánea se realizarán varias acciones a fin de terminar con la parte experimental del ensayo, de esta manera:

Se realiza la anotación de los valores de las variables de operación final.

Se desactiva la fuente de energía logrando de esta manera que la reacción se detenga.

Se separa el volumen de la muestra final para su evaluación.

**Preparación de la muestra final.** El volumen de muestra previo a su análisis será filtrado, el recipiente que lo contiene debe estar rotulado de forma apropiada, por ejemplo:

Preliminar 1,  $\alpha$ ; Preliminar 1,  $\beta$ ; ...

**Limpieza y mantenimiento del sistema.** Se desmonta la celda electrolítica, se desconecta la celda de la fuente de energía, se retira la bomba manual y el reactor. Todos los elementos que intervienen en el ensayo serán lavados o limpiados de manera adecuada para su posterior uso.

**Análisis de campo de las muestras obtenidas.** Se efectuarán los procedimientos individuales requeridos por los instrumentos para realizar el análisis de cada parámetro de control considerado.

**Levantamiento de información.** Se anotan los resultados obtenidos en las tablas respectivas para su posterior análisis matemático, de igual manera se anotan las observaciones.

**Conclusiones teóricas.** Se tabulan los resultados y se definen las conclusiones finales del ensayo.

### 4.3. Resultados

#### 4.3.1. Etapa experimental. Fase Preliminar.

Para esta fase el objetivo inmediato era la verificación del comportamiento de la muestra sometida a la influencia del tratamiento electroquímico propuesto (electrólisis/electrocoagulación) respecto al cambio de configuración (arreglo) físico de las celdas electrolíticas (electrodos). Al final se realizaron siete (7) ensayos válidos (tabla 10) donde se pudo evaluar de manera cualitativa y cuantitativa la evolución de dichos experimentos respecto los cambios en las variables de operación. Así se llegó a obtener los datos anotados en la siguiente tabla:

Tabla 14. Fase preliminar. Eficiencia de remoción

Ensayo Preliminar	Tiempo	Temperatura	Tensión	Intensidad	EFICIENCIA (%)			
	(s)	(°C)	(V DC)	(A DC)	Color	Turbiedad	pH	Cromo (Cr <sup>6+</sup> )
1	570	36	15,00	4,20	82,88	82,00	pHf > pHi	94,90
2	390	33	15,00	5,00	63,82	96,63	pHf > pHi	96,91
3	120	40	15,20	22,80	65,93	94,38	pHf > pHi	97,62
4	180	40	15,44	16,00	67,55	84,27	pHf > pHi	97,82
5	90	42	15,44	52,40	60,04	89,89	pHf > pHi	97,23
6	120	37	15,48	27,20	72,50	95,51	pHf > pHi	98,22
7	240	37	15,00	9,70	60,90	85,36	pHf > pHi	97,33

Fuente: Los autores -2022

Al final se evidencia que la variación de las configuraciones evaluadas en un mismo tipo de muestra, dan resultados diferentes en las variables de operación más no tanto así en las eficiencias de remoción de los contaminantes presentes. Al variar las configuraciones en las celdas de trabajo, lo que se consigue es que la tensión de operación neta en el trabajo varíe y con ello también las otras variables de operación, ya que están estrechamente relacionadas entre sí.

Así al incrementarse la tensión (de celda) manteniendo la separación entre electrodos y el tiempo de tratamiento constantes, la intensidad de corriente aumentará, lo que a su vez redundará en un incremento en la temperatura (del sistema), lo que a su vez cataliza las reacciones que se están llevando a efecto en el seno de la disolución. De esta manera se puede explicar de manera muy general por qué razón se obtienen diferentes resultados, aunque se trabajó con una tensión de fuente (en vacío) constante.

A partir del análisis de los datos expresados en las tabla (14 y 15) y empleando los criterios de selección (eficiencia vs. costos), se determinó que los mejores resultados son los que se obtuvieron en los ensayos preliminares 3, 6 y 7. Por lo que para la etapa final se replicarán por triplicado dichos ensayos a fin de optimizar los resultados.

Aunque las eficiencias de remoción son un factor determinante a la hora de realizar la selección de las pruebas que se replicarán en la fase final del presente estudio, no es el único. Otro criterio aplicado para poder decidir la selección definitiva de cual ensayo es mejor que otro, es el análisis económico, es decir la comparación de los costos de operación respecto a las eficiencias de remoción obtenidas. En la siguiente tabla se exponen los costos generados en cada ensayo de la presente fase de estudio;

Tabla 15. Fase preliminar. Costos de operación

Ensayo Preliminar	Potencia			Gasto de Electrodo			Costo Final
	VA	KvA/m <sup>3</sup>	USD/m <sup>3</sup>	g	kg/m <sup>3</sup>	USD/m <sup>3</sup>	USD/m <sup>3</sup>
1	9,98	14,25	1,43	2,77	3,96	3,96	5,38
2	8,13	11,61	1,16	1,69	2,42	2,42	3,58
3	11,55	16,50	1,65	2,38	3,39	3,39	5,04
4	12,35	17,65	1,76	3,33	4,76	4,76	6,53
5	20,23	28,89	2,89	2,73	3,90	3,90	6,79
6	14,04	20,05	2,01	1,89	2,70	2,70	4,70
7	9,00	12,86	1,29	1,25	1,79	1,79	3,07

Fuente: Los autores -2022

#### 4.3.2. Gráficos de ensayos primera etapa fase preliminares

Tabla 16. Ensayo preliminar 1

Ensayo	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tensión (V DC)	Intensidad (A DC)	Eficiencia (%)			
					Color	Turbiedad	pH	Cromo (Cr <sup>6+</sup> )
Preliminar 1	570	36	15	4,2	82,88	82,00		94,90

Fuente: Los autores -2022

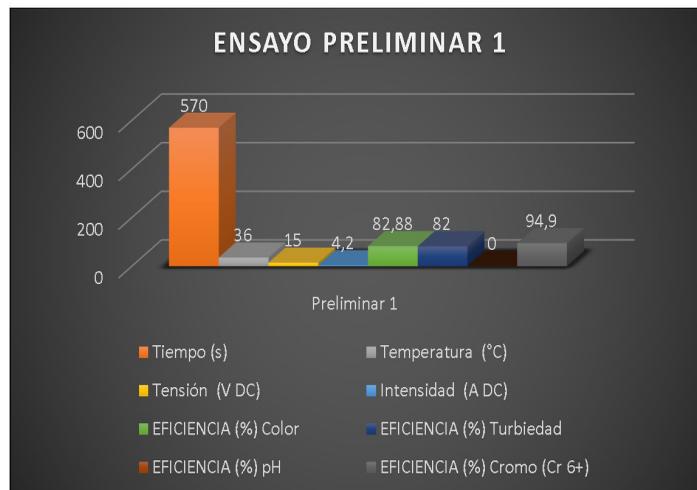


Figura 4. Ensayo preliminar 1

Fuente: Los autores -2022

Tabla 17. Ensayo preliminar 2

Ensayo	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tensión (V DC)	Intensidad (A DC)	Eficiencia (%)			
					Color	Turbiedad	pH	Cromo (Cr <sup>6+</sup> )
Preliminar 2	390	33	15	5	63,82	96,63		96,91

Fuente: Los autores -2022

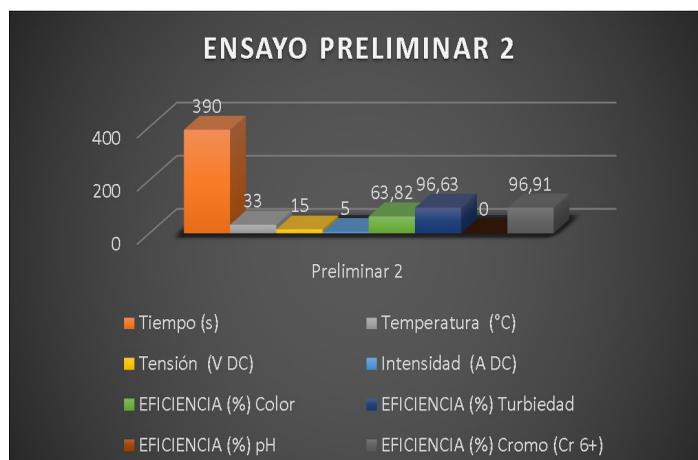


Figura 4. Ensayo preliminar 2

Fuente: Los autores -2022

Tabla 18. Ensayo preliminar 3

Ensayo	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tensión (V DC)	Intensidad (A DC)	Eficiencia (%)			
					Color	Turbiedad	pH	Cromo (Cr <sup>6+</sup> )
Preliminar 3	120	40	15,2	22,8	63,82	96,63	pHf > pHi	96,91

Fuente: Los autores -2022

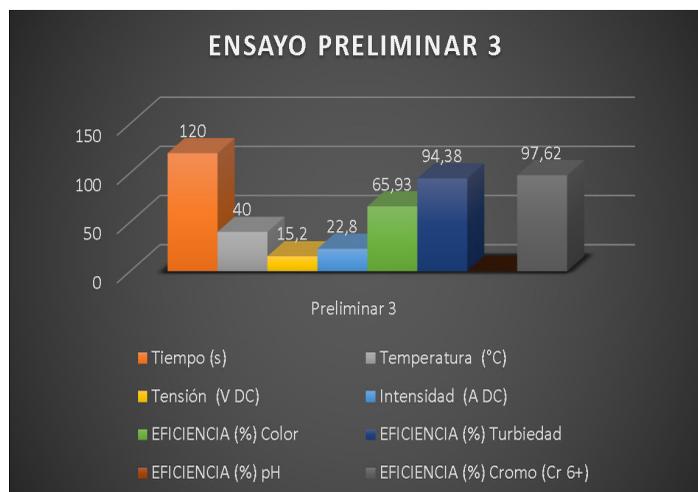


Figura 5. Ensayo preliminar 3

Fuente: Los autores -2022

Tabla 19. Ensayo preliminar 4

Ensayo	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tensión (V DC)	Intensidad (A DC)	Eficiencia (%)			
					Color	Turbiedad	pH	Cromo (Cr <sup>6+</sup> )
Preliminar 4	180	40	15,44	16	67,55	84,27		97,82

Fuente: Los autores -2022

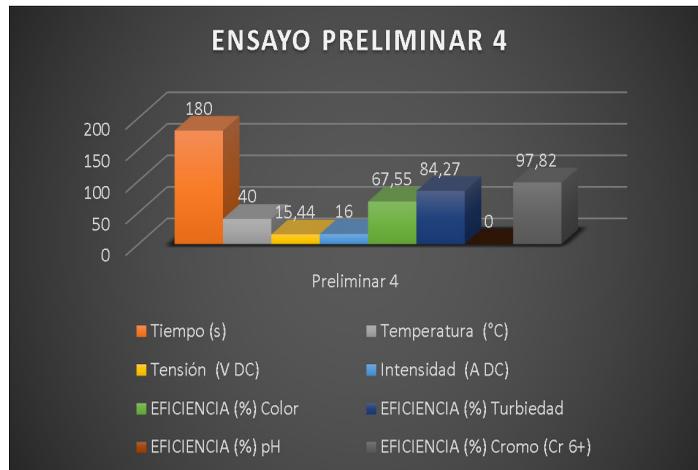


Figura 6. Ensayo preliminar 4

Fuente: Los autores -2022

Tabla 20. Ensayo preliminar 5

Ensayo	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tensión (V DC)	Intensidad (A DC)	Eficiencia (%)			
					Color	Turbiedad	pH	Cromo (Cr <sup>6+</sup> )
Preliminar 5	90	42	15,44	52,4	60,04	89,89	pH <sub>f</sub> > pH <sub>i</sub>	97,23

Fuente: Los autores -2022

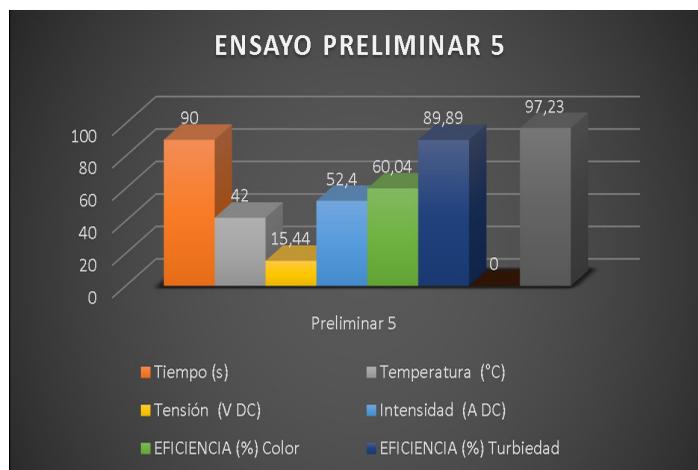


Figura 7. Ensayo preliminar 5

Fuente: Los autores -2022

Tabla 21. Ensayo preliminar 6

Ensayo	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tensión (V DC)	Intensidad (A DC)	Eficiencia (%)			
					Color	Turbiedad	pH	Cromo (Cr <sup>6+</sup> )
Preliminar 6	120	37	15,48	27,2	72,5	95,51		97,82

Fuente: Los autores -2022

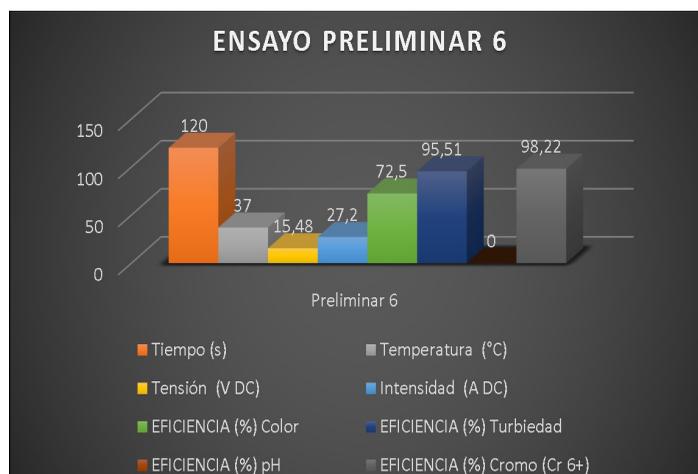


Figura 8. Ensayo preliminar 6

Fuente: Los autores -2022

Tabla 22. Ensayo preliminar 7

Ensayo	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tensión (V DC)	Intensidad (A DC)	Eficiencia (%)			
					Color	Turbiedad	pH	Cromo (Cr <sup>6+</sup> )
Preliminar 7	240	37	15	9,7	60,9	85,36		97,33

Fuente: Los autores -2022

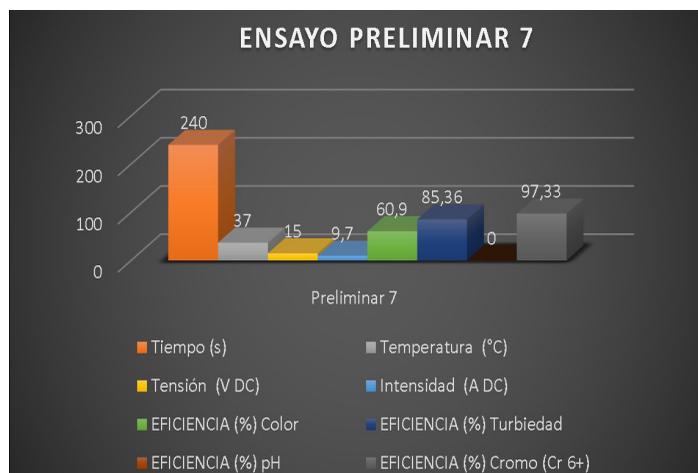


Figura 9. Ensayo preliminar 7

Fuente: Los autores -2022

### 4.3.3. Primera etapa fase preliminar – Comparativo por parámetro ensayo vs eficiencia de remoción

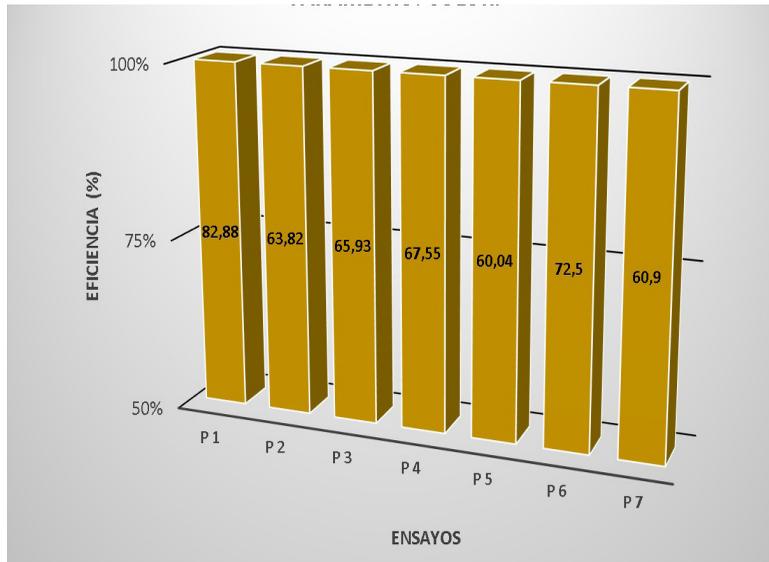


Figura 10. *Parámetro de color*  
Fuente: Los autores -2022

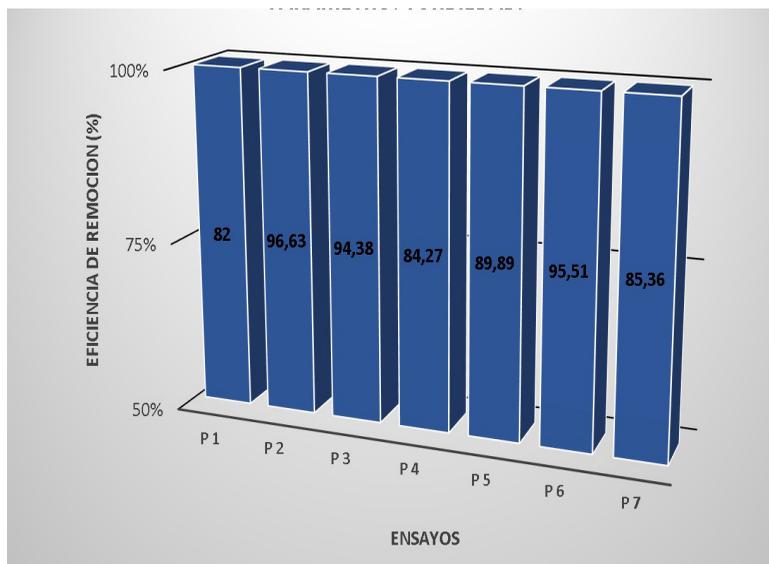


Figura 10. *Parámetro de turbiedad*  
Fuente: Los autores -2022

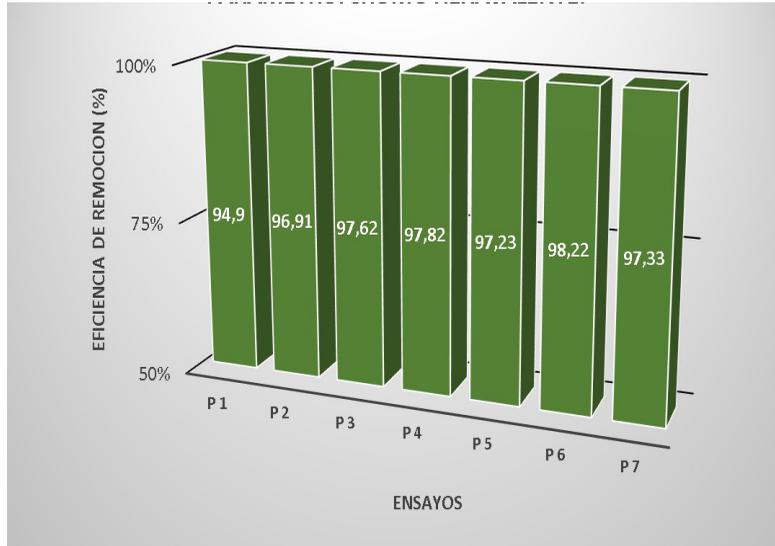


Figura 11. *Parámetro de cromo hexavalente*  
Fuente: Los autores -2022

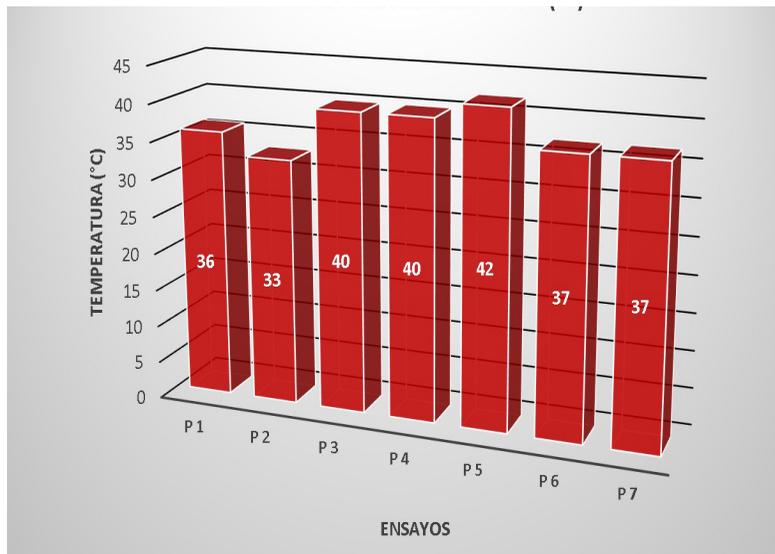


Figura 12. *Parámetro de temperatura final*  
Fuente: Los autores -2022

#### 4.3.4. Levantamiento de información de campo. Fase Final

Siguiendo con el plan de ensayos de campo (hoja de ruta) y alentados por la evolución positiva de los ensayos realizados en la etapa anterior, se seleccionaron los tres ensayos que a nuestro criterio dan una mejor perspectiva de solución al problema original planteado. Siendo los siguientes:

Tabla 23. Ensayos con mejores resultados

Ensayo	Arreglo	Separación	Costo
Preliminar 3	3 serie – 3 paralelo	6 mm	5.04 USD/m <sup>3</sup>
Preliminar 6	2 serie – 2 paralelo	12 mm	4.70 USD/m <sup>3</sup>
Preliminar 7	2 serie	18 mm	3.31 USD/m <sup>3</sup>

Fuente: Los autores -2022

#### 4.3.5. Procedimiento operativo general de ensayos

Los procedimientos aplicados en esta fase definitiva no difieren en nada a los desarrollados en la anterior, es decir, que se operan los pasos a seguir de manera semejante a lo trabajado en la fase preliminar, se trata de reproducir las características de cada ensayo con el fin de replicar (o mejorar) los resultados obtenidos en dichos experimentos.

#### 4.3.6. Etapa experimental. Fase Final

En la tabla 24 se anotan los resultados obtenidos en los ensayos de la fase final en lo referente a las eficiencias de remoción de la carga contaminante. Al haberse realizado las comprobaciones por triplicado se logra tener una visión clara de los logros alcanzados, los resultados si bien es cierto no se corresponden en su totalidad, no menos cierto es también que son muy similares entre sí, obteniéndose notables mejorías respecto a los resultados de la fase preliminar.

Tabla 24. Ensayos con mejores resultados

Ensayo Final	EFICIENCIA (%)									T (°C)
	Color	Turbiedad	Cromo (Cr <sup>6+</sup> )	pH	Hierro	DQO	Níquel	Cobalto		
A	1	75,92	96,63	98,66	pHf > pHi	90,85	61,01	> 98	67,27	38
	2	85,26	98,89	100,00	pHf > pHi	96,34	71,72	> 98	91,67	42
	3	94,85	100,00	100,00	pHf > pHi	98,78	77,12	> 98	91,81	40
B	1	66,38	93,26	98,66	pHf > pHi	96,34	67,27	> 98	100,00	38
	2	85,36	93,26	100,00	pHf > pHi	96,95	71,12	> 98	83,64	43
	3	92,12	94,38	100,00	pHf > pHi	96,95	76,29	> 98	91,82	36
C	1	55,85	93,26	98,91	pHf > pHi	91,46	62,13	> 98	100,00	47
	2	57,25	89,89	97,82	pHf > pHi	91,46	61,52	> 98	100,00	38
	3	36,46	97,75	98,91	pHf > pHi	97,56	59,81	> 98	100,00	39

Fuente: Los autores -2022

Debe observarse que en donde existe una eficiencia del 100 %, la realidad nos dice que no necesariamente se ha obtenido una mineralización completa de dicho contaminante. La interpretación más adecuada o justa sería que para el factor de dilución empleado la medición nos da ese resultado, siendo probable que al disminuir dicho factor (o al eliminarlo por completo) se pueda obtener alguna lectura con los instrumentos de medición. Para cualquier caso, los resultados obtenidos en esta fase lograron estar dentro delo requerido por la normativa legal vigente.

Para complementar la eficiencia de los resultados en esta etapa final, se presentan en la Tabla 25 los resultados generados a partir de los datos experimentales luego de haber realizado el tratamiento matemático apropiado. Aunque los costos son coherentes con los ensayos que dieron origen en la fase preliminar se aprecia un leve mejoría en ellos, principalmente en los ensayos que corresponde a la variación C. Así tenemos que:

Tabla 25. Fase Final. Costos de operación

Ensayo Final	Tiempo (s)	Tensión (V DC)	Intensidad (A DC)	Potencia			Gasto de Electrodo			Costo Final	
				VA	KvA/m3	USD/m3	g	kg/m3	USD/m3	USD/m3	
A	1	120	15,38	25,50	13,07	18,68	1,87	2,66	3,80	3,80	5,66
	2	120	15,20	35,00	17,73	25,33	2,53	3,65	5,21	5,21	7,74
	3	120	15,30	34,40	17,54	25,06	2,51	3,58	5,12	5,12	7,63
B	1	120	15,49	24,40	12,60	18,00	1,80	1,69	2,42	2,42	4,22
	2	120	15,20	27,60	13,98	19,98	2,00	1,92	2,74	2,74	4,74
	3	120	15,16	28,60	14,45	20,65	2,06	1,99	2,84	2,84	4,90
C	1	240	15,16	7,50	7,58	10,83	1,08	1,04	1,49	1,49	2,57
	2	240	15,30	7,60	7,75	11,07	1,11	1,06	1,51	1,51	2,62
	3	240	15,51	8,50	8,79	12,56	1,26	1,18	1,69	1,69	2,94

Fuente: Los autores -2022

Es importante señalar que de estos últimos ensayos se tomaron muestras de cada una para su posterior caracterización final en el Laboratorio de Aguas Residuales con el que cuenta la Facultad de Ingeniería Química en la Universidad de Guayaquil, con la finalidad expresa de obtener resultados validados por un ente autorizado (acreditado), los resultados de dichas muestras se describen a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 26. Fase Final. Eficiencia de remoción

Ensayo	pH	COLOR	TURBIEDAD	DQO	SST	EFICIENCIA (%)			
	U. pH	Pt/Co	NTU	mg/L	mg/L	COLOR	TURBIEDAD	DQO	SST
INICIAL	10,77	38800	55,50	1167	160	-	-	-	-
FINAL A	11,34	319	4,31	342	20	99,18	92,23	70,69	87,50
FINAL B	11,1	238	2,83	338	36	99,39	94,90	71,04	77,50
FINAL C	10,99	624	2,53	410	30	98,39	95,44	64,87	81,25

Fuente: Laboratorio de aguas. Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Guayaquil

Respecto a la tabla 26, se puede concluir que el ensayo que mejor respondió a las expectativas iniciales corresponde a la muestra obtenida del ensayo B de esta fase final, aunque esta tiene insertidumbre, ya que las otras pruebas también dieron resultados satisfactorios y semejantes. El factor determinante en la decisión es definitivamente los costos de operación generados y el tiempo de tratamiento efectivo, la muestra del ensayo C presenta unos costos inferiores a los de la muestra B (aproximadamente 40% menor), la realidad es que el tiempo de tratamiento es el doble, lo que claramente influye en el tamaño de las unidades finales y los costos de operación, ya que con las variables de operación (costos) manejados en los ensayos B se consigue tratar el doble de volumen de efluente industrial por unidad de tiempo que en el otro ensayo.

Por lo tanto, al definir como la muestra más eficiente a la obtenida por los ensayos B, a dicha muestra se le aplicó un proceso adicional (filtración con carbón activado) y se le realizó una última caracterización. A continuación, se anotan los resultados obtenidos.

Tabla 27. Fase Final. Ensayo B + Carbón Activado

Parámetro	Unidad	Resultado
pH	U. de pH	9,38
Color	Pt/Co	35
Turbiedad	NTU	5,75
DQO	mg/L	210
Hierro	mg/L	0,03
Cromo 6+	mg/L	0,009
Cobre	mg/L	0,09
Níquel	mg/L	0,001
Fenol	N.D.	-0,022
Det.	N.D.	0,2

Fuente: Laboratorio de aguas. Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Guayaquil



Figura 13. *Ensayo A, B, C y B+Carbón Activado*  
Fuente: Los autores -2022

#### 4.3.7. Primera etapa fase preliminar costos de operación



Figura 14. *Costos de operación USD/m³*  
Fuente: Los autores -2022

### 4.3.8. Segunda etapa / Fase final. Comparativo por parámetro. Ensayo vs. Eficiencia de remoción

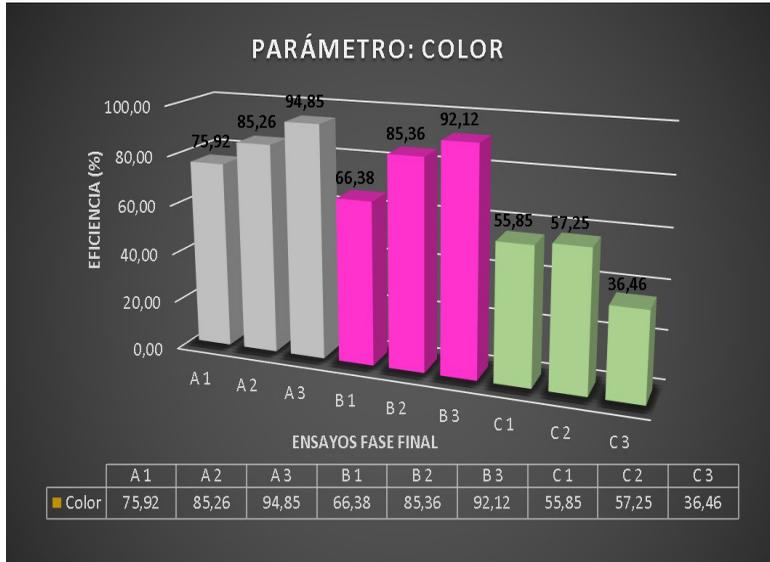


Figura 15. *Parámetro de Color*  
Fuente: Los autores -2022

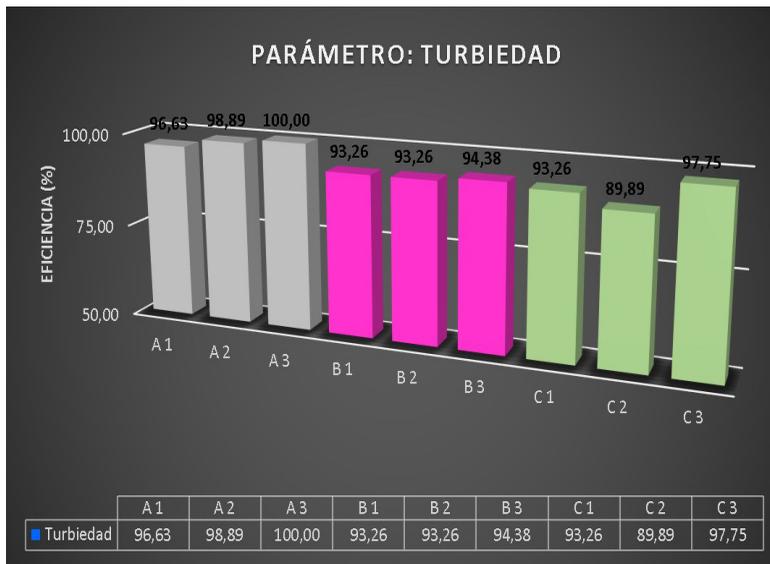


Figura 16. *Parámetro de Turbiedad*  
Fuente: Los autores -2022

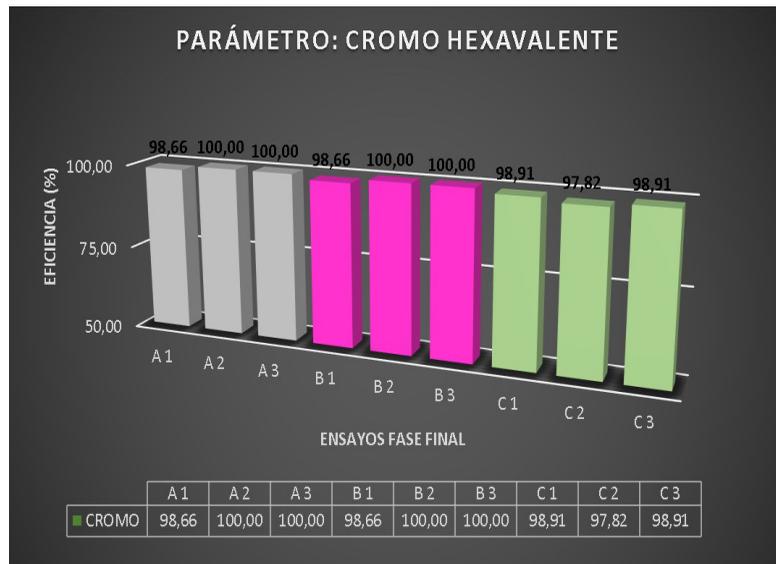


Figura 17. *Parámetro de cromo hexavalente*

Fuente: Los autores -2022

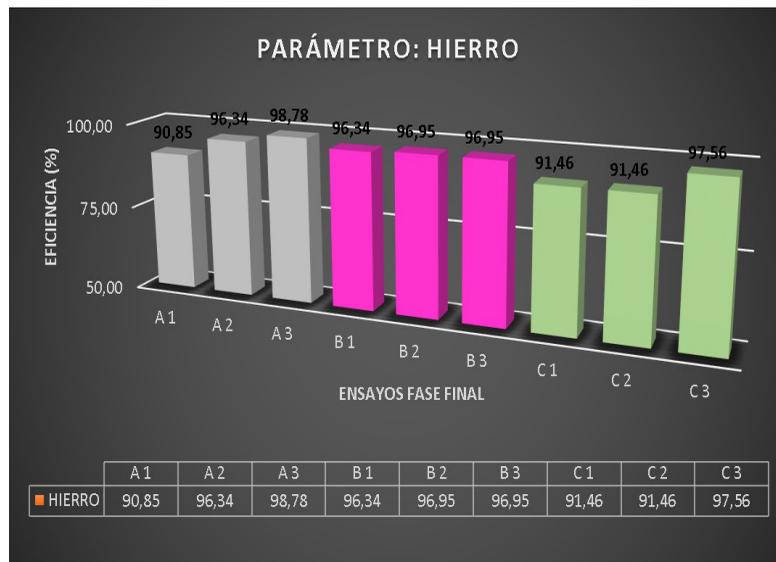


Figura 18. *Parámetro de hierro*

Fuente: Los autores -2022

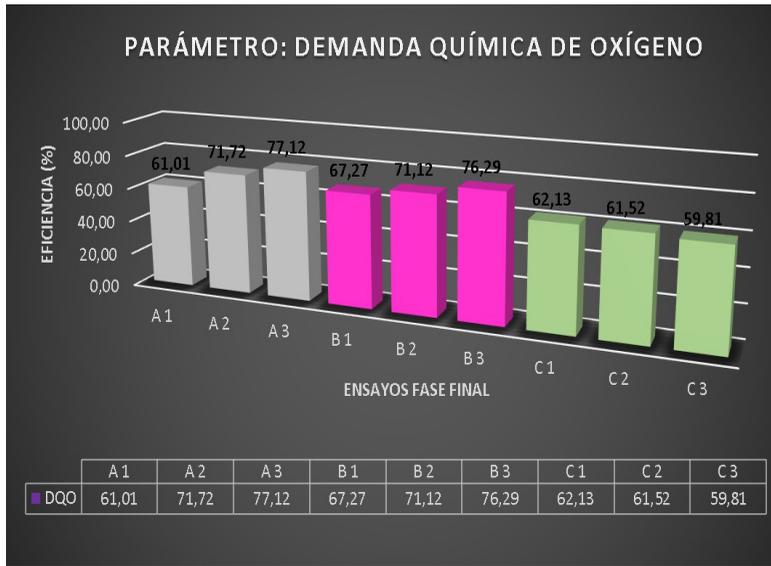


Figura 19. *Parámetro de demanda química de oxígeno*  
Fuente: Los autores -2022

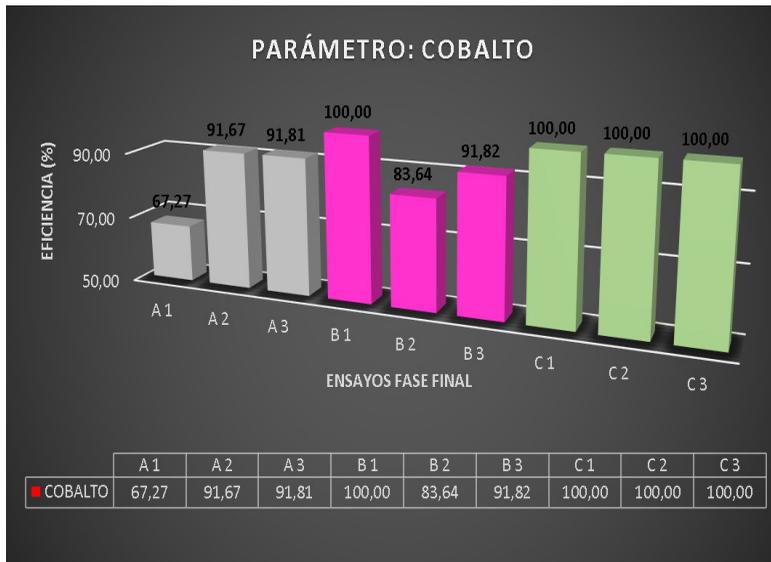


Figura 20. *Parámetro de cobalto*  
Fuente: Los autores -2022

#### 4.3.9. Segunda etapa fase final costo de operación

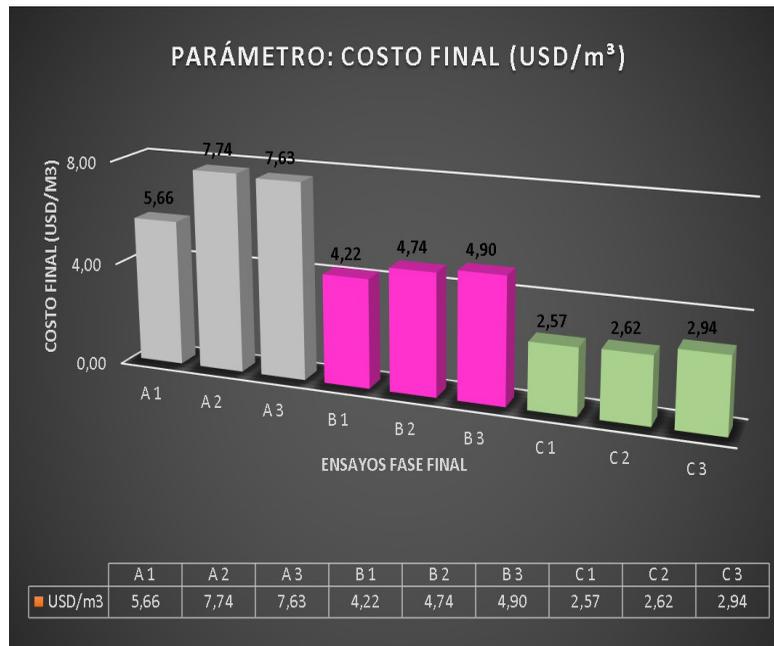


Figura 21. *Parámetro de costo de operación USD/m<sup>3</sup>*

Fuente: Los autores -2022

#### 4.4. Interpretación y análisis de los resultados por parámetros

Los resultados obtenidos en el presente estudio son de lo más variados, pudiendo analizarse de forma independiente cada ensayo realizado en relación a los logros obtenidos, otra manera adecuada de visualizar los éxitos puede ser realizando las comparativas entre las eficiencias prácticas en la remoción por cada parámetro evaluado respecto los costos generados, tiempos empleados, dimensionamiento y requerimiento de unidades o emplazamientos, etc. Y así se conseguiría un abundante flujo de información, pero es necesario circunscribirse a los objetivos iniciales, por eso limitaré al análisis de los resultados anotados en la tabla 14.

Dicha elección encuentra una justificación práctica única y exclusivamente por la relevancia de los datos recabados en ella, ya que esta proporciona de alguna manera mayor certeza (confiabilidad, seguridad) debido a la condición del analista, ya que es un ente acreditado y puede darnos mayores garantías que las de las pruebas de campo desarrolladas sin desmerecer el trabajo realizado.

Previo a cualquier juicio de valores puedo concluir que los resultados obtenidos en las pruebas de campo son coherentes en gran medida respecto a los valores arrojados en los análisis del laboratorio acreditado, siendo estos similares tanto en las magnitudes individuales como en las eficiencias de remoción, por tanto, puede haber conformidad a la hora de sopesar la información que aquí se comparte.

### ***Potencial de Hidrógeno (pH).***

La muestra inicial presenta para este parámetro, un valor muy por fuera del límite señalado en la normativa y luego se aprecia que después de haber aplicado la electrocoagulación hay un incremento en el valor de este parámetro. Esta condición se presenta debido a la naturaleza intrínseca del tratamiento aplicado y pudiendo atribuirse este comportamiento a diversos factores tales como un tiempo de tratamiento extendido, también una alta intensidad de corriente provoca un flujo mayor de electrones en el seno de la disolución lo que a su vez favorece a la formación de iones ( $H_3O^+$ ;  $OH^-$ ) teniendo como consecuencia ulterior la formación de moléculas de otras especies químicas tal como el hidrógeno en fase gas que se escapa hacia la atmosfera causando un desequilibrio en el seno de la solución objeto de estudio, ya que así la reacción verá favorecida su orientación hacia el lado alcalino.

Como atenuante cabe señalar que la electrocoagulación es considerado mayoritariamente como un proceso primario, lo que pudiese ayudar ya que en las subsiguientes etapas del proceso de remediación del efluente se va a justar dicho varo acorde a lo requerido por la ley vigente.

### ***Color.***

De este parámetro se puede decir que presenta una respuesta muy favorable frente al tratamiento aplicado, ya que en la totalidad de las pruebas ha mostrado una evolución marcadamente positiva, obteniéndose en la fase definitiva eficiencias de remoción por sobre los sobre 99 puntos porcentuales según se muestran en los resultados de la tabla 15.

Las causas pueden ser diversas, desde la desestabilización coloidal propiamente dicha lograda a partir de la introducción de cargas eléctricas de signo contrario (iones  $Fe^{2+}$ ), así como también la exposición a un fuerte campo electromagnético inducido para ese propósito el cual provoca la reorientación de las moléculas presentes en el seno de la disolución, la formación de hidrógeno gas (micro burbujas) las mismas que generan la turbulencia en el seno de la disolución mejorando los procesos de coagulación y floculación, a su vez estas burbujas también provocan (por el empuje ascendente) la separación de los flóculos ya formados por flotación.

### ***Turbiedad.***

Al igual que sucede con el Color, el comportamiento de este parámetro frente a la aplicación de la electrocoagulación como tratamiento de remediación ambiental ha sido excelente con un notorio rendimiento en lo referente a la remoción. Esto queda en evidencia en los valores de la tabla 15 (así como los señalados en los ensayos previos). El mecanismo por el cual se logran estos resultados es análogo al detallado en párrafo anterior (Color) debido que la turbiedad de una solución es debido generalmente a partículas no solubles presentes

en forma coloidal.

### ***Demanda Química de Oxígeno (DQO).***

La demanda química de oxígeno es el parámetro menos eficiente entre todos los evaluados, y aún con esa característica el resultado ha sido bastante aceptable ya que en la totalidad de los ensayos (fase final) se logró estar dentro del rango permitido por la normativa en descargas a la red del sistema de alcantarillado público. Se puede asumir con seguridad que la carga contaminante remanente y aún presente en la muestra tratada por electrocoagulación, es consecuencia de compuestos solubles (sólidos solubles, tipo ácido acético y similares) por lo que se requeriría de un tratamiento complementario (lodos activos) para tener mineralización completa de dichos contaminantes.

En la mineralización de los compuestos causantes de la demanda química de oxígeno intervienen varios mecanismos de reacción, entre ellos y la principal sería la oxidación electroquímica, ya sea de manera directa y que es la que se efectúa sobre la superficie del ánodo cuando los compuestos alcanzan a llegar hasta dicha superficie y ceden sus electrones a la superficie cargada, entonces es cuando estos (compuestos) se desnaturalizan logrando una degradación parcial o total dependiendo de las condiciones en las que evolucione la reacción, o también se puede dar de manera indirecta (la oxidación) en el seno de la disolución debido a la formación de especies electroactivas oxidantes como consecuencia de las reacciones sucesivas generadas en el proceso de electrolisis.

### ***Sólidos Suspendedos Totales (SST).***

Este parámetro de control se ponderó únicamente en las muestras analizadas por el laboratorio acreditado, ya que su valor se encuentra dentro del rango permitido por la legislación legal vigente para su disposición final en la red de alcantarillado público de la ciudad y en este estudio será meramente referencial.

De los resultados anotados se puede reconocer que la electrocoagulación es una buena alternativa para la mitigación de problemas donde este parámetro es el causante principal de la contaminación, claro está, salvando las dificultades y limitaciones propias del sistema propuesto.

### ***Metales Pesados.***

Los metales considerados para su evaluación en el presente proyecto son: Cromo Hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ); Hierro; Cobalto y Níquel.

Aunque estos parámetros no aparecen en los resultados del ente acreditado, se puede referir, basados en los otros parámetros evaluados por dicho laboratorio, que los resultados obtenidos durante las pruebas de campo tienen una validez proporcional puesto que difieren

con poco margen (los resultados) al compararse entre sí. Con esta finalidad los datos sobre los que realizaré el análisis serán los que se encuentran anotados en la tabla 12 (Fase Final. Eficiencia de democión).

Para la remoción de los metales pesados generalmente se cumple por lo menos uno de los siguientes mecanismos de reacción. La electrodeposición, el metal en fase acuosa (catión) llega hasta las inmediaciones del electrodo con carga negativa (cátodo) y luego del intercambio de electrones con dicha superficie este se depositará directamente sobre la superficie del electrodo, dándose en este proceso un cambio de fase pasando a metal en fase sólida, siendo retirado del seno de la disolución y por tanto inocuo.

El otro mecanismo de reacción será la combinación de los metales (en fase acuosa) con otras especies electroactivas presentes en el seno de la disolución para dar compuestos insolubles (fase sólida) tales como óxidos o hidróxidos metálicos por lo que de manera similar a la descrita en el párrafo anterior se podrá separar del seno de la disolución, pero esta vez como lodo insoluble en la sedimentación posterior o durante el proceso de electrocoagulación por flotación.

### ***Cromo Hexavalente ( $Cr^{6+}$ ).***

Este parámetro tiene una excelente respuesta al tratamiento electroquímico, lográndose en todos los ensayos (preliminares y/o finales) altas eficiencias pudiendo cumplir siempre con la norma establecida con plenitud. Aunque la lectura inicial superaba con largura el límite máximo permisible se consiguió su mineralización completa en algunos casos.

### ***Hierro.***

Este parámetro inicialmente causó algún tipo de problema para su valoración con exactitud, debido a que la muestra presentaba coloración lo que provocó interferencias indeseadas, esto se superó con el pasar de las pruebas lográndose medir de manera eficaz en la fase definitiva donde se pudo comprobar que respondía de manera positiva al tratamiento con eficiencias tan altas como más del 90 % en su remoción final.

### ***Níquel.***

Otro metal con muy altas eficiencias de remoción, llegándose a tener trazas en las muestras finales.

### ***Cobalto.***

Junto con el cromo hexavalente, presenta mucha facilidad para su remoción del medio que lo contiene. Muy altos porcentajes de remoción.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Angel G., C. B. (2019). Tratamiento electroquímico de una emulsión acuosa de ácido palmítico empleando un electrodo de fieltro grafitico modificado con hierro. NO ESTA CITADO, mal referenciado, INCLUIR EL LINK, QUE ES?, LIBRO, ARTICULO, PAGINA WEB, TESIS
- APHA. (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health, 724 pp. 22a ed.
- Buscio v., M. M.-B. (2015). Reuse of textile wastewater after homogenization–decantation treatment coupled to PVDF ultrafiltration membranes. Chem. Eng. J., 122-128. NO ESTA CITADO
- Carvalho J. C., B. G. (2016). Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization. Water, 38-46. INCLUIR LINK
- Cifuentes L., F. D. (2015). Oxidación electroquímica de lambda-diacialotrina sobre electrodos de PbO<sub>2</sub>-Bi. Quim. Nova. NO ESTA CITADO, INCLUIR LINK
- Cortazar A., O. C. (2014). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. Vida Científica N°3. NO ESTA CITADO, INCLUIR EL LINK, QUE ES?, LIBRO, ARTICULO, PAGINA WEB, TESIS
- Garay Martha, T. O. (2016). Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada. Industrial Data, 19(2). INCLUIR LINK
- Ivonne Linares-Hernández, V. M.-M.-D. (2011). Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquímicos. Avances en ciencias e ingeniería. MAL REFERENCIADO INCLUIR EL LINK, QUE ES?, LIBRO, ARTICULO, PAGINA WEB, TESIS
- Julián Camilo García, M. P. (2012). Remoción de colorantes sintéticos mediante el proceso Fenton heterogéneo usando Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> soportado en carbón activado obtenido a partir de residuos de rosas. Universitas Scientiarum, Vol 17. MAL REFERENCIADO, INCLUIR LINK
- Kelly, P. S. (2012). Oxidación Electroquímica y Ozonización Aplicadas al Tratamiento de Aguas de Lavado de la Producción de Biodiesel. Información tecnológica, 41-52. NO ESTA CITADO, INCLUIR LINK
- López-Ojeda, M. R.-L.-M. (2015). efecto del ph sobre la oxidación electroquímica de fenol. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 437-452. INCLUIR LINK
- Mansilla H., L. C. (2015). Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil. Estrucplan Online. INCLUIR EL LINK, QUE ES?, LIBRO, ARTICULO, PA-

GINA WEB, TESIS

- MARTÍN, M. J. (2015). Eliminación de contaminantes orgánicos persistentes de aguas residuales mediante oxidación electroquímica con ánodo de diamante dopado con boro. Real: Departamento de Ingeniería Química. MAL REFERENCIADO INCLUIR EL LINK, QUE ES?, LIBRO, ARTICULO, PAGINA WEB, TESIS
- Ministerial, A. (097-A). Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes. Quito, Ecuador: Registro oficial. INCLUIR EL LINK, QUE ES?, LIBRO, ARTICULO, PAGINA WEB, TESIS
- Residuales, R. M. (septiembre de 2010). Tratamiento electroquímico de aguas residuales. Obtenido de Fundación para el conocimiento madrid+d: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/09/17/131491> MAL REFERENCIADO
- Sarai B.M., A. M. (2018). Procesos de Oxidación Avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria. ROVIRA: RED TRITON PROGRAMA CYTED. NO ESTA CITADO INCLUIR EL LINK, QUE ES?, LIBRO, ARTICULO, PAGINA WEB, TESIS
- Tinoco Gómez, O. R., Medina Escudero, A. M., & Zapata Gamarra, H. (2011). Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta solar. Industrial Data. INCLUIR EL LINK, QUE ES?, LIBRO, ARTICULO, PAGINA WEB, TESIS
- Vallvé, M. V. (2015). Eliminación del color de las aguas residuales procedentes de la tintura con colorantes reactivos. Catalunya: Departament d'Enginyeria Tèxtil i Paperera . NO ESTA CITADO INCLUIR EL LINK, QUE ES?, LIBRO, ARTICULO, PAGINA WEB, TESIS
- Zaruma P.E., P. J. (2018). Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas. INCLUIR EL LINK, QUE ES?, LIBRO, ARTICULO, PAGINA WEB, TESIS
- Baird Rodger B., Eaton Andrew D., R. E. W. (2017). Standard methods: For the examination of water and waste water. In R. E. W. Baird Rodger B., Eaton Andrew D. (Ed.), American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (23rd ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Bermeo Garay, M., & Tinoco Gómez, O. (2016). Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada. Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 19(38), 125–128. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v19i38.13578>
- Bes Monge, S. S., Silva, D. A. M. ., & Bengoa, D. C. (2016). Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales. In (Tritón-316Rt0506). [http://www.cytred.org/sites/default/files/manual\\_sobre\\_oxidacio-](http://www.cytred.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidacio-)

nes\_avanzadas\_0.pdf

- Cardoso, J. C., Bessegato, G. G., & Boldrin Zanoni, M. V. (2016). Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization. *Water Research*, 98, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.004>
- Cifuentes, L., Flores, D., Madriz, L., & Vargas, R. (2015). Electrochemical oxidation of lambda-cyhalothrin on PbO<sub>2</sub>-Bi electrodes. *Quimica Nova*, 38(8), 1009–1013. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150107>
- García, J. C., Castellanos, M. P., Uscátegui, Á., Fernández, J., Pedroza, A. M., & Daza, C. E. (2012). Remoción de colorantes sintéticos mediante el proceso Fenton heterogéneo usando Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> soportado en carbón activado obtenido a partir de residuos de rosas. *Universitas Scientiarum*, 17(3), 303–314. <https://doi.org/10.11144/javeriana.sc17-3.rdc>
- Gilpavas, E. (2008). Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. *Cuadernos de Investigación*, 65–072008, 85. <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/cuadernos-investigacion/article/view/1279>
- Linares-Hernández Ivonne, Martínez-Miranda Verónica, Barrera-Díaz Carlos, Pavón-Romero Sergio, Bernal-Martínez Lina, L.-L. V. (2011). Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquímicos. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 2(1), 21–36. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323627681003>
- López-Ojeda G.C., Gutiérrez-Lara Ma. R., D.-M. A. (2015). Efecto del pH sobre la oxidación electroquímica de fenol empleando un ánodo dimensionalmente estable de SnO<sub>2</sub>-Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-RuO<sub>2</sub>. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(2), 437–452. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-27382015000200020&script=sci\\_abstract](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-27382015000200020&script=sci_abstract)
- López Ramírez, M. A., Castellanos Onorio, O. P., Lango Reynoso, F., Castañeda Chávez, M. del R., Montoya Mendoza, J., Sosa Villalobos, C. A., & Ortiz Muñiz, B. (2021). Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. *Enfoque UTE*, 12(4), 76–87. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.769>
- MAE, M. D. A. (2015). Acuerdo\_Ministerial\_97a.Pdf. [http://www.quitoambiente.gob.ec/images/Secretaria\\_Ambiente/Documentos/calidad\\_ambiental/normativas/acuerdo\\_ministerial\\_97a.pdf](http://www.quitoambiente.gob.ec/images/Secretaria_Ambiente/Documentos/calidad_ambiental/normativas/acuerdo_ministerial_97a.pdf)
- Mansilla H, Lizama C, Gutarra A, R. J. (2001). Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil. In M. A. (para C. Blesa (Ed.), *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea* (pp. 285–293). Red CYTED VIII-G. <http://www.cnea.gov.ar/sites/default/files/20cap13.pdf>
- Martín de Vidales, M. J. (2015). Eliminación de contaminantes orgánicos persistentes de aguas residuales mediante oxidación electroquímica con ánodo de diamante dopado

con boro [Universidad de Castilla-La Mancha]. <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/7172>

Patiño, K. V., Arroyave, S. M., & Marín, J. M. (2012). Oxidación electroquímica y ozonización aplicadas al tratamiento de aguas de lavado de la producción de biodiesel. *Información Tecnológica*, 23(2), 41–52. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000200006>

Piña–Soberanis, M., Martín–Domínguez, A., González–Ramírez, C., Prieto–García, F., Guevara–Lara, A., & J.E., G.–E. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(2). [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S166527382011000200010](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S166527382011000200010)

Tinoco, O. R., Medina, A. M., & Zapata, H. (2011). Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta solar. *Industrial Data*, 14(2), 9–15. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81622585002>

Zaruma Arias P. E., Proal Nájera J. B., Chaires Hernández, S. A. H. I. (2018). Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión Textile Industrial Dyes and optimal wastewater effluents treatments: A short review. *Revista de La Facultad de Ciencias Químicas*, 19, 38–47. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/2216>

**Ing. Marina Chanena Alvarado Aguilar. MSc.**

Maestría en Ciencias de la Ingeniería

Docente titular de la Facultad de Ingeniería Química

Universidad de Guayaquil marina.alvaradoag@ug.edu.ec

**Dra. Martha Mirella Bermeo Garay**

Doctorado en Ciencias Ambientales Maestría en Ingeniería Ambiental Ingeniería Química

Docente titular de la Facultad de Ingeniería Química

Universidad de Guayaquil martha.bermeog@ug.edu.ec

**Ing. Jairo Sebastian Mendieta Bravo.MSc**

Maestría en Ingeniería Ambiental

Maestría en Educación Superior .

Docente titular de la Facultad de Ingeniería Química

Universidad de Guayaquil jairo.mendietab@ug.edu.ec

ISBN: 978-9942-33-642-2



**compAs**  
Grupo de capacitación e investigación pedagógica



@grupocompas.ec

compasacademico@icloud.com