



**ELECTROCOAGULACIÓN Y ADSORCIÓN  
APLICADAS AL TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES**

Martha Bermeo Garay  
Luis Bonilla Abarca



# **ELECTROCOAGULACIÓN Y ADSORCIÓN APLICADAS AL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

**Martha Bermeo Garay**  
**Luis Bonilla Abarca**

**ELECTROCOAGULACIÓN Y ADSORCIÓN  
APLICADAS AL TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES**

Título original: ELECTROCOAGULACIÓN Y ADSORCIÓN  
APLICADAS AL TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES

Primera edición: enero 2020

© 2020, Martha Bermeo Garay

Luis Bonilla Abarca

Diagramación: Arnaldo Rodríguez Mateo

Publicado por acuerdo con los autores.

© 2020, Editorial Grupo Compás

Guayaquil-Ecuador

Grupo Compás apoya la protección del copyright, cada uno de sus textos han sido sometido a un proceso de evaluación por pares externos con base en la normativa del editorial.

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.

Editado en Guayaquil - Ecuador

ISBN: 978-9942-33-174-8

Cita.

M. Bermeo, L. Bonilla. (2020) ELECTROCOAGULACIÓN Y ADSORCIÓN APLICADAS AL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, Editorial Grupo Compás, Guayaquil Ecuador, 145 pag

# CONTENIDO

<b>1. EPISTEMOLOGÍA AMBIENTAL</b>	<b>11</b>
1.1. Transformación de la Electrocoagulación a través del tiempo	11
1.2. Variación de la Adsorción en el tiempo	12
1.3. Antecedentes de Investigación	14
<b>2. FUNDAMENTOS DE ELECTROQUÍMICA</b>	<b>19</b>
2.1. Celdas Electroquímicas	19
2.2. Electrólisis	20
2.3. Reacciones Electroquímicas	20
2.4. Potenciales de Oxidación – Reducción	21
2.5. Leyes de la Electrólisis o de Faraday	22
2.5.1. Primera ley de Faraday	22
2.5.2. Segunda ley de Faraday	23
<b>3. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA</b>	<b>27</b>
3.1. Definición	27
3.2. Clasificación de los POA	28
3.3. Ventajas	29
3.4. Desventajas	29
<b>4. FUNDAMENTOS DE ELECTROCOAGULACIÓN</b>	<b>33</b>
4.1. Fundamentos teóricos	33
4.2. Reacciones que se llevan a cabo en la Electrocoagulación	34
4.3. Factores que afectan la electrocoagulación.	36
4.4. Ventajas	40
4.5. Desventajas	40
4.6. Electroflotación	40

<b>5. FUNDAMENTOS DE ADSORCIÓN</b>	<b>45</b>
5.1. Fundamentos teóricos	45
<b>6. COLORANTES</b>	<b>51</b>
6.1. Estudio de Colorantes	51
6.2. Definición de Colorantes	52
6.3. Tipos de Colorantes textiles	56
<b>7. REMOCIÓN DE COLORANTE MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN Y ADSORCIÓN</b>	<b>62</b>
7.1. Remoción de colorante	63
7.2. Tipo y diseño de investigación.	63
7.3. Caracterización de agua residual	66
7.4. Proceso de experimentación	67
7.4.1. Control de Variables	68
7.4.2. Diagramas del Experimento	69
7.4.3. Análisis e interpretación de la Información.	69
<b>8. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA UNIDAD DE ELECTROCOAGULACIÓN Y ADSORCIÓN</b>	<b>73</b>
8.1. Unidad de Electrocoagulación y Adsorción	73
8.2. Partes de la Unidad de Electrocoagulación y Adsorción	75
8.2.1. Fuente de Poder	75
8.2.2. Paquetes de electrodos	76
8.2.3. Acrílico	77
8.2.4. Cámara de Electrocoagulación	77
8.2.5. Cámara de Sedimentación	77
8.2.6. Bomba magnética	78
8.2.7. Filtro de carbón activado	79
8.2.8. Tanque de alimentación y tanque de agua tratada	80
8.2.9. Pipeteador Manual	80
8.3. Características de la Unidad de Electrocoagulación	81
8.4. Características del Equipo de Adsorción	86
8.5. Ensamblaje de la Unidad de Electrocoaguación y Adsorción	86



8.6. Preparación de muestra sintética	88
<b>9. EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>93</b>
9.1. Procedimiento de operación de la unidad de electrocoagulación: Prueba en lote	94
9.2. Operación en la unidad piloto de electrocoagulación y adsorción con carbón activado en continuo.	97
9.3. Procedimiento para toma de muestras	98
<b>10. PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO</b>	<b>101</b>
10.1. Pruebas estadísticas	101
10.2. Análisis e interpretación de resultados	101
10.2.1. Resultados y análisis estadístico para una configuración de 3 celdas y 2 paquetes con una separación de 0.8 cm.	102
10.2.2. Resultados y análisis estadístico para una configuración de 3 celdas y 3 paquetes con una separación de 0.8 cm.	105
10.2.3. Resultados y Análisis de Estadística Configuración de 4 celdas y 2 paquetes con una separación de 0.8 cm.	107
10.3. Comparación de los resultados de las pruebas de color y DQO para el tratamiento de electrocoagulación seguido de adsorción	111
10.4. Resultados con verificación hipótesis principal	113
<b>11. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>114</b>



# INTRODUCCIÓN

Este libro se ha elaborado con el fin de dar nociones sobre las Técnicas de Electrocoagulación y Adsorción que pueden ser aplicadas para remover colorantes de aguas residuales de diferentes tipos de industrias que trabajan con tintes como tintorerías, cartoneras e imprentas.

Los procesos que se utilizan están basados en el uso de energía eléctrica con el fin de romper los enlaces de las moléculas de los compuestos contaminantes, lo cual se logra mediante los radicales hidroxilos por transferencia de electrones teniendo en cuenta que no hay necesidad de aplicar reactivos químicos tan solo se debe considerar el costo de la energía y la duración de los electrodos.

En el primer capítulo trata sobre la Epistemología Ambiental y se hace un estudio de la historia de la electrocoagulación y adsorción a través del tiempo. También se contempla las diferentes investigaciones realizadas por diferentes autores aplicando electrocoagulación para remover colorantes y demanda química de oxígeno.

En el capítulo dos se trata sobre los Fundamentos de la Ingeniería Electroquímica, su aplicación en el tratamiento de aguas residuales.

En el capítulo tres se ven los procesos de Oxidación Avanzada aplicadas en aguas residuales que tienen baja biodegradabilidad y alta estabilidad química, para procesos homogéneos con aporte de energía.

El capítulo cuatro se centra en la Electrocoagulación la cual se basa en la aplicación de corriente eléctrica, utilizando electrodos de aluminio o de hierro, con la ventaja de remover contaminantes orgánicos e inorgánicos sin añadir reactivos.

El capítulo cinco hace un estudio de la Adsorción con el fin de eliminar sustancias solubles del agua a tratar, para lo cual se utiliza una sustancia adsorbente, en este caso carbón activado.

El capítulo seis se hace una revisión sobre los diferentes tipos de colorantes y en especial de los que no se pueden remover por tratamiento convencional, como son los refractarios.

El capítulo siete trata sobre el diseño de investigación para remover colorantes mediante electrocoagulación y adsorción, enfocándose sobre el tipo y diseño de investigación, así como también los niveles de investigación, partiendo la investigación de una muestra sintética de efluente textil, con aplicación de proceso en lote y continuo.

En el capítulo ocho se crea el diseño y construcción de una unidad de electrocoagulación y adsorción.





# **CAPÍTULO 1**

## **EPISTEMOLOGÍA AMBIENTAL**



# 1. EPISTEMOLOGÍA AMBIENTAL

En los Principios Epistemológicos del Problema Ambiental, "Lo ambiental" supone una profundidad y sistemática discusión respecto al sentido de la cultura en diversas manifestaciones históricas: la tecnología, las ciencias el arte, los mitos y religiones, y la vida diaria que causan acciones devastadoras de los seres humanos sobre el entorno biótico y abiótico (Amezquita, 2013).

El pensamiento ambiental complejo es un movimiento intelectual que surge como respuesta a la necesidad de enfrentar las crisis ambientales derivadas del agotamiento del paradigma tecnológico industrial y postindustrial en el pasado siglo XX, que amenaza con la destrucción del medio ambiente. Este pensamiento propone para su estudio y comprensión la instauración de una "episteme" y de una praxis que abra a los estudiosos de la problemática ambiental posibilidades epistemológicas, fundamentadas en la comprensión, en la diferencia y especificidad y en la alteridad e intervención de las relaciones "ecosistemas – cultura", y en la biodiversidad (Amezquita, 2013).

La electroquímica ambiental es una aplicación emergente de la ingeniería química del cual es una disciplina científica y tecnológica que tiene como objetivo de estudio el diseño y la operación de los equipos y procesos en los que se produce interconversión entre energía química y eléctrica. A nivel histórico se puede afirmar que surgió en la segunda mitad del siglo XX como una nueva rama de la Ingeniería Química, pudiendo considerarse como el resultado de la interacción de la Ingeniería Química con la Electroquímica y con la Ciencia de los Materiales (Barrera, 2014, pág. 3).

## 1.1. Transformación de la Electrocoagulación a través del tiempo

Desde el siglo XIX, en 1888, se efectuó el primer ensayo reportado en Londres por Webster, este proceso utilizaba ánodos de hierro soluble, proceso que fue investigado luego en otras localidades de Inglaterra. La caída de potencial entre los electrodos distantes una pulgada entre sí fue de 1,8 vatios y la corriente anódica de 0,6 Amp/pie<sup>2</sup>. Cinco años más tarde, Wolff electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y soda cáustica que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster, NY.

En 1896 se usó en Lousville, Kentucky, una modificación del proceso de Webster para coagular agua cenagosa del río Ohio, proceso en el que se utilizó ánodos de hierro y aluminio, los cuales fueron efectivos en coagular el agua, pero sin una reducción importante en el oxígeno consumido. (Arango Ruíz Á. , 2005)

Luego en el año 1906 se concibe la primera patente concedida en Estados Unidos, pero con el tiempo se presentaron problemas de tipo financiero o de regulación de incentivos para que la industria adoptara esta técnica.

Por otro parte Webster en 1908 el proceso se utilizó en Santa Mónica con reducciones de 40% de materia orgánica. Bull en 1911 electrolizó una salmuera con ánodo de grafito in-

terponiendo una membrana de asbesto entre los electrodos. Una modificación del proceso Webster -llamado Landreth- se utilizó en 1914 en Nueva York, en éste se añade cal para mejorar la conductividad del electrolito (Arango Ruíz Á. , 2005).

En 1930 este proceso dejó de tener interés para la industria aunque como hecho aislado fue utilizado en 1932, en Alemania, con eficiencia del 50% en reducción de la DBO de aguas residuales. La falla de estos procesos se debió al alto costo de energía y a la necesidad de recambiar los electrodos. En 1947, en URSS, se utilizó el proceso con electrodos de hierro, obteniendo remociones de 70-80% de DBO. Unos años más tarde, en 1958, el profesor Mendía, de la Universidad de Nápoles, utilizó esta técnica para desinfectar las aguas negras de ciudades costeras. En este proceso se mezcló 25-30% en volumen de agua de mar antes de la electrólisis (Arango Ruíz Á. , 2005).

En Noruega se combinaba 20% de agua de mar con las aguas residuales en la electrólisis para la remoción de fosfato utilizando electrodos de carbón. Aunque la eficiencia del proceso fue buena hubo problemas de corrosión.

Se han reportado trabajos en URSS en donde se utilizó el proceso para remover partículas dispersas de aceite, grasa y petróleo. En 1971, en Vancouver del Norte, se utilizaron ánodos de aluminio para disolverlos y coagular aguas negras. Este proceso operó a un costo ligeramente inferior al requerido con alambre (Arango Ruíz Á. , 2005).

## 1.2. Variación de la Adsorción en el tiempo

Las primeras observaciones de tipo cuantitativo en el campo de la adsorción fueron realizadas por Carl Wilhelm Scheele en 1773 y por Fontana en 1777, quienes en sus respectivas publicaciones dan cuenta de algunos experimentos de adsorción de gases por carbón vegetal y por materiales arcillosos de origen diverso. Y en 1786, otra de Lowitz, en la que expone los resultados obtenidos al decolorar disoluciones de ácido tartárico con carbón vegetal. Este adsorbente se continuó utilizando profusamente hasta que en 1811 Figuiet descubrió que el carbón de huesos era un decolorante más eficaz que el carbón vegetal. Con el transcurso de los años, y el desarrollo de la industria, aumentó el uso del carbón (especialmente carbón de huesos y carbón de sangre) y se introdujeron otros adsorbentes tales como tierra de batán, tierra de diatomeas (diatomita o kieselgur), gel de sílice, arcillas activadas, alúmina activada y carbones activos, de los que, probablemente, son estos últimos los más versátiles y empleados en la actualidad (Valenzuela Calahorro, 2005).

El término “adsorción”, propuesto por BoisReymond, llega a la bibliografía en 1881 de la mano de Kayser. En esta época aparecen también los términos “isoterma” y “curva isoterma”, para definir los resultados de las medidas de adsorción a temperatura constante. En 1909 McBain introduce el término “absorción” para describir lo observado al estudiar la adsorción de hidrógeno por carbón. Este mismo investigador propuso el término “sorción” para incluir la adsorción y la absorción, procesos que en muchos casos no se pueden diferenciar de manera precisa. Por esto mismo, en casos dudosos se suelen utilizar los términos



“sorción”, “sorbible”, “sorbente” y “sorbido” (Valenzuela Calahorro, 2005).

En 1901, Von Ostreyko sienta las bases para la preparación industrial de carbones activados, tanto por activación directa durante la carbonización, con cloruros metálicos, como activando con dióxido de carbono o con vapor de agua, a temperaturas elevadas, materiales previamente carbonizados. Luego en 1903, Tswett utiliza columnas rellenas de materiales silíceos para la separación de clorofila y otros pigmentos de las plantas; durante ese proceso descubre la adsorción selectiva e introduce el término “cromatografía de adsorción en columna sólido-líquido”. Este descubrimiento no fue sólo el principio de una nueva técnica analítica sino también el origen de un nuevo campo de las ciencias de la superficie. En la actualidad, la cromatografía es un campo de conocimiento, independiente y bien desarrollado, derivado de la adsorción y uno de los métodos analíticos más importantes. En 1904, Dewar estudiando la adsorción de aire por carbón vegetal observó que se producía una adsorción selectiva del oxígeno. En 1911 se funda en Amsterdam la factoría NORIT, que en la actualidad continúa siendo una de las más importantes del mundo en la preparación de carbones activados. En ese mismo año se construye en Hajnowka (Este de Polonia) una planta de destilación de madera que producía inicialmente carbones activados a partir de madera (Valenzuela Calahorro, 2005).

En 1941, Martín y Synge introducen en la práctica del laboratorio la partición por cromatografía sólido-líquido, tanto en columna como en capa fina. En 1956, Barrer y Breck desarrollaron un método de síntesis de unos nuevos y potentes adsorbentes, las zeolitas; y ese mismo año la North-American Linde Company inició la producción de zeolitas sintéticas a escala industrial (Valenzuela Calahorro, 2005).

A medida que se desarrollaba la industria química se ponía de manifiesto la gran importancia que tienen para la misma los procesos de adsorción. Tanto fue así que el estudio de estos procesos llegó incluso a los libros de texto de la época, libros que, a pesar de su carácter eminentemente empírico, fueron considerados entonces como innovadores. Entre esos libros cabe citar los escritos por Freundlich, Adam, Schwab, Rideal y McBain. Menos conocido, pero no menos importante que los anteriores, fue en su época el de Ledoux, que representa el primer intento de agrupar y sistematizar lo que se podría llamar “conocimientos y tecnología de la adsorción”. A estos libros, editados en la década de 1940, se les concede gran importancia en el campo de la adsorción, pues recopilan todos los aspectos fundamentales de la adsorción entonces conocidos. Hoy no sería posible hacer algo semejante, debido fundamentalmente a la enorme extensión de los conocimientos teóricos y prácticos de esta ciencia y de su tecnología; que aparecen dispersos en cientos de libros, miles de artículos publicados en diferentes revistas especializadas, patentes, informes no publicados y otros muchos estudios de naturaleza diversa. De la revisión de muchas de las publicaciones aludidas se deduce que en la actualidad los procesos de adsorción encuentran aplicación en muy diversos campos (Valenzuela Calahorro, 2005).

Se hizo un estudio del proceso de electrocoagulación y la operación de adsorción que fue

enfocado desde el punto de vista de la protección del ambiente con la idea de no sobrepasar la capacidad de carga del planeta, que solicita el cuidado de la comunidad biótica, teniendo en cuenta que los ecosistemas de la tierra tienen unos límites, la sostenibilidad supone ajustarse a ellos. Actualmente, los términos sostenibilidad y desarrollo sostenible resultan intercambiables dichos términos, llevan a la consideración de las necesidades y deseos de las generaciones futuras, en la 29ª Conferencia General de la UNESCO en 1997 se aprobó la Declaración sobre las responsabilidades de las generaciones actuales para con las futuras generaciones la que está en plena consonancia con el Informe Brundlandt, su artículo 1 reza así: “Necesidades e intereses de las generaciones futuras: las generaciones actuales tienen la responsabilidad de garantizar la plena salvaguardia de las necesidades y los intereses de las generaciones futuras.” (López, 2007)

### 1.3. Antecedentes de Investigación

Los compuestos orgánicos refractarios presentes en aguas residuales constituyen un problema ambiental, especialmente por su interferencia en el proceso fotosintético que realizan los organismos. En la actualidad hay más de diez mil diferentes tipos de pigmentos y colorantes sintéticos que son usados en diferentes Industrias como la textil, papelera, curtiembre, alimenticia, farmacéutica, entre otras (Cortazar Martínez, 2013).

(Arango, 2007) en su investigación sobre diseño de celdas de electrocoagulación, manifiesta que la caracterización físico química del agua residual sintética de textiles permite diseñar un sistema de electrocoagulación el que servirá para el estudio de los diferentes parámetros involucrados en la remoción de contaminantes refractarios.

Arango Ruíz & Garcés Giraldo, (2009), en su artículo “Remoción del colorante azoico amaranto de soluciones acuosas mediante electrocoagulación”, cuyo objetivo es estudiar la remoción del colorante azoico amaranto de soluciones acuosas usando electrocoagulación, empleó aguas residuales sintéticas y utilizó un diseño experimental factorial 3x2x3 que obedece a variaciones de pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento. Las variables de respuesta medidas fueron porcentajes de remoción de demanda química de oxígeno y color. Se encontró que las remociones de demanda química de oxígeno fueron del orden del 98,3 % y las de color del 99,3% a pH de 4, densidad de corriente de 40,86 A/m<sup>2</sup> y a 15 minutos de tratamiento. Se concluye que desde el punto de vista de los aspectos técnicos, la electrocoagulación es una tecnología que puede utilizarse en soluciones acuosas de rojo amaranto para la remoción de color, en medio ácido.

(Arango Ruíz A. , 2011, pág. 58), en su artículo “Uso de la electrocoagulación para remoción de tartrazina en soluciones acuosas”, da cuenta del estudio de la remoción del colorante azoico tartrazina de soluciones acuosas usando electrocoagulación con electrodos de hierro y aluminio, en aguas residuales sintéticas con una concentración de 100 mg/L de tartrazina. En este estudio se usa nuevamente un diseño experimental factorial 3x2x3, cuyas variables fueron las mismas. Las variables de respuesta medidas fueron porcentajes de

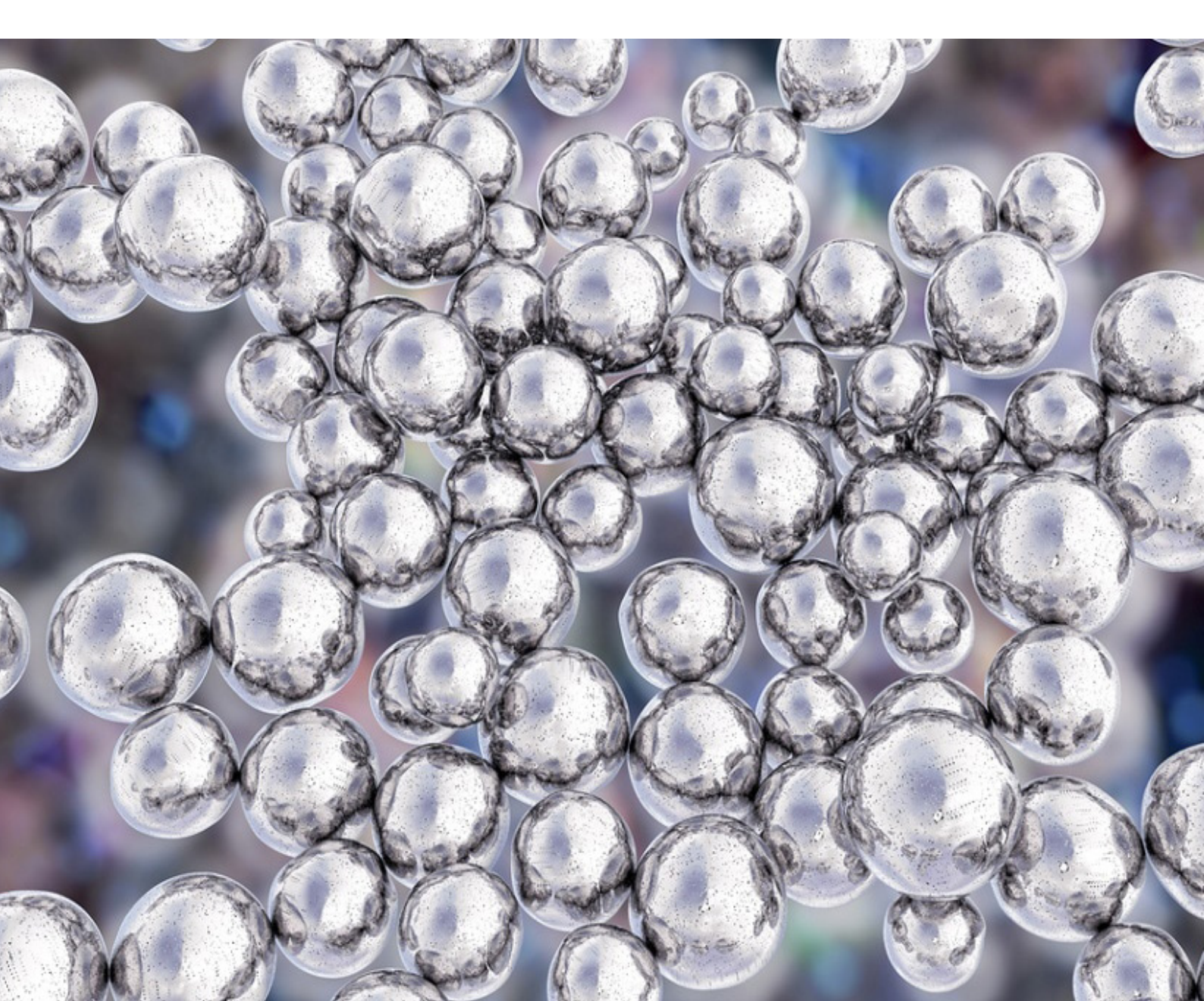
remoción de DQO y color. En los resultados se obtiene que las remociones de DQO fueron del orden del 95,5 % y las de color del orden del 99,4 % a pH de 4, densidad de corriente de 43,23 A/m<sup>2</sup> y a 12 minutos de tratamiento. Del estudio se establece que desde el punto de vista de los aspectos técnicos, la electrocoagulación es una tecnología que puede utilizarse en soluciones acuosas de tartrazina para la remoción de color.

(Gil Pavas, 2008) indicó, según la investigación del Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Tecnología Gebze, sobre los efluentes de la industria textil, obteniendo como resultado que el desempeño de electrodos de hierro es superior a los de aluminio, así mismo, el consumo de energía es menor en los electrodos de hierro que para el aluminio. Se debe considerar que las conductividades altas mejoran el desempeño del proceso. El mismo autor, en una investigación del 2003, determinó que el pH es un factor importante en la remoción de color y DQO. De la misma manera, encontró que el pH final es más alto cuando se opera con electrodos de aluminio, lo cual genera mejores resultados. El autor señala que trabajaron con muestras sintéticas y reales de colorantes de la industria textil, obteniendo remociones entre 80-90% en las muestras reales, y del 95% en el caso de soluciones sintéticas muy diluidas. Además precisa que este experimento se realizó utilizando electrodos de hierro a escala laboratorio, en ensayos en lotes, en continuo, obteniendo resultados similares.

En lo relacionado a la reutilización del efluente de textiles, después del tratamiento electroquímico (López-Grimau, Amante García, & Gutiérrez, 2010, pág. 182), explican el procedimiento de decoloración de los efluentes mediante una célula electroquímica asistida por luz ultravioleta. Aquí el agua decolorada almacena en un depósito para su posterior reutilización en el proceso de tintura. Este sistema de tratamiento y reutilización permite ahorrar el 70% de agua y el 60% de la sal necesario para preparar los baños de tintura. Lo que aparte de reportar un ahorro económico directo, también, supone un ahorro en el canon de vertido de aguas residuales. Determinó además que, por el contrario, si se quiere hacer un proceso continuo de sucesivas reutilizaciones, en algunas ocasiones y en función del color requerido, deberá aumentarse la cantidad de colorante respecto de la fórmula inicial para evitar una merma en la calidad de las tinturas. Precisamente por ello es importante la realización del estudio económico para demostrar su viabilidad.

(Kim, 2015) realizó un estudio a escala piloto utilizando el proceso de electrocoagulación-electro flotación para tratar el tinte textil de aguas residuales crudas para evaluar el rendimiento del tratamiento. Investigó los efectos de algunos factores clave, como la densidad de corriente, el tiempo de retención hidráulica, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno y color. Las variables operativas fueron densidad de corriente de 0-300 A m<sup>-2</sup>, tiempo de retención de 0-30 min. Bajo las condiciones operativas sin coagulante añadido, se eliminaron los máximos de 88%, 84% y 99% de, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno y color, respectivamente, con un tiempo de retención hidráulica de 30 min.





# **CAPÍTULO 2**

## **FUNDAMENTOS DE ELECTROQUÍMICA**



## 2. FUNDAMENTOS DE ELECTROQUÍMICA

El conocimiento de la electroquímica como ciencia se debe a las diferentes investigaciones de Galvani, Volta y Petrov, quienes hace más de cien años revelaron las pilas electroquímicas. Luego Davy y Faraday experimentaron la electrólisis, Arrhenius la teoría de la disociación de los electrolitos y Nernst sobre la termodinámica de los procesos electroquímicos. La teoría de Arrhenius fue estudiada por Debye y Huckel quienes elaboraron la teoría electrostática (Enciclopedia Práctica del Estudiante, 2012).

La Ingeniería Electroquímica es una rama importante dentro de la química que tiene como objetivo principal el estudio, diseño y manipulación de los diferentes equipos y procesos donde se produce una interconversión o transformación entre energía química y eléctrica. Las reacciones químicas que ocurren en el interfaz de un electrodo puede ser un metal y un conductor iónico el electrolito es una solución o un sólido (Barrera, 2014).

En el tratamiento de aguas residuales por primera vez se propuso la electroquímica en 1889 en Reino Unido, estas tecnologías son consideradas como un paso indispensable en el tratamiento de aguas residuales que contienen compuestos refractarios. Mediante el tratamiento electroquímico se remueven tanto contaminantes orgánicos como inorgánicos (Barrera, 2014).

Dentro de las tecnologías avanzadas que se están aplicando desde muchos años está la electroquímica industrial para la producción limpia de productos y el tratamiento de efluentes en forma sustentable desde un punto de vista ambiental. La descontaminación electroquímica es el resultado de la combinación de varios procesos, aún en discusión, que pueden resumirse en: electro reducción, electro oxidación, electrocoagulación y electro flotación. La electro reducción y la electro oxidación implican la transformación química sobre la superficie del electrodo de la especie indeseable, dando lugar a un producto no contaminante o eliminándolo directamente de la solución, como es el caso de la deposición de metales por electrólisis. En algunas situaciones, mediante electro oxidación es posible obtener en forma controlada especies altamente reactivas ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) que pueden actuar como descontaminantes (Lavorante, Álvarez, Chantrill, & Fasoli, 2011).

Las nuevas aplicaciones de la Ingeniería Electroquímica han combinado con el surgimiento de una mayor responsabilidad social buscando el mantenimiento del Medio Ambiente, lo que conlleva la cruda realidad de aplicar nuevas tecnologías de tratamiento más provechosos en cuanto a obtener excelentes resultados y reducir costos (Ibáñez, 2014).

### 2.1. Celdas Electroquímicas

Una celda electrolítica es una celda electroquímica en la cual una corriente eléctrica impulsa una reacción que de otra forma sería no espontánea. El proceso de producir un cambio químico en una celda electrolítica se llama electrólisis (Ebbing & Gammon, 2009).

Las celdas electroquímicas en las que se provoca una reacción química mediante la adición de energía eléctrica se llaman celdas electrolíticas. Los dispositivos que producen energía eléctrica mediante una reacción química son las celdas galvánicas. Estas últimas se subdividen usualmente según su forma de operación: las celdas de combustible son reactores de estado estacionario en los que se dosifican los reactivos en forma continua y de los que se extraen los productos también en forma continua, mientras que las celdas primarias son dispositivos de estado no estacionario que contienen cantidades iniciales fijas de reactivos. Hay un tercer tipo de celdas electroquímicas conocidas como secundarias, que funcionan como las galvánicas cuando están en uso; pero que se pueden regenerar (“recargar”) invirtiendo la reacción de celda por medio de la aplicación de energía eléctrica (Perry, 1992, págs. 4-93).

## 2.2. Electrólisis

La electrólisis es una tecnología muy importante en la electroquímica mediante la cual se provoca un cambio químico en un líquido por la intervención de la energía eléctrica, la misma se introduce mediante la aplicación de una diferencia de potencial entre los elementos conductores (electrodos) que se encuentran sumergidos en el líquido, en donde se provoca la reacción química, este debe ser conductor y contener sustancias capaces de oxidarse o reducirse. La diferencia de potencial genera un paso neto de corriente eléctrica (electrones) entre los electrodos, con la consiguiente oxidación de algunas especies en la superficie de alguno de los electrodos (ánodo) la reducción de otras en el (cátodo) (Barrera, 2014).

El electrodo negativo presenta un exceso de  $e^-$ , se comporta como reductor, pues cede dichos electrones a un ion positivo que carezca de ellos. Igualmente, el polo positivo de una celda electrolítica actúa como oxidante, capturando los  $e^-$ , de exceso que posean los iones negativos. Los metales son considerados como conductores de primera, ya que poseen  $e^-$  libres que pueden moverse entre los átomos con facilidad (Mondragón, 2005).

## 2.3. Reacciones Electroquímicas

Abarca fenómenos de dos tipos: eléctricos y químicos. Sin embargo, todo proceso químico entraña una reagrupación de partículas cargadas, núcleos atómicos y electrones y por lo tanto, los fenómenos químicos y eléctricos constituyen, hablando en rigor, un todo único. Así pues, la noción de electroquímica como una rama de las ciencias químicas es menos amplia de lo que podría deducirse de su propia denominación. Para determinar el área de los fenómenos que estudia la electroquímica es indispensable considerar las diferencias que existen entre las reacciones químicas y las electroquímicas (Damaskín & Petri, 1981, pág. 9).

Con lo cual podemos definir que “Las reacciones electroquímicas son las de reducción-oxidación conocidas como redox, las cuales se basan en transferencia de electrones entre un



conjunto de especies químicas, en las cuales se presentará una especie oxidante y una reductora, que a su vez alcanzarán una forma reducida y una forma oxidada respectivamente". (Gil Pavas, 2008, pág. 4).

Según lo anterior para que se lleve a cabo este tipo de reacciones debe haber una especie que ceda sus electrones y otra que los acepte. El reductor es la especie química que tiende a ceder electrones de su estructura química al medio, quedando con carga mayor a la que tenía, mientras, el oxidante es la especie que tiende a captar esos electrones, quedando con carga menor. (Gil Pavas, 2008, pág. 4).

Una reacción electroquímica presentada la siguiente ecuación general (Rajeshwar & Ibañez, 1997):



En donde:

O, es la especie oxidada

R, es la especie reducida

$\eta e^-$ , el número de electrones transferidos por mol

Los dos procesos más importantes que rigen el comportamiento de este tipo de reacciones son (Rajeshwar & Ibañez, 1997) :

- Transporte de masa: es el movimiento de masa desde la solución a la superficie del electrodo, debido a diferencias en el potencial eléctrico (migración), químico (difusión) y por el movimiento global del líquido.
- Transferencia de electrones: existe una contribución de cada densidad de corriente parcial (anódica y catódica) a la densidad de corriente total, esta corriente de intercambio junto al sobre potencial afecta la velocidad de la reacción, pues a mayor corriente circulando mayor será la velocidad de reacción.

#### 2.4. Potenciales de Oxidación – Reducción

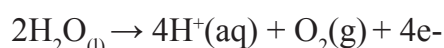
El potencial de reducción de una sustancia es la tendencia de los átomos para aceptar  $e^-$ , es decir, se refiere a que tan fácilmente se reducen estos átomos. El potencial de una sustancia cualquiera se especifica en relación con otra sustancia, tomada como patrón. La unidad internacional para expresar el potencial eléctrico es el voltio por ejemplo, para el sistema, de Zn y H, el voltímetro muestra que hay una diferencia de potencial de 0,76V este valor corresponde a la reacción de oxidación del Zn, simbolizado como  $\epsilon^0 \text{Zn/Zn}^{2+} = 0,76\text{V}$ . El potencial de reducción es el mismo valor:  
 $\epsilon^0 \text{Zn/Zn}^{2+} = -0,76\text{V}$  (Mondragón, 2005).

La corriente eléctrica que se genera en una celda electroquímica es consecuencia de la diferencia de potencial que se establece entre los electrodos ( $\Delta\epsilon$ ) y se conoce como fuerza

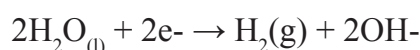
electromotriz ( $\epsilon_0$ ) de la celda. Un valor positivo de  $\epsilon_0$  significa que la sustancia se reduce más fácilmente que los iones  $H^+$ . Un valor negativo significa que la sustancia se reduce con más dificultad que los iones  $H^+$  (Mondragón, 2005).

En una celda simple de electrocoagulación donde solo hay un ánodo y un cátodo los cuales son hechos de un metal  $M$ , se presentan en general las siguientes reacciones electroquímicas (Mollah M., y otros, 2004).

En el ánodo se presentan las siguientes reacciones de oxidación (Mollah M., y otros, 2004):

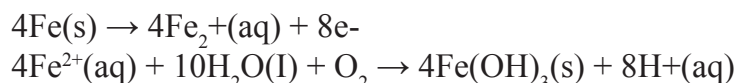


En el cátodo se presentan las siguientes reacciones de reducción (Mollah M., y otros, 2004):

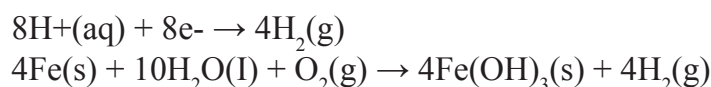


Si los electrodos son de hierro se espera la formación de  $Fe(OH)_n$  y polihidróxidos como:  $Fe(H_2O)_6^{3+}$ ,  $Fe(H_2O)_5(OH)^{2+}$ ,  $Fe(H_2O)_4(OH)_2^+$ ,  $Fe_2(H_2O)_8(OH)_4^{2+}$ ,  $Fe_2(H_2O)_6(OH)_4^{4+}$ . A continuación se presenta el mecanismo general de reacción cuando los electrodos son de hierro y  $n=3$  (Mollah M., y otros, 2004).

En el ánodo:



En el cátodo:



## 2.5. Leyes de la Electrólisis o de Faraday

Michael Faraday, Físico y Químico, ejecutó varios estudios cuantitativos concerniente a la íntima relación que existe entre la cantidad de electricidad que atraviesa una solución. Estos postulados relacionan la cantidad de electricidad consumida o generada durante un proceso electroquímico con la masa de los reactivos presentes (Arbeláez, 2005).

### 2.5.1. Primera ley de Faraday

Algunos metales como el Na, Mg o Al se producen industrialmente por electrólisis de sus sales fundidas. En el proceso se consumen grandes cantidades de electricidad, que pueden relacionarse matemáticamente con la cantidad de producto formado sobre los electrodos de la celda electrolítica. Por ejemplo, en la electrólisis del NaCl, el ion sodio se reduce según la reacción:  $Na^+ + 1e^- \rightarrow Na$ . Así, un electrón es requerido para reducir un ion de sodio. Es decir, para reducir un mol de iones  $Na^+$ , equivalente a 23 gr, se necesita un mol de  $e^-$ .

La carga de un electrón es  $1,602 \cdot 10^{-19}$  Coulombios (C) y la carga de un mol de electrones es:  $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C/e} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ e/mol} = 96.500 \text{ C/mol}$ . La relación entre la cantidad de cargas invertidas en la producción de una determinada masa de producto se resume en la primera ley establece que: “la masa de producto obtenido o de reactivo consumido en un electrodo durante la electrólisis, es directamente proporcional a la cantidad de electricidad en culombios, que pasa a través del electrólito” (Arbeláez, 2005).

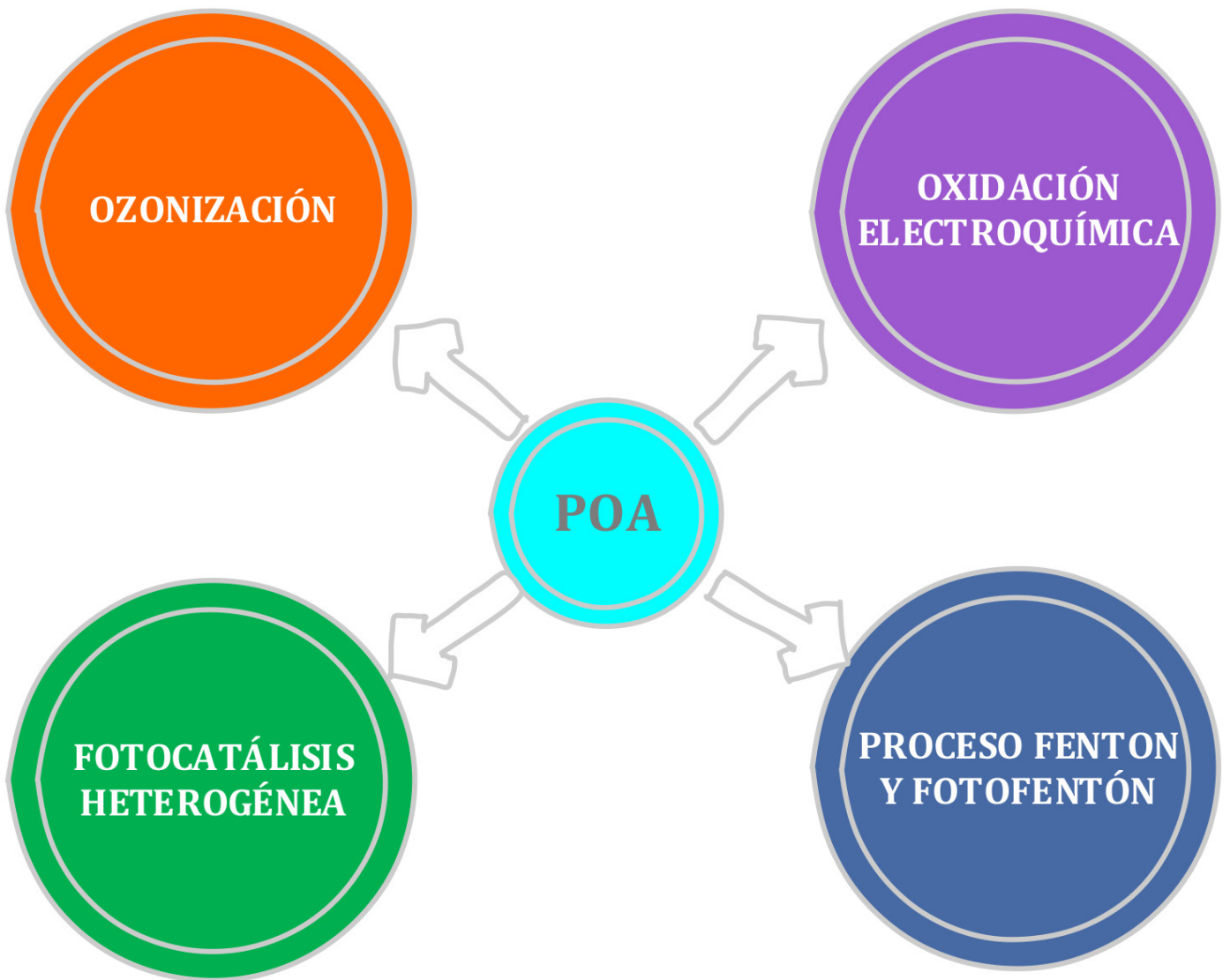
### 2.5.2. Segunda ley de Faraday

Establece que si varias soluciones electrolíticas son atravesadas por la misma cantidad de electricidad, las masas, de las sustancias depositadas o liberadas en los electrodos son proporcionales a sus masas equivalentes (eq) de los electrolitos disueltos. Las dos leyes de Faraday se cumplen para los electrolitos tanto fundidos como en solución. Su validez no se altera por variaciones de temperatura, presión, naturaleza del solvente y del voltaje aplicado (Mondragón, 2005).

Existen muchos métodos que se aplican para depurar efluentes con contaminantes con color siendo los de la industria textil un problema complejo de resolver. Los tratamientos de tipo biológico son utilizados con frecuencia en esta industria, estos pueden ser de tipo aerobio o anaerobio. Estos reducen hasta cierto límite los parámetros como la DBO, DQO, fenoles, metales etc; se obtienen mejores resultados cuando se combinan con otros tratamientos avanzados como adsorción con carbón activado. Sin embargo, el efecto sobre la porción del color del efluente que se debe a colorantes textiles es generalmente escaso, debido a que algunos de los colorantes son adsorbidos durante los tratamientos biológicos. Este efecto es muy limitado en la remoción de colorantes reactivos hidrolizados (Mondragón, 2005).

Los tratamientos terciarios que se emplean en la remoción de colorantes generalmente no son suficientemente eficaces para reducir al mínimo el contenido de contaminantes más persistentes, por lo que se hace necesario introducir otros de tratamientos que logren este objetivo. Como los procesos de oxidación avanzada.





## **CAPÍTULO 3**

### **PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA**



## 3. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA

### 3.1. Definición

Los procesos de oxidación avanzada (POA), son aplicados en agua residual que tiene baja biodegradabilidad y una alta estabilidad química como es el caso de los colorantes.

Dentro de los procesos de oxidación avanzada se encuentran los siguientes procesos (Osorio Robles, Torres Rojo, & Sánchez Bas, 2011, pág. 47):

- Procesos de degradación fotoquímica (UV/O<sub>3</sub>), (UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)
- Fotocatálisis (TiO<sub>2</sub>/UV), reactivos foto-Fenton)
- Procesos de oxidación química O<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup>

De acuerdo a la figura 1, se detalla la clasificación de los procesos de oxidación avanzada, procesos homogéneos con aporte de energía o sin ella y en procesos heterogéneos (Osorio Robles, Torres Rojo, & Sánchez Bas, 2011, pág. 48).

Según (Osorio Robles, Torres Rojo, & Sánchez Bas, 2011, pág. 47), los POA tienen la misma característica química que consiste en la producción de radicales OH• los cuales son especies muy reactivas que actúan sobre la mayoría de las moléculas orgánicas, y son de baja selectividad.



Las principales ventajas de las AOP respecto a los métodos tradicionales las principales son (Forero, Ortiz, & Rios, 2005):

- Transforman y destruyen químicamente el contaminante hasta la mineralización.
- En general, no generan subproductos que requieran posterior procesamiento.
- Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
- Operan en rangos donde los sistemas convencionales no son factibles.
- Son ideales para preparar las corrientes a tratamientos convencionales. Aumentan la biodegradabilidad.

## 3.2. Clasificación de los POA

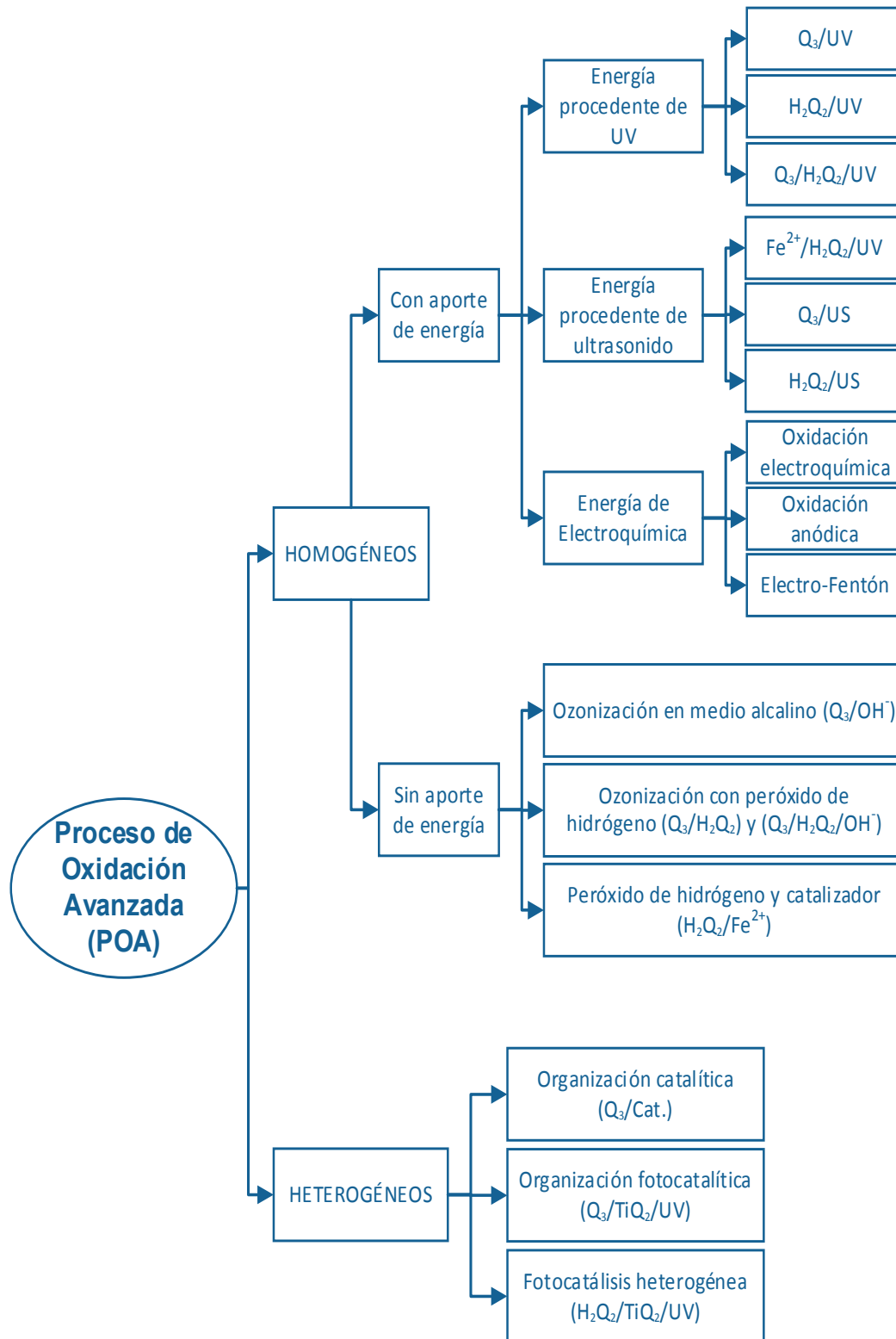


Figura 1. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada (POA).  
Fuente: Elaboración propia a partir de F. Osorio, 2014



### 3.3. Ventajas

Entre las ventajas de la oxidación avanzada se encuentran la potencialidad de eliminar altas cargas de carbono orgánico y la capacidad de actuar sobre matrices complejas de distintos contaminantes gracias a su carácter no-selectivo. Son procesos basados en la destrucción de contaminantes y no en un mero traslado del contaminante a otra fase, y si bien pueden producir lodos, lo hacen en una menor cantidad que los procesos biológicos convencionales. Permiten además la transformación de contaminantes tóxicos en otros productos menos refractarios que luego pueden ser tratados biológicamente. Son procesos de gran versatilidad, en ocasiones muy sencillos de operar y que en su mayoría se producen a temperatura ambiente, aunque existen desarrollos más intensivos como la oxidación húmeda (Wet Air Oxidation) o supercrítica, un sistema derivado del reactivo Fenton que opera a temperaturas y presiones elevadas (Sanz, Lombraña, & Luis, 2013).

### 3.4. Desventajas

Por el contrario, una de las principales desventajas de estas tecnologías es su intensidad energética, lo que las convierte en ocasiones en una alternativa costosa(29), en especial si el objetivo es la oxidación total (mineralización) de los contaminantes. En ocasiones la presencia de compuestos oxidantes remanentes en la reacción como el peróxido o los catalizadores pueden tener efectos adversos, tanto porque pueden conferir mayor toxicidad al medio o aumentar los costes de recuperación, respectivamente. En contraste con el alto número de investigaciones y de patentes desarrolladas la oxidación avanzada no ha tenido hasta la fecha una implantación real en el tratamiento de efluentes contaminados, siendo éste uno de sus retos a futuro (Sanz, Lombraña, & Luis, 2013).





## **CAPÍTULO 4**

### **FUNDAMENTOS DE ELECTROCOAGULACIÓN**



## 4. FUNDAMENTOS DE ELECTROCOAGULACIÓN

### 4.1. Fundamentos teóricos

La electrocoagulación presenta una larga historia en la tecnología de tratamiento de aguas, en 1909 fue patentada en el Reino Unido. (Barrera, 2014), la define como un proceso eficiente para desestabilizar finalmente las partículas en agua natural o en la residual, usualmente se utiliza electrodos de aluminio o de hierro, y al aplicar la corriente eléctrica los ánodos producen iones de aluminio  $Al^{3+}$  o de hierro  $Fe^{2+}$  estos iones son muy buenos coagulantes y pueden hidrolizarse cerca del ánodo para producir una serie de intermediarios activados que son capaces de desestabilizar las partículas dispersas que se hayan presentes en el agua, luego de la desestabilización se produce una aglomeración de partículas formando flóculos. En cambio en el cátodo se generan pequeñas burbujas de hidrógeno lo que permite que floculo flote facilitando la separación de las partículas del agua residual.

(Lavorante, Álvarez, Chantrill, & Fasoli, 2011), indican que cuando los iones metálicos formados por oxidación del ánodo reaccionan con  $OH^-$  producidos en el cátodo por reducción del  $H_2O$  a  $H_2$ . El hidróxido formado (rigurosamente, un óxido hidratado generalmente de hierro o aluminio trivalentes) actúan como agentes floculantes y adsorbentes del contaminante. Hay dos mecanismos propuestos para la formación anódica del hidróxido, siempre con formación de hidrógeno en el cátodo. En el primero de ellos, el hierro se oxida a  $Fe^{2+}$  y éste, por acción del oxígeno del aire, se hidroliza dando  $Fe(OH)_3$ . Según el otro mecanismo, el  $Fe^{2+}$  forma  $Fe(OH)_2$  el que posteriormente se oxida a  $Fe(OH)_3$ .

Barrera, (2014) manifiesta que las técnicas electroquímicas no solo son comparables con otras tecnologías en término de costo sino que resultan más eficientes y compactas. El tratamiento electroquímico aplicado para aguas residuales remueve contaminantes orgánicos e inorgánicos, los contaminantes se destruyen por oxidación directa o indirecta del proceso. Cuando se tiene oxidación anódica directa en primer lugar son adsorbidas sobre el ánodo y luego son destruidos debido a una reacción de transferencia electrónica anódica. En cambio cuando se tiene oxidación indirecta se produce una destrucción de los contaminantes por la oxidación generada por adición de un agente oxidante como hipoclorito, ozono, peróxido de hidrógeno de acuerdo a Janssen, 2002.

(Piña–Soberanis, y otros, 2011) en la revista Mexicana de Ingeniería Química, hacen un estudio de las reacciones en los procesos de electrocoagulación en el cual indica que los iones liberados durante la electrocoagulación forman largas cadenas de poli hidróxidos, los cuales son diferentes a los formados en la coagulación convencional cuando se añaden sales químicas, debido a que tienen diferente estructura hidratada. Esta situación permite retirar, retener y desecar con mayor facilidad los lodos residuales. Los flocs formados de esta forma son menos hidratados, conteniendo menos agua ligada y por lo tanto se compactan más fácilmente.

Durante la formación de los hidróxidos metálicos, la generación de los iones está acompañada de la concentración electroforética de partículas alrededor del electrodo, las cuales neutralizan su carga coagulando. La corriente aplicada obliga a los iones  $\text{OH}^-$  a migrar hacia el ánodo, por lo que el pH en la capa límite es más alto que en el resto de la solución, lo que favorece la formación de hidróxidos del metal del electrodo (Piña–Soberanis, y otros, 2011).

El hidróxido formado remueve los contaminantes presentes en el agua por complejación o atracción electrostática. Adicionalmente, en la proximidad de los electrodos el aumento de la concentración de los hidróxidos con carga positiva atrae aniones como los bicarbonatos y los sulfatos que propician la precipitación del calcio y el magnesio, originando así un ablandamiento parcial del agua. Los mecanismos de remoción en electrocoagulación incluyen oxidación, reducción, coagulación, absorción, adsorción, precipitación y flotación (Piña–Soberanis, y otros, 2011).

Los iones  $\text{Al}^{3+}$  ó  $\text{Fe}^{2+}$  son coagulantes muy eficientes para la floculación de partículas, por lo que en electrocoagulación (EC) son frecuentemente utilizados electrodos de hierro o de aluminio. Los iones de aluminio hidrolizado pueden formar largas cadenas de  $\text{Al-O-Al-OH}$  las cuales pueden adsorber químicamente una gran cantidad de contaminantes. El aluminio es normalmente usado para el tratamiento de agua potable y el hierro para el tratamiento de aguas residuales. En el caso del hierro, el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  forma un coloide café rojizo y dependiendo del pH y de la disponibilidad de iones ferrosos, puede reaccionar con el oxígeno disuelto para dar  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , (Piña–Soberanis, y otros, 2011).

#### 4.2. Reacciones que se llevan a cabo en la Electrocoagulación

Las reacciones químicas que se llevan a cabo en el ánodo son las siguientes (Piña–Soberanis, y otros, 2011):

Para ánodo de aluminio:  $\text{Al} - 3e \rightarrow \text{Al}^{3+}$

En medio alcalino:  $\text{Al}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3$

En medio ácidos:  $\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$

Para ánodo de hierro:  $\text{Fe} - 2e \rightarrow \text{Fe}^{2+}$

En medio alcalino:  $\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$

En medio ácido:  $4Fe^{2+} + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe^{3+} + 4OH^-$

La electrólisis del agua produce oxígeno e hidrógeno de la siguiente forma:

En el ánodo:  $2H_2O - 4e \rightarrow O_2 + 4H^+$

En el cátodo es:  $2H_2O + 2e \rightarrow H_2 + 2OH^-$

Un reactor de electrocoagulación es una celda electroquímica donde el ánodo metálico generalmente de aluminio y algunas veces de hierro, como en ésta investigación, se usa para dosificar al agua contaminada un agente coagulante. La electrocoagulación produce cationes metálicos in situ, en lugar de dosificarlos externamente. Se puede observar en las Figuras 3 y 4.

Simultáneamente, se generan gases electrolíticos, especialmente hidrógeno, en el cátodo. La electrocoagulación tiene la capacidad de remover un amplio rango de contaminantes incluyendo sólidos suspendidos, metales pesados, colorantes, materia orgánica, grasas, aceites, iones y radionúclidos. Las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes influyen e interactúan en el sistema de remoción de contaminantes, por ejemplo, los iones son probablemente electros precipitados, mientras que los sólidos suspendidos son absorbidos por el coagulante (Barrera, 2014).

En general, durante un tratamiento por electrocoagulación se presentan los siguientes procesos:

- Reacciones electrolíticas en la superficie del electrodo.
- Formación de coagulantes en la fase acuosa por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio.
- Desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y rompimiento de la emulsión.
- Los coagulantes absorben a los contaminantes solubles o coloides y se remueven por sedimentación o por flotación.
- Adición de las fases desestabilizadas para formar floc.

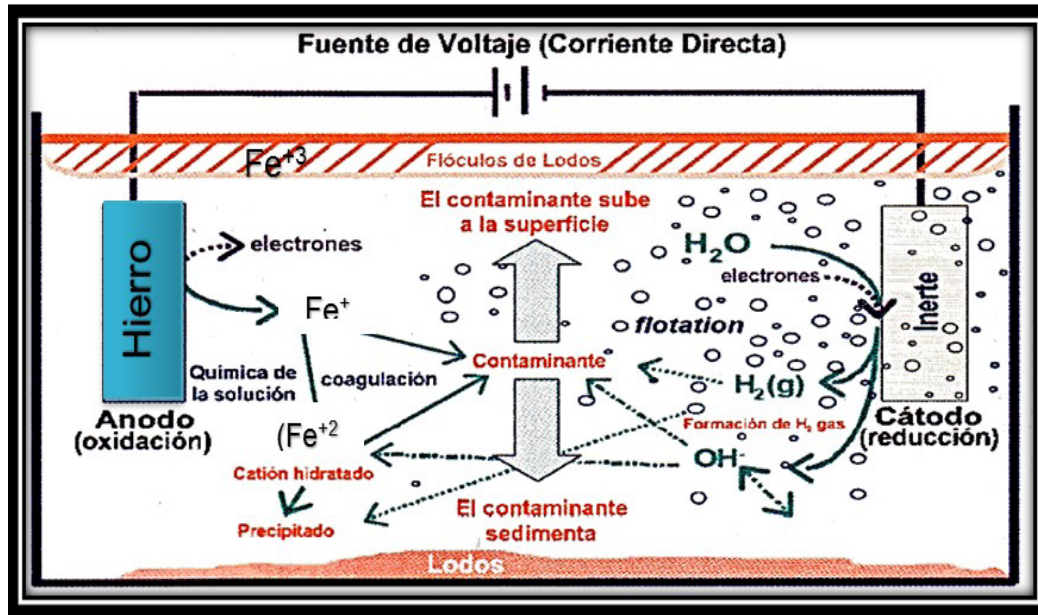


Figura 3. Remoción de contaminantes con electrodo de Hierro  
Fuente: Adaptado de Barrera, 2014

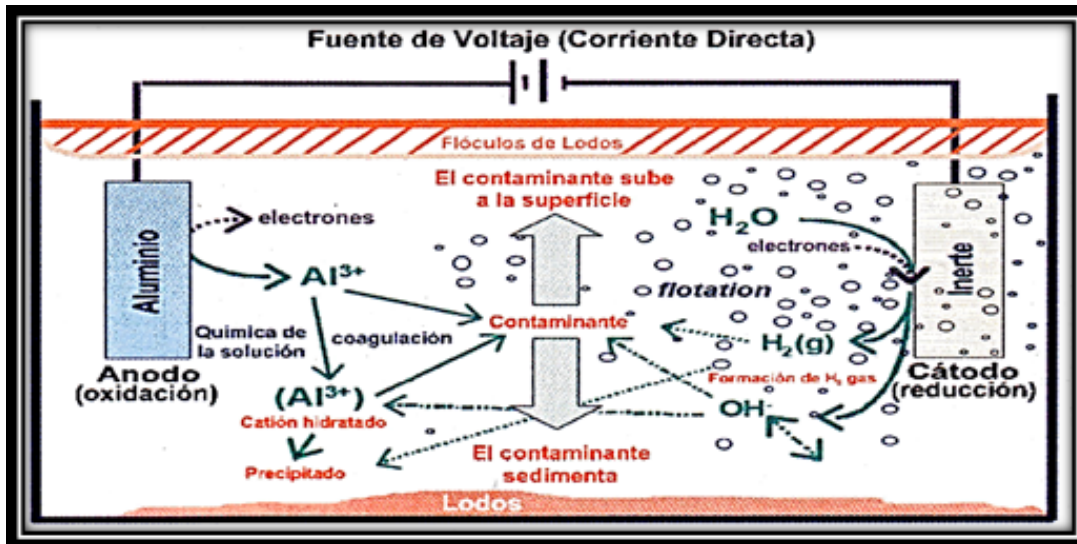


Figura 4. Remoción de contaminantes con electrodo de aluminio.  
Fuente. Barrera, 2014

### 4.3. Factores que afectan la electrocoagulación.

Barrera (2014) distingue seis factores que afectan a la electrocoagulación son: densidad de corriente, concentración de cloruros, efecto del pH, tipo de material de electrodo, efecto de la temperatura, diseño del reactor.



- **Densidad de corriente o carga**

El suministro de corriente a un sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{2+}$  liberados por los electrodos respectivos. Para el aluminio, la masa equivalente electroquímica es 335,6 mg/Ah (miligramos/amperio horas) para el hierro es 1041mg/Ah. Una corriente grande significa una unidad pequeña de electrocoagulación y, además, existe la posibilidad de gastar energía eléctrica calentando el agua (Arroyo Núñez, 2011, pág. 28).

Para que el sistema de electrocoagulación opere por un largo periodo de tiempo sin mantenimiento se sugiere que la densidad de corriente se mantenga entre 20-25 A/m<sup>2</sup>. La selección de la densidad de corriente debe realizarse en conjunto con otros parámetros de operación, como valores de pH, temperatura y flujo, para asegurar una alta eficiencia de corriente (Arroyo Núñez, 2011, pág. 28).

- **Conductividad**

Un incremento en la conductividad eléctrica, genera un incremento en la densidad de corriente, cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación, adicionalmente, el incremento de la conductividad manteniendo la densidad de corriente constante, produce una disminución del voltaje aplicado.

La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o  $\text{CaCl}_2$  generan un aumento en la conductividad del agua residual, adicionalmente se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{=}$  pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos, que aumentaría el potencial entre los electrodos decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl<sup>-</sup> alrededor del 20% (Arango-Ruíz, 2014, pág. 91).

- **Temperatura**

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a 60°C punto donde se hace máxima, para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo (Arango-Ruíz, 2014, pág. 91).

- **Efecto pH**

El efecto pH en el agua residual para los procesos de electrocoagulación se refleja en la eficiencia de corriente, así como en la solubilidad de hidróxidos metálicos. El pH de trabajo depende mucho de la naturaleza de los contaminantes; sin embargo, se ha encontrado que las eficiencias de corrientes del aluminio son más altas a condiciones ácidas o alcalinas que a condiciones neutras.

Los electrodos de hierro se han usado en aguas residuales caracterizadas por presentar

coloración y de giro textil, se han empleado influentes alcalinos logrando alta remoción de color y demanda química de oxígeno. Las mejores eficiencias de remoción de contaminantes reportadas utilizando electrodos de aluminio son cercanas a un pH neutro (Arroyo Núñez, 2011, pág. 29).

#### • Tipo de material de los electrodos

Los materiales que se suelen emplear en la electrocoagulación son aluminio y hierro. La configuración de los electrodos, generalmente es en forma de platos de aluminio o hierro; se ha encontrado que la principal aplicación de los electrodos de aluminio es para el tratamiento de aguas, debido a su alta eficiencia en la autogeneración de agentes coagulantes.

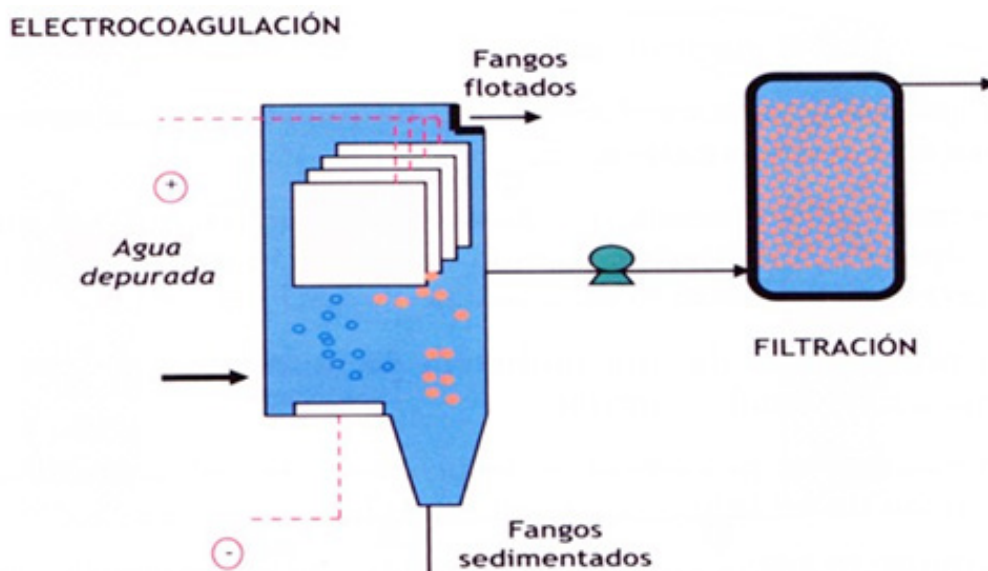


Figura 5. Esquema de un proceso de electrocoagulación.

Fuente: Barrera. 2014

En el proceso de electrocoagulación figura 5, existen muchos tipos de celdas electroquímicas, de acuerdo a (Barrera, 2014) su clasificación atiende a diferentes criterios:

- Dirección de flujo de agua residual
- Modo de circulación
- Tipo de conexión eléctrica
- Finalidad de la celda

En base a la dirección de flujo en la celda, los reactores se clasifican en flujo horizontal y vertical, de acuerdo a la Figura 6.

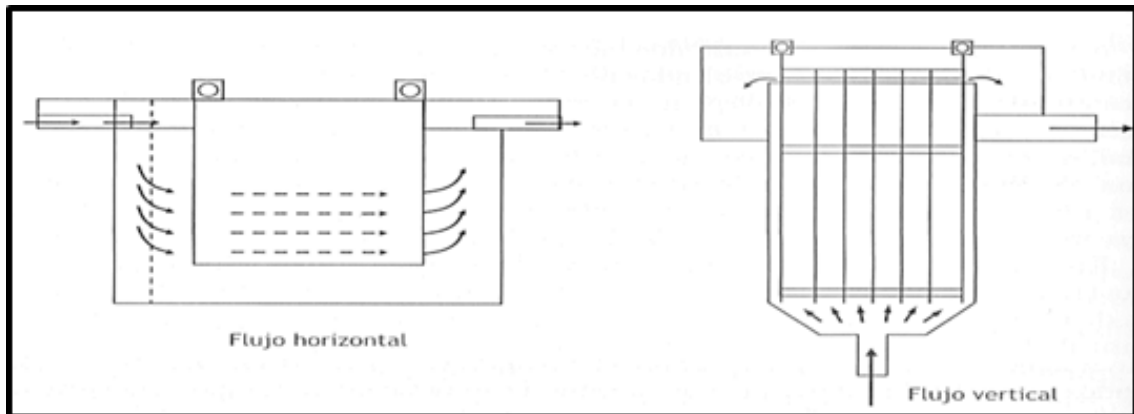
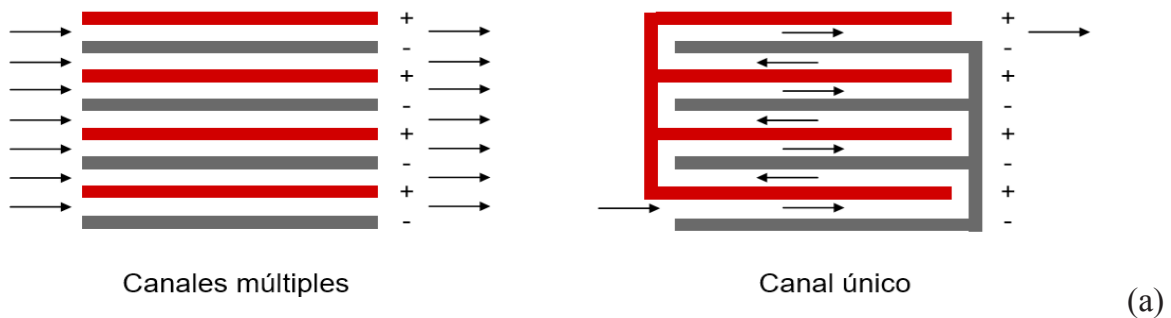
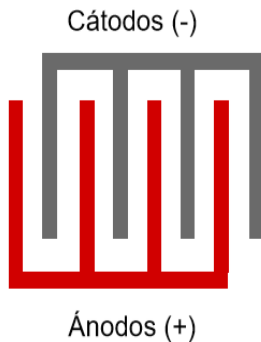


Figura 6. Tipos de flujo hidráulico en reactores de coagulación.  
Fuente. Barrera, 2014.

En lo que respecta al modo de circulación del agua entre los electrodos existen celdas de canales múltiples y de un solo canal, como se puede observar en la Figura 7. La de canales múltiples en muy sencilla su disposición, pero tiene la desventaja que debido al pequeño flujo de electrolitos en cada uno de los canales, esta disposición favorecería al fenómeno de pasivación de los electrodos (a). En lo referente al tipo de conexión electrónica, los reactores se pueden clasificar en monopolar y bipolar (b).



Configuración monopolar



Configuración bipolar

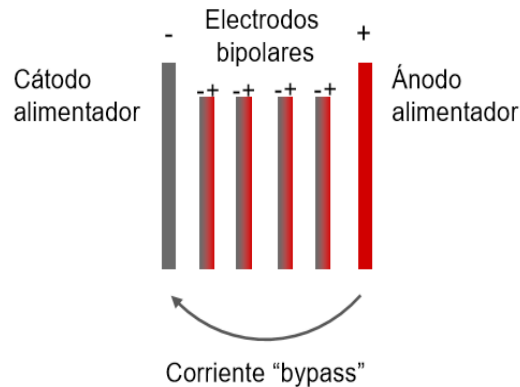


Figura 7. Configuraciones de celdas de electrocoagulación.  
Fuente. (Barrera, 2014).

(b)

#### 4.4. Ventajas

A continuación las Ventajas en electrocoagulación (Barrera, 2014):

- Las burbujas producidas durante la electrocoagulación tienen mayor estabilidad que las generadas en los tratamientos de efluentes con flotación de aire comprimido y de flujo de aire disuelto, por lo que conservan su gran superficie de contacto y por tanto, aumenta la eficiencia de remoción.
- Este tratamiento electroquímico provoca una mejor y rápida ruptura de las emulsiones, comparado con los equipos convencionales para separación de aceites.
- La cantidad de lodos generados son menores que para otros métodos tradicionales, ya que se efectúa de manera simultánea flotación y coagulación.
- Permite la reducción de una amplia variedad de contaminantes, como: metales pesados, grasa y aceites, materia orgánica, fosfatos y cianuros.
- Sus costos de operación son relativamente bajos si se realiza un apropiado diseño del reactor, selección de los materiales para electrodos, y una optimización de los parámetros de funcionamiento. Este proceso requiere poca corriente eléctrica y bajos costos de mantenimiento.
- El líquido separado por electrocoagulación puede ser reprocesado como subproducto, lo cual permite que el efluente tratado pueda ser reutilizado.
- Los equipos para electrocoagulación son compactos y fáciles de instalar, factores que son muy apreciables cuando no se dispone de espacio suficiente.
- Este proceso es sencillo de automatizar debido a que el control de dosificación se realiza mediante el ajuste de corriente.

#### 4.5. Desventajas

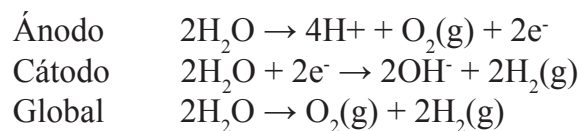
Entre las desventajas de la electrocoagulación se encuentran requerimientos como el reemplazo periódico del electrodo de sacrificio, y que el agua tenga una conductividad mínima

diferente de cero que varía según el diseño del reactor lo que limita su uso en aguas con baja cantidad de sólidos disueltos. En el caso de la remoción de componentes orgánicos se puede formar compuestos orgánicos tóxicos al emplear el método de electrocoagulación. También como una desventaja se encuentra la formación de una película de óxido impermeable en el cátodo que interfiere con el buen desempeño de la celda, este efecto se puede disminuir cambiando la polaridad de la celda. Los costos de operación de la celda de electrocoagulación pueden ser altos donde los costos de la electricidad sean altos (Barrera, 2014).

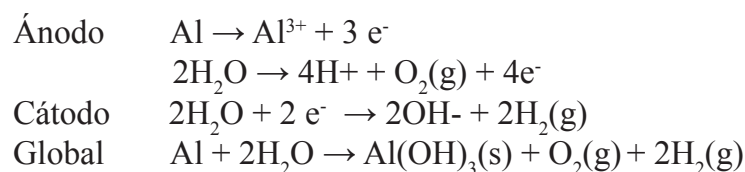
#### 4.6. Electroflotación

Es un proceso complejo, ya que el tamaño de las burbujas producidas por electroflotación viene principalmente influenciado por la superficie de los electrodos, del material de electrodo y de su posición en la serie electromotriz. También en función del pH en medios ácidos las burbujas de hidrógeno son mayores que en pH neutros o alcalinos. Además de igual forma depende de la curvatura de la superficie en algunas geometrías de electrodos. Las burbujas arrastran a las partículas hacia la superficie del tanque, donde son recolectadas por un sistema de captación que cuenta con canaletas, las cuales conducen a las partículas o los contaminantes hacia un tanque externo en el que es posible concentrar los contaminantes o las partículas sólidas de interés para su posterior procesamiento. El agua tratada que está en el fondo se bombea a otro tanque para su posterior uso (Barrera, 2014).

Los electrodos empleados para la electroflotación son materiales inertes, como el platino, el grafito, el titanio o el acero al carbón. Los cuales se pueden utilizar como ánodo o cátodo, indistintamente, dependiendo de su aplicación en cada caso. Generalmente, la electroflotación se produce cuando hay una electrolisis del agua, y como resultado se producen pequeñas burbujas de oxígeno e hidrógeno a través de las reacciones.



Sin embargo, el proceso de electroflotación también puede ocurrir simultáneamente con el proceso de electrocoagulación, ya que ocurren las reacciones, cuando se emplean ánodos de sacrificio como el Fe y el Al:



Los iones aluminio que se generan se hidrolizan para formar hidróxidos y polihidróxidos dependiendo del pH de la solución acuosa. Los hidróxidos de aluminio o hierro que se

forman en solución tienen una gran capacidad para remover contaminantes de tamaño coloidal. Adicionalmente, las burbujas de gas que se forman debido a la electrolisis provocan la flotación de los contaminantes y es por ello que, en muchas ocasiones, los fenómenos de electrocoagulación, electrofloculación y electroflotación se llevan a cabo de manera simultánea (Barrera, 2014) .



# CAPÍTULO 5

## FUNDAMENTOS DE ADSORCIÓN





## 5. FUNDAMENTOS DE ADSORCIÓN

### 5.1. Fundamentos teóricos

Otra operación que también se aplica con buenos resultados es la adsorción, proceso por el cual átomos o moléculas de una sustancia que se encuentra en determinada fase, son retenidos en la superficie de otra sustancia, que se encuentra en otra fase. Como resultado de este proceso, se forma una capa de líquido o gas en la superficie de una sustancia sólida o líquida.

La adsorción en carbón activado es un proceso donde un sólido es utilizado para eliminar una sustancia soluble del agua. En este proceso el carbón activo es el sólido. El carbón activo se produce específicamente para alcanzar una superficie interna muy grande (entre 500 - 1500 m<sup>2</sup> /g). Esta superficie interna grande hace que el carbón tenga una adsorción ideal. El carbón activo viene en dos variaciones: Carbón activado en polvo (PAC) y carbón activado granular (GAC). La versión de GAC se utiliza sobre todo en el tratamiento de aguas residuales.

La operación unitaria adsorción se realiza sobre una superficie de un sólido adsorbente mediante la acumulación de una sustancia en una fase líquida o gaseosa (absorbible o adsorbato). Una capa de moléculas de soluto se acumula sobre la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales. (Ramalho, 2014). En el interior de un sólido, las moléculas están rodeadas totalmente por moléculas similares es decir están sujetas a fuerzas equilibradas tal como lo indican las fuerzas en la Figura 8.

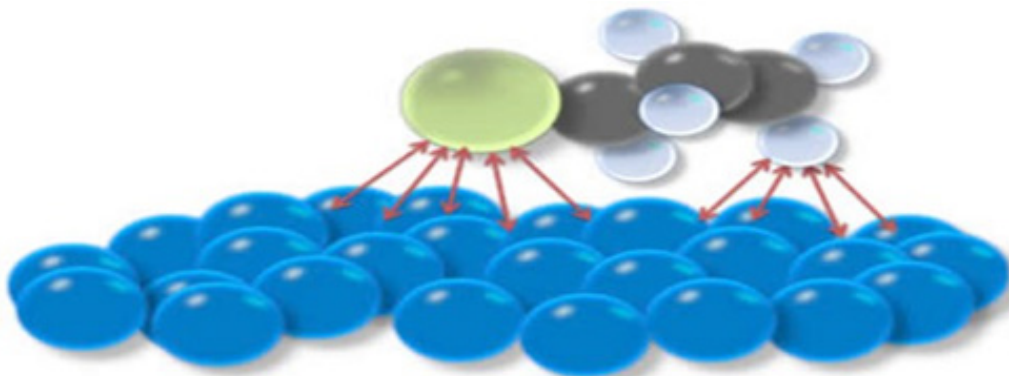


Figura 8. Representación de las fuerzas en un soluto  
Fuente. <http://www.chemvironcarbon.com/es/carbon-activo/adsorción>

Las moléculas que se encuentran en la superficie están sometidas a fuerzas no equilibradas ya que estas fuerzas residuales son lo suficientemente elevadas lo que hace que puedan atrapar moléculas de un soluto que se haya en contacto con el sólido este fenómeno se denomina adsorción física (o de Van der Waals).

Por ejemplo el carbón activado, el sólido se denomina adsorbente y el objetivo a adsorber se denomina adsorbato. La capacidad de adsorción es función de la superficie total del adsorbente, ya que cuanto mayor sea esta superficie, se dispone de mayor número de fuerzas no equilibradas para la adsorción.

Los carbones activados, por su gran porosidad, son usados ampliamente como adsorbentes en las operaciones industriales de purificación y de recuperación química, que se debe a su extensa área superficial, entre 500 y 2 000m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, su gran volumen de poro y la presencia de grupos funcionales superficiales, en especial, grupos oxigenados (Catellar, Angulo, Zambrano, & Charris, 2013).

En el equilibrio de adsorción existe una proporción definida de soluto repartida entre las dos fases, líquida y sólida. La forma habitual de expresar esta distribución es la capacidad de equilibrio ( $q_e$ ), definida como:

$$q_e = (C_o - C_e)/W v$$

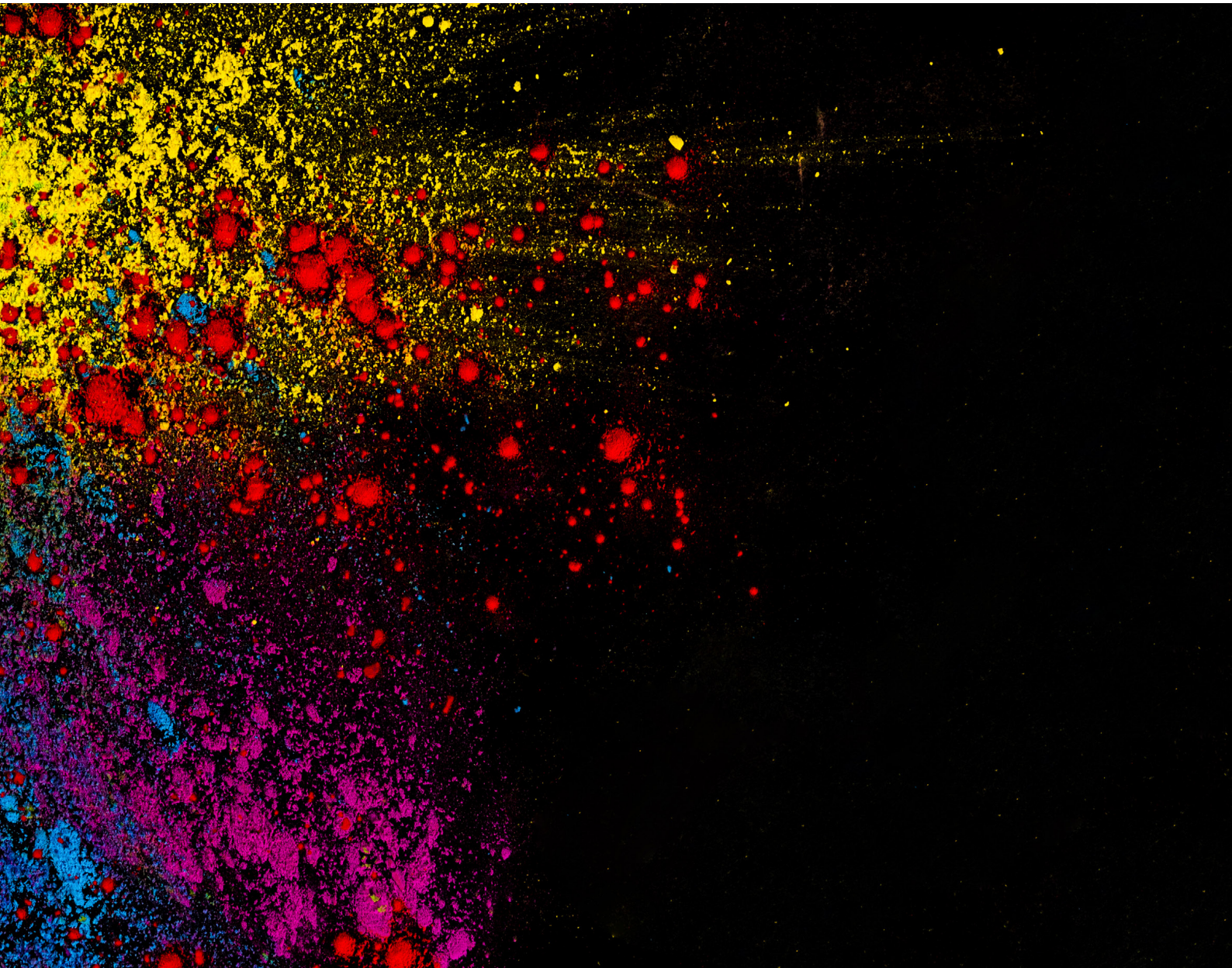
Siendo  $q_e$  la capacidad de equilibrio, que informa de la concentración de adsorbato en fase sólida,  $C_o$  es la concentración inicial de adsorbible en fase líquida,  $C_e$  es la concentración de adsorbible en fase líquida en el equilibrio,  $V$  es el volumen de disolución y  $W$  es la masa de adsorbente. Las isothermas de adsorción son curvas construidas a partir de pares ( $C_e, q_e$ ) a una temperatura constante. Pueden ocurrir varios tipos de relaciones isotérmicas de adsorción. Brunauer propuso, para adsorción en fase gas, cinco tipos de isothermas empleando los mecanismos de adsorción en función de las presiones relativas a las que ocurren. Sin embargo, en 1960 Giles propuso un sistema de clasificación de las isothermas de adsorción en disolución, empleándolas como diagnóstico de los mecanismos a través de los cuales ocurren. Divide las isothermas de adsorción en cuatro clases de acuerdo con la pendiente de la parte inicial de la curva y denominadas atendiendo a su forma. Así, las tipo “S” (S – shape), son aquellas en las que se produce una adsorción cooperativa. Esto es, a medida que aumenta la concentración en equilibrio aumenta la capacidad del sólido por retener el adsorbato (aumenta la pendiente a medida que aumenta la concentración); esto ocurre cuando se dan tres condiciones: la molécula de adsorbato es (a) mono funcional, (b) presenta una atracción intermolecular intermedia, y encuentra una competencia importante por los sitios activos por parte de las moléculas de disolvente o de otras especies adsorbidas. Las isothermas tipo “L” (Langmuir), son las más comunes ya que a medida que aumenta la concentración en equilibrio en la fase fluida el número de centros activos disponibles disminuye, hasta llegar a una meseta que representa que el sólido ya no puede retener más adsorbato; esto implica que o bien las moléculas de adsorbato no se adsorben orientadas verticalmente o bien que no hay competencia con el disolvente por los centros activos. Las curvas tipo “H” (High affinity), son aquellas en las que el adsorbente tiene una gran afinidad por el adsorbato lo que ocasiona que aún a muy pequeñas concentraciones adsorba una cantidad significativa; se pueden considerar un caso especial de curvas tipo “L”. Finalmente, las curvas tipo “C”

(Constant) se caracterizan por una proporción de centros activos constantes, es decir, muestran un comportamiento intermedio entre la del tipo “S” y la tipo “L” y se encuentran en sistemas donde el soluto penetra en el sólido más fácilmente que el disolvente. Este último tipo de curvas aparece en sistemas con sólidos porosos con moléculas flexibles y regiones con diferentes grados de cristalinidad, y con un soluto con más afinidad por el sólido que la que presenta el disolvente, y con dimensiones tales que pueda penetrar en regiones del sólido que todavía no hayan sido alcanzadas por el disolvente.

Las isothermas de adsorción pueden ser ajustadas y reproducidas a través de los denominados modelos de adsorción. Éstos no son más que diferentes relaciones entre la concentración en equilibrio en la fase fluida ( $C_e$ ) y la concentración en equilibrio en la fase sólida superficial ( $q_e$ ).

Todos los modelos enunciados a continuación, se describen aplicados a condiciones líquidas. Sin embargo, su uso también está recomendado para fase gas. Asimismo, se describen los modelos para adsorción de compuestos puros; la mayoría de estos modelos se pueden extender a isothermas de adsorción multicomponente, tanto los predictivos como los empíricos. Además existen otros modelos de uso exclusivo para adsorción multicomponente. La Teoría de la Solución Ideal Adsorbida (Ideal Adsorbed) (Meztanza, 2012) .





# **CAPÍTULO 6**

## **COLORANTES**



## 6. COLORANTES

### 6.1. Estudio de Colorantes

(Barrera, 2014, pág. 204) en su libro “Aplicaciones Electroquímicas al Tratamiento de Aguas Residuales”, hace referencia a Panizza, 2009, Desoky, 2010 y Cruz-Gonzales 2010, sobre las propiedades de los colorantes sintéticos por su resistencia a la abrasión, la estabilidad fotolítica o la resistencia al ataque químico y biológico. Todo esto hace que los colorantes se mantengan inalterables durante largos periodos de tiempo y su presencia en el agua causa fenómenos como eutrofización, baja oxigenación, alteración de color y olor, lo cual los hace persistentes y bioacumulables. Todo esto hace que los colorantes no se puedan destruir mediante tratamiento convencional. Investigaciones recientes han mostrado una gran eficiencia de oxidación de colorantes sintéticos en aguas residuales, al utilizar electrofenton y métodos electroquímicos que promueven la mineralización total.

La electrocoagulación constituye una alternativa distinta desde el punto de vista económico así como también medioambiental para el tratamiento de residuos industriales, comerciales y municipales, cuyos costos de operación son menores que la coagulación química (Russell, 2012).

Cortazar Martínez, Coronel Olivares, Escalante Lozada, & González Ramírez, (2013), han demostrado que ciertos colorantes azo pueden ser carcinogénicos y mutagénicos, además de que sus productos de degradación pueden resultar más tóxicos. La toxicidad de colorantes se ha evaluado utilizando diversos bioindicadores como *Daphnia magna*, *Salmonella thymimurium* y peces. Además, se han realizado ensayos en ratas e incluso se ha hecho monitoreos biológicos a trabajadores de la industria textil.

Hasta la fecha, se han aplicado procesos de neutralización al inicio de los tratamientos de efluentes con colorantes con el objeto de conseguir una precipitación química al añadir un reactivo muy común como la cal viva ( $\text{CaO}$ ). Esta cal neutraliza el exceso de acidez y precipita algunos de los colorantes de tipo aniónico. Luego se procede a realizar una coagulación floculación mediante reactivos como: sulfato de aluminio, cloruro férrico, hidróxido férrico e hidróxido de aluminio; los cuales, además de eliminar colorantes aniónicos, remueven la materia coloidal presente en el efluente. La oxidación con hipoclorito de sodio es una técnica muy empleada y que resulta económica, pero se ha demostrado que puede generar compuestos organoclorados, los cuales son cancerígenos que resultan aún más tóxicos y más difíciles de biodegradar que los colorantes.

En los últimos años se han ensayado diversas tecnologías para el tratamiento de este tipo de efluentes. No obstante, muy pocas de ellas han sido aplicadas a escala industrial, debido al alto costo implicado en su uso. Esta situación, sin embargo, deberá cambiar a medida que la protección al ambiente se vuelva más relevante y, por ende, aumenten las restricciones legales al vertido de sustancias contaminantes. Entre las últimas tecnologías utilizadas comercialmente esta la coagulación con compuestos catiónicos poliméricos, y la filtración

con membranas o utilizando osmosis inversa; además de los métodos de oxidación, ya sea con ozono o a través de procesos de oxidación avanzada. Y los métodos electroquímicos, que son los propuestos en esta investigación (Colindres, 2010)

## 6.2. Definición de Colorantes

Los colorantes (o materiales para teñir) suele ser compuestos orgánicos que sirven para dar color a diversas sustancias, entre otras las siguientes: fibras animales, vegetales o sintéticas y productos similares (tales como lana, seda, algodón, lino, rayón, nailon, papel, cuero o pieles), u otros materiales (como aceites, ceras, caucho o plásticos) (Kirk & Othmer, 2007).

El color es un aspecto de gran importancia a nivel comercial, se ofrece ropa con todo tipo de colores y tonos, incluso las comidas están decoradas con colores, así como también las medicinas, por lo que gran cantidad de investigaciones están orientadas a obtener nuevos colorantes, en la actualidad hay más de diez mil tintes disponibles comercialmente (Zollinger, 1978).

Se conocen alrededor de 100000 colorantes comerciales y más de 700 000 toneladas métricas se producen anualmente, de las cuales, 35 000-70 000 se descargan en las aguas residuales (Catellar, Angulo, Zambrano, & Charris, 2013).

Los colorantes pueden ser productos naturales, extraídos de plantas y animales o bien de síntesis industrial mediante una reacción química a gran escala. Los colorantes sintéticos comenzaron a producirse en el siglo XIX. El primero de ellos fue el denominado “negro de anilina”, motivo por el cual todavía algunos se refieren a los colorantes sintéticos como “las anilinas” (Textil, 2012).

Por otro lado a partir de derivados del petróleo se obtienen los colorantes sintéticos con características superiores a la de los colorantes naturales, en lo referente a las propiedades físico-químicas así como, también por las ventajas funcionales en relación a su aplicación luego del teñido. Estos colorantes presentan resistencia a la degradación (Textil, 2012).

Los colorantes textiles pueden contener en su composición sustancias tóxicas, así como los efluentes de la industria textil tienen efectos tóxicos y pueden ser carcinogénicos, mutagénicos o teratogénicos en varios organismos (Barreda-Reyes, Ortega-López, Ortega-Regules, Santiago-Santiago, & Netzahuatl-Muñoz, 2015). Por lo tanto, el tratamiento de efluentes industriales que contienen colorantes y sus metabolitos es necesario para su descarga final sin contaminantes al medio ambiente.

Los pigmentos textiles se definen en forma sencilla como colorantes insolubles. Por esta razón su aspecto físico a temperatura ambiente es la de un polvo coloreado, generalmente, finamente dividido. La diferencia entre los pigmentos y los colorantes, es que los primeros son sólidos a temperatura ambiente e insoluble en agua. Por sus características de insolubi-



lidad, los pigmentos son empleados para ser depositados sobre el sustrato textil y adheridos a él por medio de un ligante, en la técnica de estampación (Textil, 2012).



Figura 9. Colorantes.

Fuente. Foto, Elvia Moreno Posadas/Archivo CIENCIA UNAM

Los cromóforos son uno de los grupos de átomos responsables del color, entre los cuales los más comunes son los azo ( $-N=N-$ ), carbonilo ( $C=O$ ), metilo ( $-CH_3$ ), nitro y grupos quinoides. En la Figura 9 se muestran ejemplos de algunos colorantes que presentan estos grupos cromóforos. Los colorantes también pueden contener otros grupos que incrementan la intensidad del color y que pueden ser de tipo reactivo, ácidos, directos, básicos, dispersos, aniónicos, sulfuros, entre otros (Cortazar Martínez, y otros, 2012).

Una sustancia colorante tiene por lo menos dos grupos presentes en su molécula: el grupo cromóforo y el grupo auxocromo. A los compuestos que contienen un grupo cromóforo se denomina cromógeno. Algunos grupos de átomos que presentan uno o más enlaces insaturados y que su presencia es la responsable de generar el color al compuesto, se los denomina cromóforos.

Los colorantes azo son colorantes orgánicos que se usan en muchas aplicaciones, como la tinción de telas, muchos de ellos son derivados del compuesto orgánico azo benceno,  $C_{12}H_{10}N_2$  (Brown, LeMay, Bursten, & Burdge, 2004, pág. 361). Son los más consumidos en este sector. Aproximadamente corresponden al 70% de los colorantes empleados actualmente para teñir materiales textiles, de piel, cosméticos y alimentos. Estos colorantes son compuestos químicos caracterizados por la presencia de uno ó mas grupos azo ( $-N=N-$ ). Se consideran compuestos xenobióticos recalcitrantes a los procesos biodegradativos, debido a su alta estabilidad a la luz y al ataque microbiano (Qayyum, 2006). Son resistentes a la biodegradación aerobia en procesos convencionales y bajo condiciones anaerobias se lleva a cabo la reducción del colorante originando subproductos conocidos como metabolitos

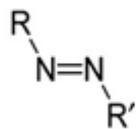
(aminas aromáticas), algunas altamente carcinogénicas que presentan graves problemas de toxicidad ocasionando una severa contaminación de ríos y agua subterránea (Moeller Chávez, 2000)

(Cortazar Martínez, Coronel Olivares, Escalante Lozada, & González Ramírez, 2013), ha demostrado que ciertos colorantes azo pueden ser carcinogénicos y mutagénicos, además de que sus productos de degradación pueden resultar más tóxicos. La toxicidad de colorantes se ha evaluado utilizando diversos bioindicadores como *Daphnia magna*, *Salmonella thyphimurium* y peces. Además, se han realizado ensayos en ratas e incluso se ha hecho monitoreos biológicos a trabajadores de la industria textil.

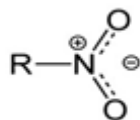
Los colorantes nitro, son compuestos aromáticos o heterocíclicos que contienen un grupo cromóforo nitro ( $-\text{NO}_2$ ) en orto o para con respecto a un grupo auxocromo, el cual es ordinariamente un hidroxilo o un amino aril-sustituido. El grupo nitro es cromóforo mucho más débil que el grupo nitroso (Kirk, Othmer, & Scott, 1962, pág. 377)

A continuación se muestran como ejemplos al grupo azo y al grupo nitro.

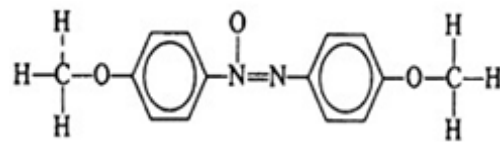
GRUPO AZO [ $-\text{N}=\text{N}-$ ]



GRUPO NITRO [ $-\text{NO}_2$ ]



GRUPO AZOXI [ $-\text{N}_2\text{O}-$ ]



Los colorantes inorgánicos se denominan colorantes térreos o minerales y se obtienen por vía natural (minas) o artificial (síntesis química). Son compuestos metálicos de diferente color (por ejemplo, ocre, rojo de óxido de hierro, amarillo de cromo, azul de ultramar, azul cobalto, etc.). Se caracterizan por ser insolubles en agua, y reciben la denominación de pigmentos. En la tintura de textiles, los pigmentos se utilizan de forma muy limitada debido a su insolubilidad en agua, pero se emplean ampliamente por la técnica de estampación Serigráfica (Textil, 2012).

Los colorantes orgánicos se los encuentra en forma de pigmento o de colorantes. Su forma de obtención natural ha sido casi completamente desplazada por la fabricación por síntesis química. Los colorantes y pigmentos sintéticos, como productos de reacción del enorme sector de la química orgánica, constituyen el grupo de los productos coloreados más utilizados en la industria textil. Mientras que en la química de los colorantes se suele establecer una división de los colorantes y pigmentos de acuerdo con su constitución, es decir, según el grupo funcional al que pertenezcan (por ejemplo; azoicos, de trifenilmetano, de antraquinona, de oxazina), en la práctica es mucho más útil el criterio de clasificación basado en las

propiedades técnicas y funcionales (Textil, 2012).

No se dispone de ningún colorante ideal, que satisfaga sobre todos los materiales, cualquier exigencia de aplicación y solidez al uso. Esto significa que los colorantes sólo aportan una cantidad de virtudes limitadas, es decir algunos sólo tiñen las fibras celulósicas, mientras otros son aptos para teñir fibras proteicas o para fibras sintéticas. Aparte de ello, sus características de solidez pueden ser muy variables entre las distintas familias. Esto explica la gran cantidad de colorantes y pigmentos existentes en el mercado. Es por eso que se hizo necesario que exista un compendio de todos los colorantes existentes clasificados e identificados individualmente mediante una convención de alcance internacional, por lo que apareció el color index el mismo que se edita en el Reino Unido por la Society of Dyers and Colourists y en USA, la American Association of Textile Chemists and Colourists. Cada colorante posee un nombre genérico y un número de clasificación. El nombre genérico es un código que contiene tres elementos: familia de colorante, color y un número de identificación. A continuación un ejemplo: CI Vat Blue 1. de

CI: color index , Vat: colorantes a la tina (familia) Blue: azul (color), 1 número identificación (Textil, 2012).

A continuación en la Tabla 1, se muestra la clasificación de los principales colorantes textiles y en la Tabla 2 se especifican las diferentes combinaciones con su grado de fijación de colorante/fibra.

Tabla 1. Clasificación de los colorantes textiles.

Clasificación Química	Clasificación de Uso o Tintórea Azoicos
Antraquinónicos	Ácidos
Heterocíclicos	Básicos
Indigoides	Dispersos
Derivados de ftalocianina	Reactivos
Polimsetínico	A la cuba
Estilbénicos	Sulfurosos
Sulfurosos	Azoicos sobre fibra
Trifenilmetánicos	Pigmentos

Fuente: Industrial Dyes, Chemistry, Properties, Application, (Wiley, 2003).

Tabla 2. Grado de fijación para diferentes combinaciones colorante/fibra.

Clase de colorante	Fijación típica %	Sustrato
Ácido	80- 93	lana, nylon
Básico	97-98	acrílico
Directo	70-95	celulosa
Disperso	80-92	sintéticas
Premetalizados	95-98	lana
Reactivos	50-80	celulosa
Sulfurosos	60-70	celulosa
A la cuba	80-95	celulosa

Fuente: Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Application; (Wiley, 2003)

El efluente de las industrias textiles lleva un gran número de tintes y otros aditivos que se añaden durante el proceso de coloración (Wang, Yediler, Linert, Wang, & Kettrup, 2002). Estos son difíciles de eliminar en procedimientos convencionales de tratamiento de agua y se pueden transportar fácilmente a través del agua especialmente porque están diseñados para tener alta solubilidad.

### 6.3. Tipos de Colorantes textiles

#### Colorantes Ácidos

Presentan una afinidad con las fibras proteínicas y son las más empleadas en el teñido de la lana. La mayoría no agotará sobre fibras celulósicas, pero debido a que se asemejan a los tintes directos en cuanto a su composición química. Hay un grupo de ellos que tiñe de celulosa bastante bien. También resultan afines con las fibras de poliamina.

Estos colorantes se unen a las fibras por puentes de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals y enlaces iónicos. Su estructura química es compleja pero tiene largas cadenas aromáticas, con grupos aminos o sulfónicos que los hacen solubles en agua.

La mayoría pueden ser de los siguientes tipos:

- Antraquinónicos
- Azos
- Trifenilamínicos

Son de naturaleza aniónica y su aplicación ocurre en baños fuertemente ácidos a neutros (Lockuán, 2012).

#### Colorantes Básicos

Son generalmente hidrocloruros de sales o bases orgánicas. Los cromóforos se encuentran en el catión, por lo cual se suele llamarlos tintes catiónicos. Debido a su baja solidez a la luz, éstos fueron prácticamente discontinuados hasta que se descubrió que servían para teñir fibras acrílicas. En la práctica, las fibras celulósicas no son afines con los tintes básicos. Los tintes pueden aplicarse a la celulosa si las fibras son mordentadas antes del teñido; sin embargo rara vez se aplican estos tintes al algodón. En el caso de la fibra de proteína, existe evidencia de que su afinidad es de naturaleza química (Lockuán, 2012).

### **Colorantes Directos**

Son solubles en agua y se unen al algodón por atracción química (puentes de Hidrógeno y fuerzas de Van der Waals). Existe afinidad del hidrógeno de la molécula del colorante a los grupos hidroxilo de la celulosa. Después de que el colorante se disuelve en el agua, se añade sal para controlar el porcentaje de absorción del colorante por la fibra. No son tan caros y están disponibles en una gran variedad de tonos (Lockuán, 2012).

La clasificación según SDC (Society of Dyers and Colourists)

- Clase A: Colorantes autoigualables a causa de una buena migración del colorante a la fibra. Aun cuando el teñido inicial parezca mal igualado, el colorante es capaz de redistribuirse a medida que avanza la operación de teñido. No requieren ningún producto para corregir su buena igualación.
- Clase B: Colorantes que no son autoigualables. Tienen escaso poder migratorio y deben ser aplicados con cuidado, pues es difícil corregir la mala igualación inicial. Se controlan mediante adiciones de sal, ésta se agrega gradualmente comenzando con cantidades pequeñas que se van incrementando a cada adición.
- Clase C: Colorantes de muy escaso poder migratorio. No igualan con adiciones sistemáticas de sal, siendo necesario además un control estricto de la temperatura. Son los colorantes que ofrecen las mayores dificultades en el teñido. Como regla general, al realizar bicromías y tricromías, deben trabajarse colorantes de la misma clase, y a lo sumo, de clases contiguas (mezcla de A y B o de B y C, mas no de A y C).

La clasificación según la cantidad de carbonato presente en el baño

- Colorantes que tiñen en baño neutro
- Colorantes que tiñen en baño débilmente ácido
- Colorantes que tiñen en baño alcalino (Lockuán, 2012).

### **Colorantes Reactivos**

Los colorantes reactivos se adhieren a la fibra de celulosa formando una fuerte liga química (enlace covalente). Estos colorantes fueron desarrollados en los años cincuenta como un proceso económico para lograr una solidez al color aceptable en fibras celulósicas (Lockuán, 2012).

Generalmente se componen de dos elementos fundamentales:

- Parte cromófora: Determina principalmente el matiz del colorante. Los diferentes matices de la gama de los colorantes reactivos se consiguen con la presencia de diversos grupos cromóforos. Aquí aparecen, además, los grupos solubilizantes ( $-\text{SO}_3\text{Na}$ ) que le confieren solubilidad en medio acuoso y los sustituyentes que le confieren sustantividad a las fibras celulósicas.
- Parte auxócroma (reactiva): Es responsable, en primer lugar del tipo y velocidad de reacción entre la fibra celulósica y el colorante (Lockuán, 2012).

Existen diversas maneras de clasificar a los colorantes reactivos:

- Según su nivel de reactividad
  - Colorantes de baja reactividad (aplicados en caliente a 80–98°C para lograr su fijación)
  - Colorantes de reactividad media (se fijan a 60°C)
  - Colorantes de alta reactividad (necesitan temperaturas más bajas, de 30 – 50°C para fijarse)
- Según el compuesto que forman con la celulosa
  - Colorantes que forman ésteres de celulosa
  - Colorantes que forman éteres de celulosa (Lockuán, 2012).

### **Colorantes a la Tina**

Son colorantes que tienen entre sí diferente constitución química pero todos son insolubles en agua. Por su reducción en un medio alcalino se transforman en leucoderivados hidrosolubles. El proceso de reducción se fundamenta en la acción reductora del hidrógeno sobre el grupo carbonilo, transfiriéndolo al grupo alcohólico. En este estado se aplica sobre el sustrato y luego se le oxida para insolubilizarlo nuevamente, pero esta vez ya dentro de la fibra. Existen dos grandes grupos: los derivados del índigo y los derivados de la antraquinona (Lockuán, 2012).

### **Colorantes al Azufre (Sulfurosos)**

Reciben este nombre porque en su molécula está presente el azufre. Su proceso es parecido al de los colorantes tina; tiñen las fibras en estado reducido y se oxidan para volverse insolubles. Al igual que los colorantes tina, también son insolubles en agua pero solubles en medio alcalino y en presencia de sulfuro de sodio como agente reductor. Se usan para lograr un negro muy oscuro a bajo costo. Para evitar que desprendan ácido sulfúrico durante su almacenamiento, se trata el sustrato con acetato sódico, sin lavado posterior, y se seca (Lockuán, 2012).

### **Colorantes Naftoles**

La esencia del teñido con estos colorantes consiste en tratar el sustrato con disoluciones alcalinas de las anilidas de ácidos fenolcarboxílicos que han de actuar como componentes copulables a fin de que las fibras los fijan para ser transformadas posteriormente (sobre la

misma fibra) en el verdadero colorante mediante el tratamiento con una disolución de sal de diazonio.

Los colorantes naftol están disponibles en colores brillantes a bajo costo, pero sus requisitos de aplicación limitan su uso. Se utilizan para el teñido de fibras celulósicas cuando se requiere que su solidez al agua y su brillantez sean comparativamente buenas a un costo razonable. Ofrecen resultados satisfactorios especialmente en el espectro del amarillo, anaranjado y rojo. Se les ha aplicado a fibras de proteínas, pero se pueden obtener resultados igualmente buenos con tintes ácidos mediante métodos más simples (Lockuán, 2012).

### **Colorantes Dispersos**

Surgieron de la necesidad de encontrar una manera fácil y satisfactoria para teñir el acetato. Son suspensiones de compuestos orgánicos finamente divididos con muy baja solubilidad. Las fibras hidrofóbicas, como el acetato de celulosa (secundaria o terciaria) y las fibras sintéticas con frecuencia se teñirán mejor con tintes insolubles que con aquellos que se disuelven en agua. Un baño de teñido con colorantes dispersos contiene al colorante en tres estados: colorante en solución, colorante en miscelas y colorante sólido. Sólo el colorante en solución es absorbido por la fibra. El colorante disperso se fija en la fibra mediante fuerzas físicas o llamadas fuerzas de Van der Waals, ya que no poseen iones o cargas eléctricas (Lockuán, 2012).

### **Colorantes Pre-Metalizados**

Fueron desarrollados para poder teñir directamente la lana sin necesidad de recurrir al mordentado en una etapa de tratamiento posterior. Se aplican con mayor rapidez, son fáciles de combinar y en algunos colores tienen más brillo que los colorantes mordentables. La molécula del colorante es una estructura típica monoazo, conteniendo grupos adicionales hidroxilos, carboxilos o aminos, capaces de formar complejos con metales de transición como el cromo, cobalto, níquel y cobre (Lockuán, 2012).

La clasificación de los colorantes pre-metalizados está basada según el número de moléculas de colorante que forman complejo con el ión metálico, pueden ser:

- Pre-metalizados 1:1. Donde una molécula de colorante forma complejo con un ión de metal.
- Pre-metalizados 2:1. Donde dos moléculas de colorante forman complejo con un ión metálico (Lockuán, 2012).

**Colorante de la Investigación realizada**

Nombre del colorante utilizado en la investigación azul mno reactivo en combinación con vinil sulfónico conocido comercialmente como azul reactivo 250, mencionado en la Tabla 3 y Figura 10.

Tabla 3. Características químicas del Colorante Reactivo Azul Marino (mno)

Fórmula
Tetrasodium 4-amino-5-hydroxy-6-[[2-methoxy-5-[[2-(sulphonatooxy)ethyl]sulphonyl]phenyl]azo]-3-[[4-[[2-(sulphonatooxy)ethyl]sulphonyl]phenyl]azo]naphthalene-2,7-disulphonate
Estructura molecular
<p>Fórmula molecular: <math>C_{27}H_{23}N_5Na_4O_{20}S_6</math>            Peso molecular 1021.8421            Número de registro 93951-21-4            CAS No.: 93951-21-4.            EINECS No.: 300-644-5 Textil química. Tipo: Colorantes reactivos ... etiqueta: Reactiva azul 250 100%   colorantes textiles y productos químicos</p>

Fuente: [http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_EN\\_CB4904557.htm](http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB4904557.htm)

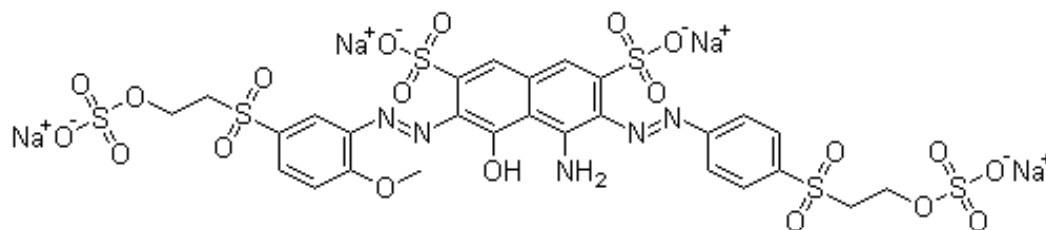


Figura 10. Estructura molecular de Colorante Reactivo Azul

Fuente: [http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_EN\\_CB4904557.htm](http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB4904557.htm)





## **CAPÍTULO 7**

### **REMOCIÓN DE COLORANTE MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN Y ADSORCIÓN**



## 7. REMOCIÓN DE COLORANTE MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN Y ADSORCIÓN

### 7.1. Remoción de colorante

En la actualidad los colorantes y pigmentos están siendo considerados como sustancias que presentan ciertas características toxicológicas más allá de los impactos ambientales negativos que contienen sus aguas residuales.

Entre las investigaciones recientes se los identifica a los colorantes dependiendo de sus propiedades físico químicas de sus moléculas, lo cual ayuda a su remoción, eliminación y mineralización de los mismos. El conocimiento de la sinética de remoción de los contaminantes contribuye a que se pueda realizar una mejor operación de las tecnologías físico químicas y biológicas ya sea de forma individual o combinadas (Barrios, Gaviria, Agudelo, & Cardona, 2015).

Dentro de estas aplicaciones se encuentra la electrocoagulación, la fotocatalisis, la ozonación, Fenton/UV, etc., y además también se utilizan procesos biológicos los que pueden ser aeróbicos o anaeróbicos.

### 7.2. Tipo y diseño de investigación.

Esta investigación aplicada pertenece al campo de la Contaminación Ambiental, teniendo como área específica la físico química, con aplicación de la electroquímica y la adsorción. La línea de investigación es la remoción de colorante refractario en muestras sintéticas de efluentes industriales.

En cuanto al alcance, la investigación fue planificada y comparativa; mientras que, en relación al diseño, fue experimental y transversal (Figura 11)

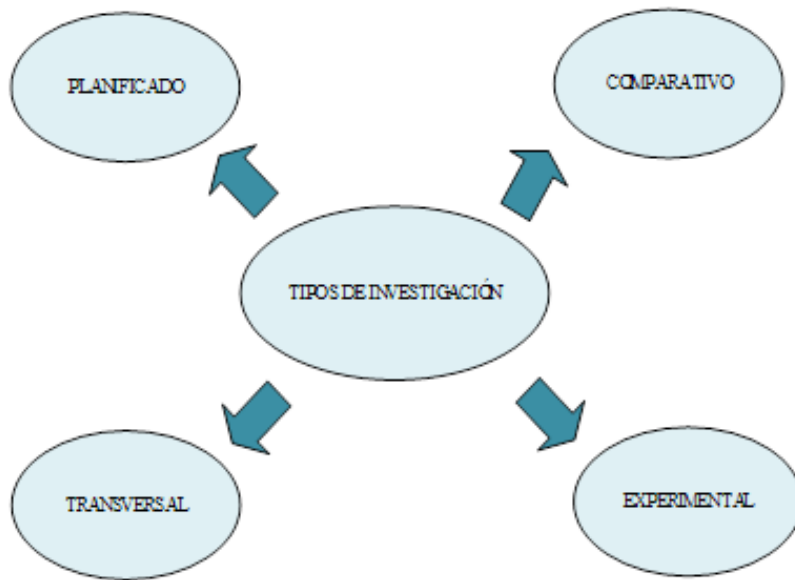


Figura 11. Tipo y diseño de investigación  
Fuente. (Bermeo, 2017).

**Planificado:** se realizó una planificación de la toma de datos en cada una de las corridas en los equipos y las experimentaciones

**Comparativo:** se comparó los datos antes y después de las aplicaciones de los equipos de electrocoagulación y de adsorción. Lo que facilitó la comparación entre las dos técnicas.

**Experimental:** hubo manipulación de las variables independientes. Se midieron los efectos de las variables independientes sobre la variable dependiente.

**Transversal:** se tomaron muestras en un período de tiempo determinado.

Las experimentaciones se realizaron con una muestra sintética de efluente de textil a diferentes condiciones de operación en celdas de electrocoagulación seguida de adsorción. Se experimentó el efecto sobre las variables dependientes por la acción o manipulación de las variables independientes. Para lo cual se planificó la toma de datos primarios que tienen como objetivo su evaluación.

De acuerdo a los niveles de investigación este proyecto reúne condiciones metodológicas de: descriptivo, relacional, explicativo y aplicativo. Figura 12.

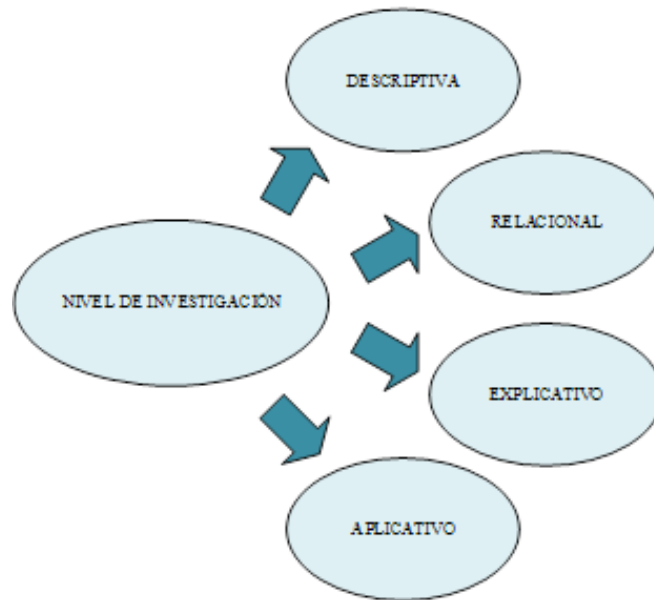


Figura 12. Niveles de investigación  
Fuente. (Bermeo, 2017).

**Descriptiva:** se seleccionó las características principales de la investigación y se realizó una descripción detallada de los contaminantes del agua residual industrial y de los métodos de depuración a aplicar.

**Relacional:** se estudió la relación entre las variables de estudio DQO y color.

**Explicativa:** se explicó el comportamiento de una variable en función de otra. Se estudió causa efecto y su control, en esta se descarta asociaciones aleatorias.

**Aplicativa:** se planteó resolver un problema en la que se enmarca innovación técnica industrial, se evaluaron los procesos tecnológicos de electrocoagulación y adsorción.

Las experimentaciones se efectuaron en el Laboratorio de Aguas y Planta Piloto de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guayaquil. La investigación tomó más de dos años con planificación de la pruebas en equipo de electrocoagulación y de adsorción, con la realización de análisis de control al inicio y al final de cada experimentación. La unidad de análisis corresponde a las concentraciones de los compuestos refractarios antes y después de las corridas experimentales. Los muestreos se realizaron en cada etapa de las experimentaciones.

Dentro de la unidad de observación se tiene los parámetros de control del sistema de electrocoagulación y Adsorción como: pH, intensidad eléctrica, conductividad, tiempo, color y DQO.

En las unidades se trabajó con variaciones en los sistemas de operación, las mismas que

ocurrieron frente a estímulos que correspondieron a los cambios de las condiciones de operación del equipo de electrocoagulación y adsorción. Se efectuaron medidas luego de los cambios, las mismas que reflejaran los efectos de la intervención.

El propósito del estudio fue determinar la técnica más eficiente para eliminar los colorantes refractarios derivados del azul mno de aguas residuales de la industria textil mediante la aplicación de tecnologías avanzadas como electrocoagulación y adsorción, realizando comparaciones estadísticas de los métodos para lo cual se aplicó herramientas informáticas como Minitab versión 17, Excel.

### **7.3. Caracterización de agua residual**

Conociendo que las descargas de las industrias textiles presentan diferentes tipos de desechos colorantes se procedió a muestrear tres fabricas con similares características y se elaboró una muestra compuesta a fin de tener una muestra homogénea con parámetros como color, DQO, turbiedad, pH entre otros, que sirvieron de base para elaborar el agua residual sintética con una concentración de colorantes que simulan a las aguas residuales reales.

A continuación, una caracterización del agua residual sintética preparada en base a agua residual industrial real, que puede ser utilizada para las diferentes experimentaciones con el equipo de electrocoagulación y el de adsorción con carbón activado.

Tabla 5. Parámetros para caracterización de muestra sintética de efluente textil.

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límites máximos Permisibles(a)
Potencial de Hidrógeno	pH		6-9
Temperatura	T	°C	Condición natural $\pm 3$
Color real		Pt/Co	Inapreciable en dilución 1/20
Demanda Química de oxígeno	DQO	mg/l	200
Demanda Bioquímica de Oxígeno(5 días)	DBO <sub>5</sub>	mg/l	100
Sólidos suspendidos	SS	mg/l	130
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>=2</sup>	mg/l	1000
Sulfuro	S <sup>=2</sup>	mg/l	0.5
Aceites y grasas	Solubles en hexano	mg/l	30
Compuestos fenólicos	fenol	mg/l	0.2
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	0.5
Cadmio	Cd	mg/l	0.02
Cromo Hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	mg/l	0.5
Hierro	Fe	mg/l	10

Fuente: Tomado del Acuerdo Ministerial 097, 04/11/2015

#### 7.4. Proceso de experimentación

El proceso de experimentación inicia con la técnica de recolección de datos que corresponde al Método experimental lo cual permite manipular variables y ver efectos que produce comparando resultados y observando el más óptimo.

Con la caracterización de la agua residual sintética se procede a realizar las experimentaciones en triplicado y en lote, lo que permite determinar los valores óptimos de amperaje y voltaje y el tiempo de reacción del tratamiento. Se toman muestras durante todo el proceso en cada corrida. Y se realizan los análisis de los parámetros de respuestas aplicando el Estándar Métodos para análisis de aguas y aguas residuales industriales y domésticas. Los resultados se recopilaron en matrices.

Dichos resultados obtenidos sirven de base para experimentaciones continuas.

#### 7.4.1. Control de Variables

En el proceso en lote, el control se basa en mantener constancia en las condiciones que significa mantener valores fijos que alteren nuestras variables en éste caso sería el amperaje en las configuraciones establecidas (Ramos, Catena, & Trujillo, 2004).

Tabla 5. Parámetros para caracterización de muestra sintética de efluente textil.

Configuración Celda X Paquete					
3 x 2		3 x 3		4 x 2	
Amperio	Voltio	Amperio	Voltio	Amperio	Voltio
5	9	5	6	5	10
10	13	10	8	10	20
15	18	<u>15</u>	16	15	24

Fuente: (Bermeo, 2017).

En el proceso en continuo, el control es aplicado mediante el Balanceo de Variables, el cual indica mantener el equilibrio de variables extrañas establecidas (Ramos, Catena, & Trujillo, 2004), en el experimento se identificó como el caudal de operación, para lo cual se colocó un sistema de bypass después de la bomba de alimentación para poder regular dicho caudal que alimenta el sistema de electrocoagulación, sedimentación y adsorción, que opera a 1.3 litros/min, llenando el compartimiento en 4 minutos que es el tiempo de reacción, haciéndolo en un tiempo de 10 minutos hasta lograr la separación de contaminantes de manera óptima.



### 7.4.2. Diagramas del Experimento

Mediante el Diagrama de Flujo se puede observar la forma como fue realizado el proceso del experimento en batch y continuo.

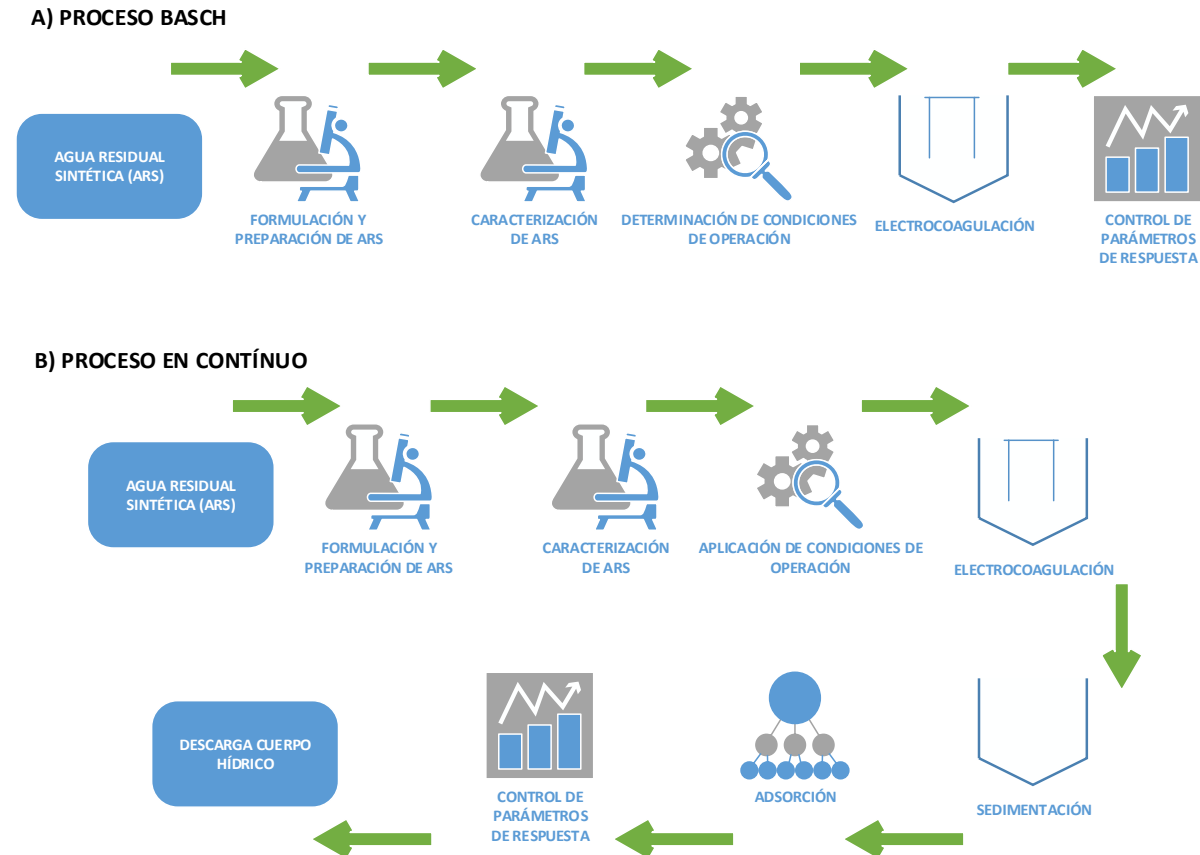
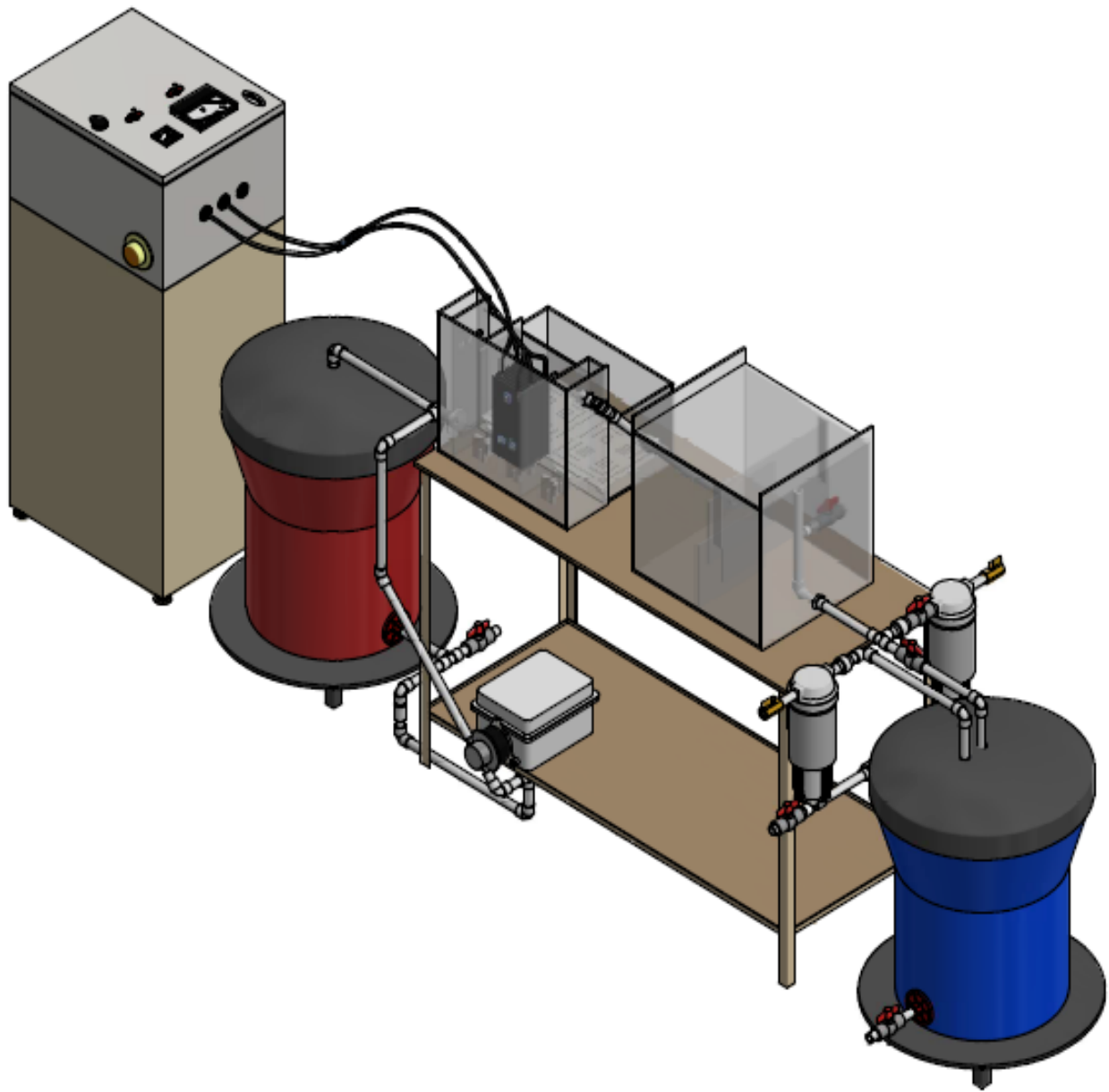


Figura 13. Diagrama de Flujo de Proceso en Lote o batch y Continuo.  
Fuente. Elaboración propia.

### 7.4.3. Análisis e interpretación de la Información.

Se trató el agua residual sintética mediante el método de electrocoagulación para lo cual se empleó el diseño experimental que se basó en la variación de la intensidad de corriente entre 5, 10 y 15 A, la configuración de las celdas electroquímicas y a tiempos de 2 y 4 min. Las variables de respuesta fueron % de remoción de DQO y color.





# CAPÍTULO 8

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA UNIDAD DE ELECTROCOAGULACIÓN Y ADSORCIÓN



## 8. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA UNIDAD DE ELECTROCOAGULACIÓN Y ADSORCIÓN

### 8.1. Unidad de Electrocoagulación y Adsorción

Equipo de electrocoagulación con electrodos de hierro, consta de las siguientes partes: fuente de poder, cámara de electrocoagulación, cámara de sedimentación, sistema de adsorción (filtro de carbón activado), tanques de alimentación y de agua tratada, bomba de alimentación. Mostradas en las Figuras 14 – 16.

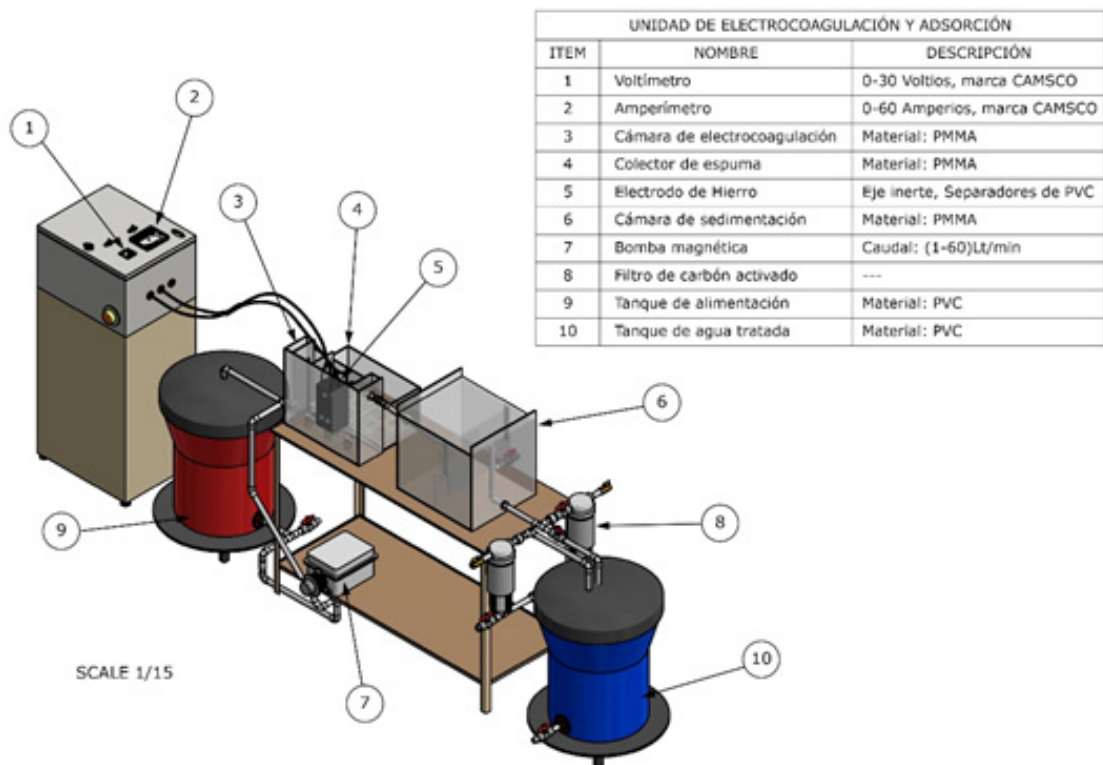


Figura 14. Esquema de un sistema de tratamiento de agua residual. Vista isométrica I.  
Fuente. (Bermeo, 2017)

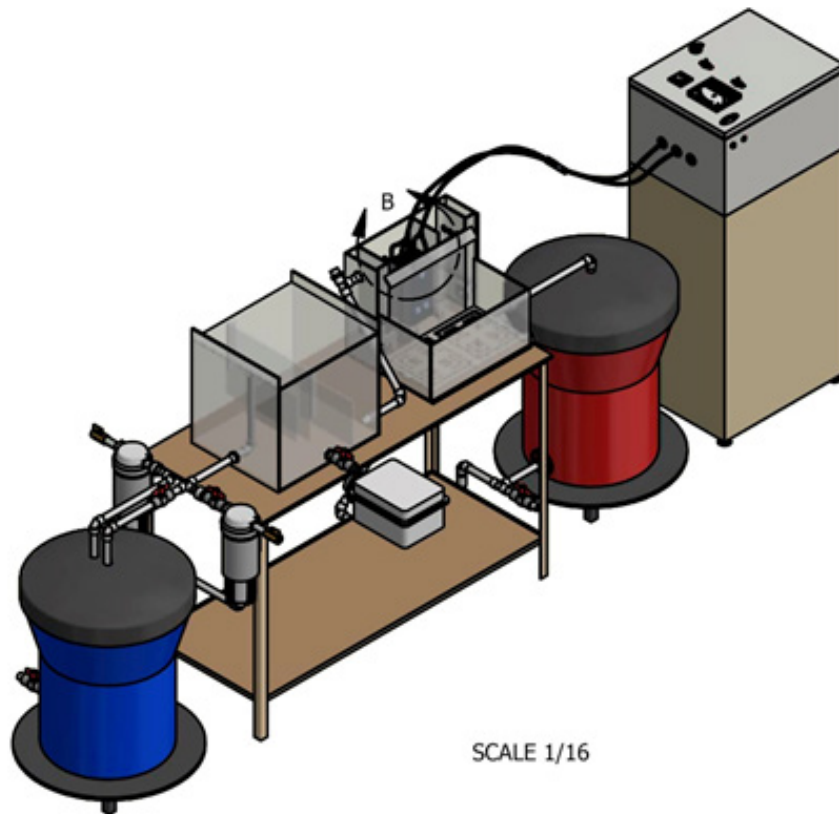


Figura 15. Esquema de un sistema de tratamiento de agua residual. Vista isométrica II.  
Fuente. (Bermeo, 2017).

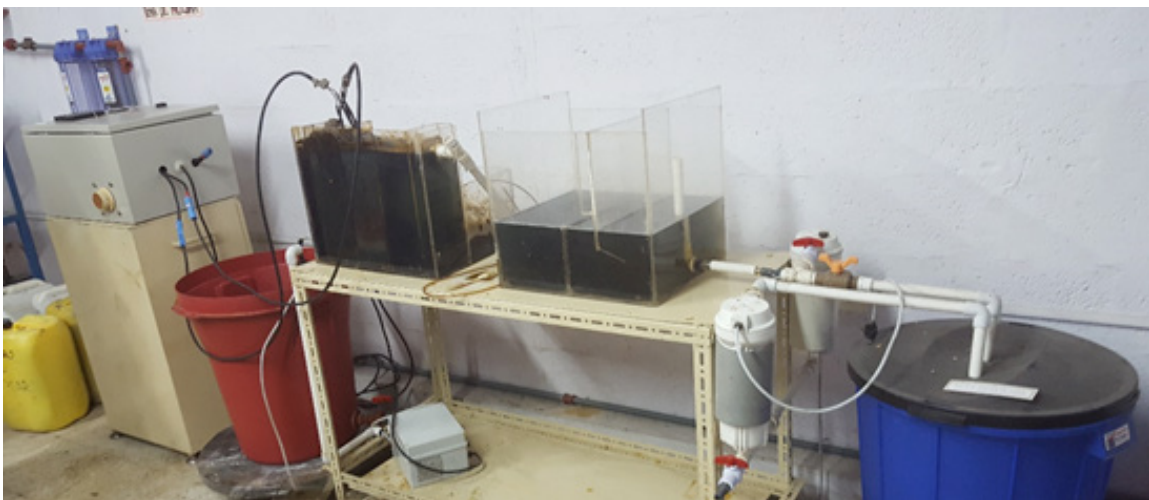


Figura 16. Sistema de tratamiento de agua residual.  
Fuente. (Bermeo, 2017)

## 8.2. Partes de la Unidad de Electrocoagulación y Adsorción

### 8.2.1. Fuente de Poder

Fuente de poder que trabaja con corriente alterna con entrada de 110 voltios, 60 hertzios, con salida de 0 a 30 voltios, con la finalidad de transformar la corriente alterna en corriente continua (Figura 17 - 19).

Amperímetro Marca CAMSCO: De 0 a 60 amperios

Voltímetro Marca CAMSCO: De 0 a 30 voltios

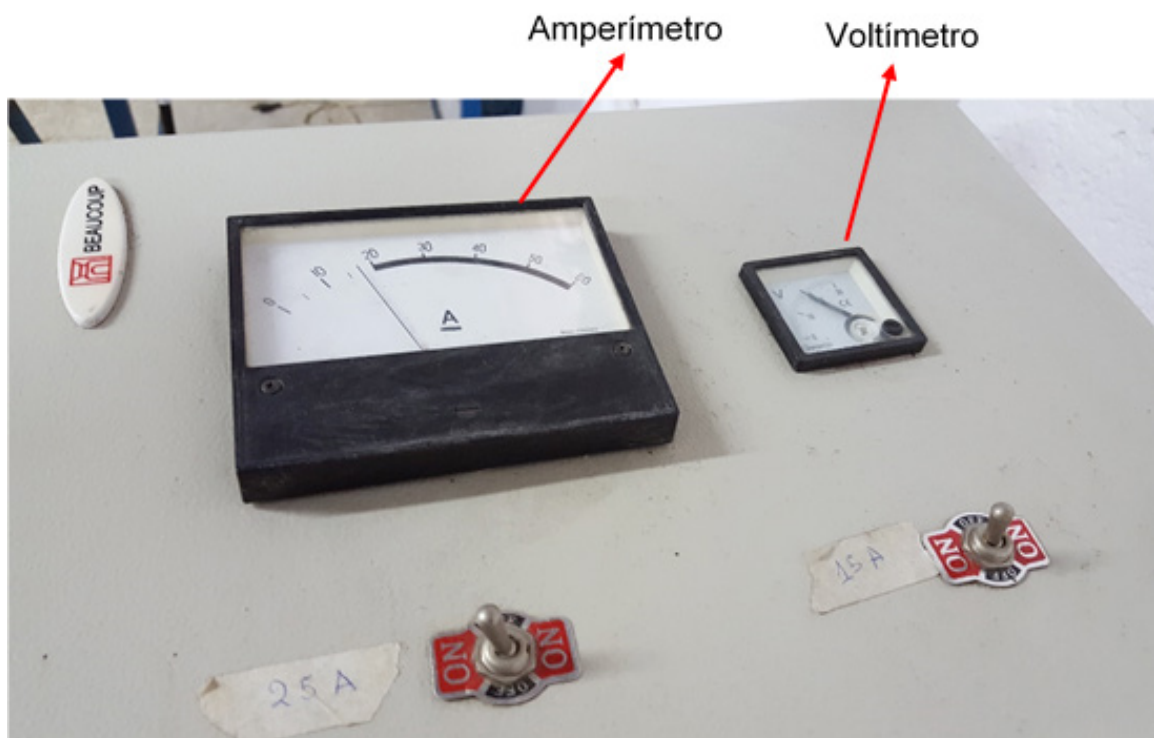


Figura 17. Fuente de Poder  
Fuente. (Bermeo, 2017)



Figura 18. Fuente de poder. Vista lateral.  
Fuente. Elaboración propia

### 8.2.2. Paquetes de electrodos

Para ese tipo de experimentación se utiliza una celda electroquímica a escala piloto, para lo cual se usa electrodos de hierro con diferentes configuraciones: tres celdas dos paquetes, tres celdas tres paquetes y cuatro celdas dos paquetes, así como también se determinan las condiciones de operación de voltaje y amperaje. Las celdas de electrocoagulación se elaboran de acuerdo al espacio de la cámara en donde se efectúa la electrocoagulación y se registran las siguientes medidas:

- Longitud de la celda 20.5 cm
- Espesor de cada placas 2.5 mm
- Espesor de separador de cada placa 4 mm



Figura 20: Paquete de electrodo de hierro.  
Fuente. (Bermeo, 2017)



Las configuraciones de las celdas se deben calcular en base a las dimensiones del paquete de electrodo.

$$\text{Número celdas} = \text{número de placas} - 1$$

### 8.2.3. Acrílico

Polímero de Metil Metacrilato (PMMA)

Termoplástico rígido excepcionalmente transparente en estado natural es incoloro, inerte a muchas sustancias corrosivas.

Fórmula Química: MMA Monómero metacrilato,  $C_5O_2H_8$

PMMA  $(C_5O_2H_8)_n$

n = número de moléculas de MMA que forma parte de la cadena lineal PMMA

### 8.2.4. Cámara de Electrocoagulación

Está construida con el material acrílico con la medidas indicadas en el apartado 3.8.2 Diseño y Construcción.

Contiene dentro los electrodos de hierro anteriormente mencionados en el apartado 3.8.1.2 Paquetes de Electroodos. (Figura 21)

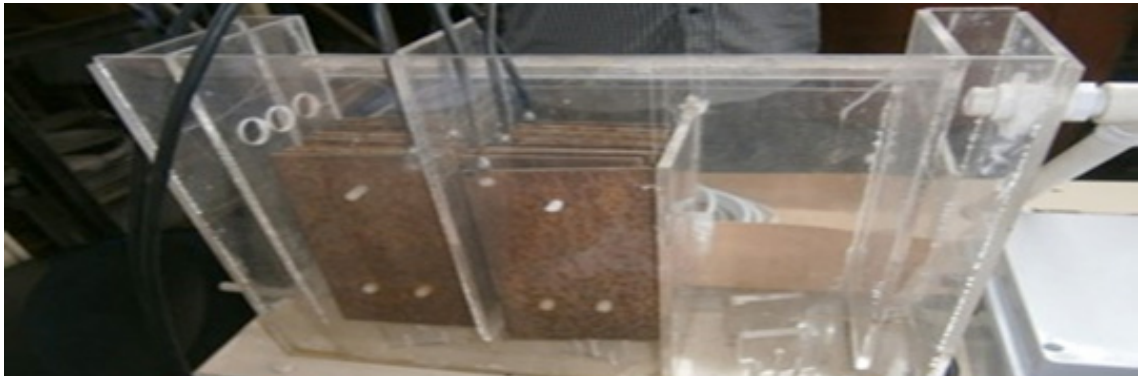


Figura 21: Equipo de electrocoagulación.  
Fuente. (Bermeo, 2017).

Adicionalmente el equipo de electrocoagulación debe contar con un colector de espuma del mismo material de la cámara de electrocoagulación, lo cual permite separar los lodos generados durante el proceso de electrocoagulación.

### 8.2.5. Cámara de Sedimentación

Construida con el material acrílico, para que las partículas no separadas en la electrocoagulación se sedimenten. (Figura 22).



Figura 22: Equipo de sedimentación.  
Fuente. (Bermeo, 2017)

#### 8.2.6. Bomba magnética

Bomba magnética Serie 507300 con caudal 1.3 L/min. Además consta de una instalación de recirculación con el fin de disminuir el caudal de ingreso del agua residual sintética a la cámara de electrocoagulación (Figura 23).



Figura 23: Bomba magnética Serie 507300  
Fuente. (Bermeo, 2017)

### 8.2.7. Filtro de carbón activado

Hay dos filtros de carbón activado cuya función es realizar el acabado del proceso de depuración del agua residual sintética de 304.5x116 mm de tamaño (Figura 24 y 25).



Figura 24. Filtro de carbón activado marca Darco.  
Fuente. (Bermeo, 2017)

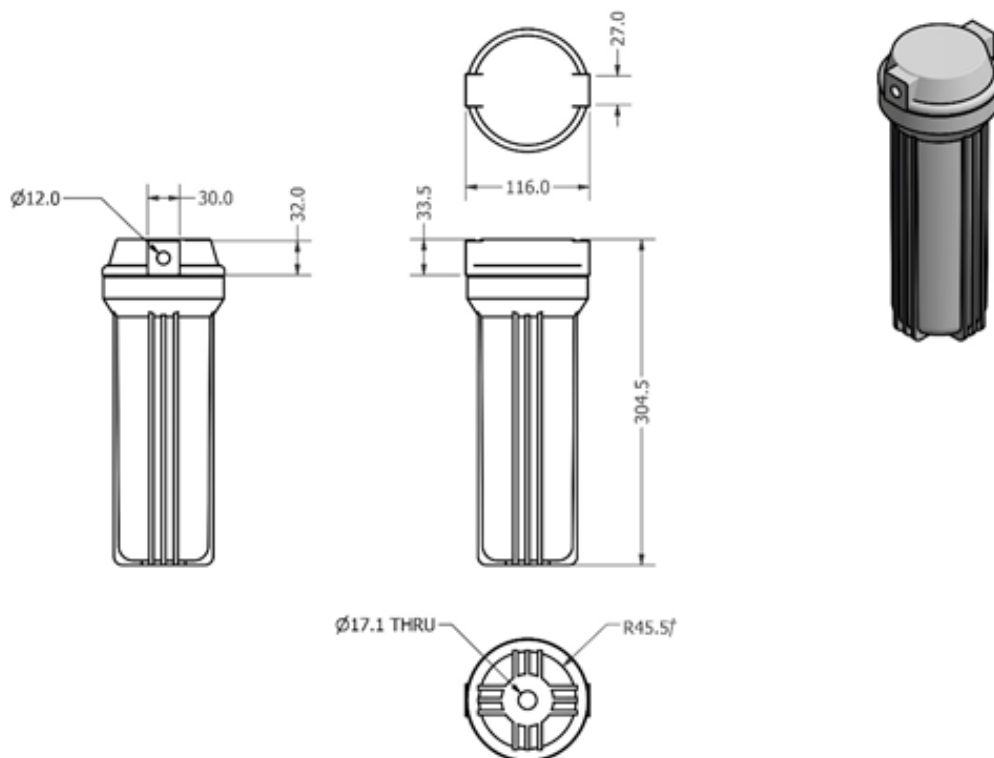


Figura 25. Filtro de carbón activado.  
Fuente. (Bermeo, 2017).

### 8.2.8. Tanque de alimentación y tanque de agua tratada

Dos tanques de PVC de 100 litros de capacidad cada uno; uno contiene el agua residual sintética y el otro el agua tratada que resulte de la experimentación con electrocoagulación y adsorción (Figura 26).



Figura 26. Tanque de PVC de 100 litros de capacidad.  
Fuente. (Bermeo, 2017).

### 8.2.9. Pipeteador Manual

Ofrece un llenado y una dispensación más segura y cómoda, con vidrio y plástico. Pipetas Con una palanca sensible, el llenado y la entrega se controlan fácilmente. Pipetear con facilidad y comodidad (Boeco Germany, 2017) (Figura 27).

Características:

- Manejo fácil e incansable para personas diestros y zurdos.
- Un cono de admisión especialmente diseñado permite el uso de pipetas de 0,1 ml a 100 ml.
- La unidad de válvulas perfectamente armonizada asegura la entrada de líquidos sin esfuerzo.
- Conjunto preciso y altamente sensible del menisco.
- Un filtro de membrana hidrofóbico fácil de reemplazar protege el interior de líquidos penetrantes.
- Completamente auto lavable a 121 ° C (2 bar)



Figura 26. Tanque de PVC de 100 litros de capacidad.  
Fuente. (Bermeo, 2017)

## 8.3. Características de la Unidad de Electrocoagulación

El equipo de electrocoagulación cuenta con una celda electrolítica con capacidad de 12 litros provista de un sistema de recolección de la espuma y flóculos, formados por la desestabilización de las partículas coloidales, cuyos precipitados se depositan en una cámara de recolección de lodos que se encuentra adjunta.

La celda electrolítica de la Figura 28, presenta las siguientes dimensiones: 420x365x410 mm. Cuenta con 4 compartimientos internos de forma rectangular donde están los electrodos y la zona de reacciones donde los flóculos se forman, miden 360x13.5x45 mm.

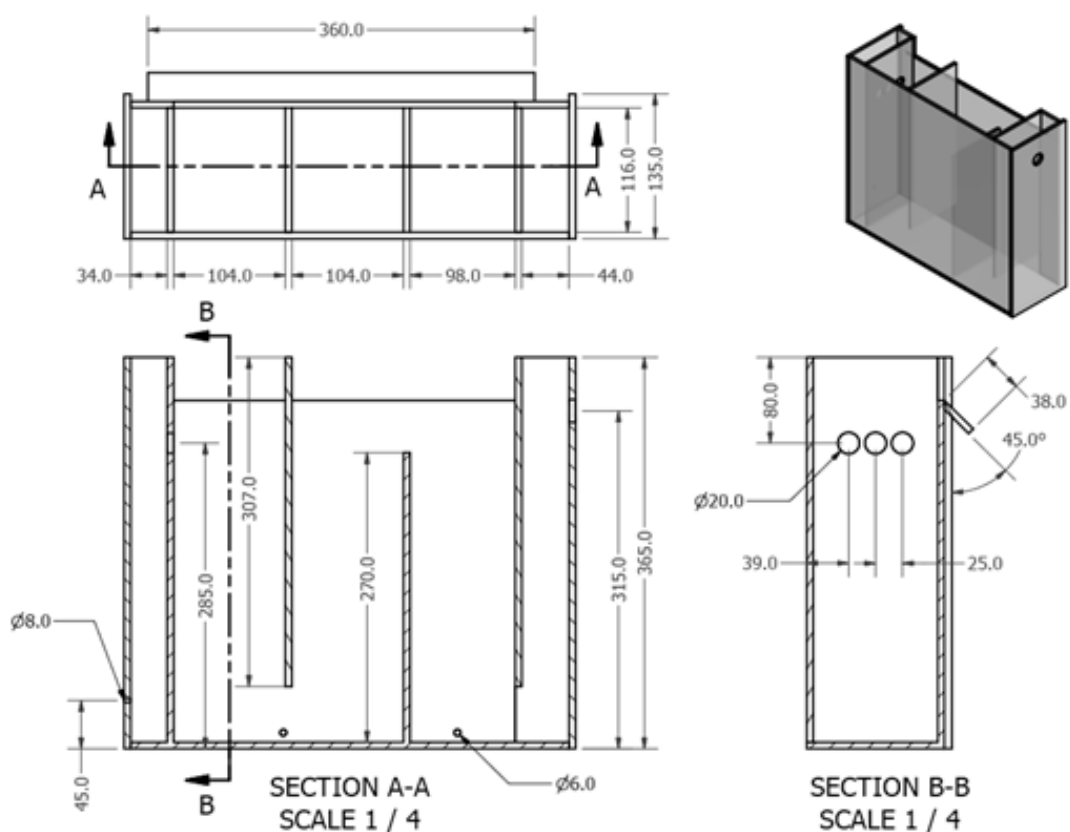


Figura 28. Celda de electrocoagulación

Fuente. (Bermeo, 2017)

El colector de espuma o de residuos está fabricado con las siguientes medidas 408x206x226 mm (Figura 29), dentro contiene una lámina de acrílico con orificios que permite la separación de los lodos, con las medidas 392x219x6 mm. (Figura 30)

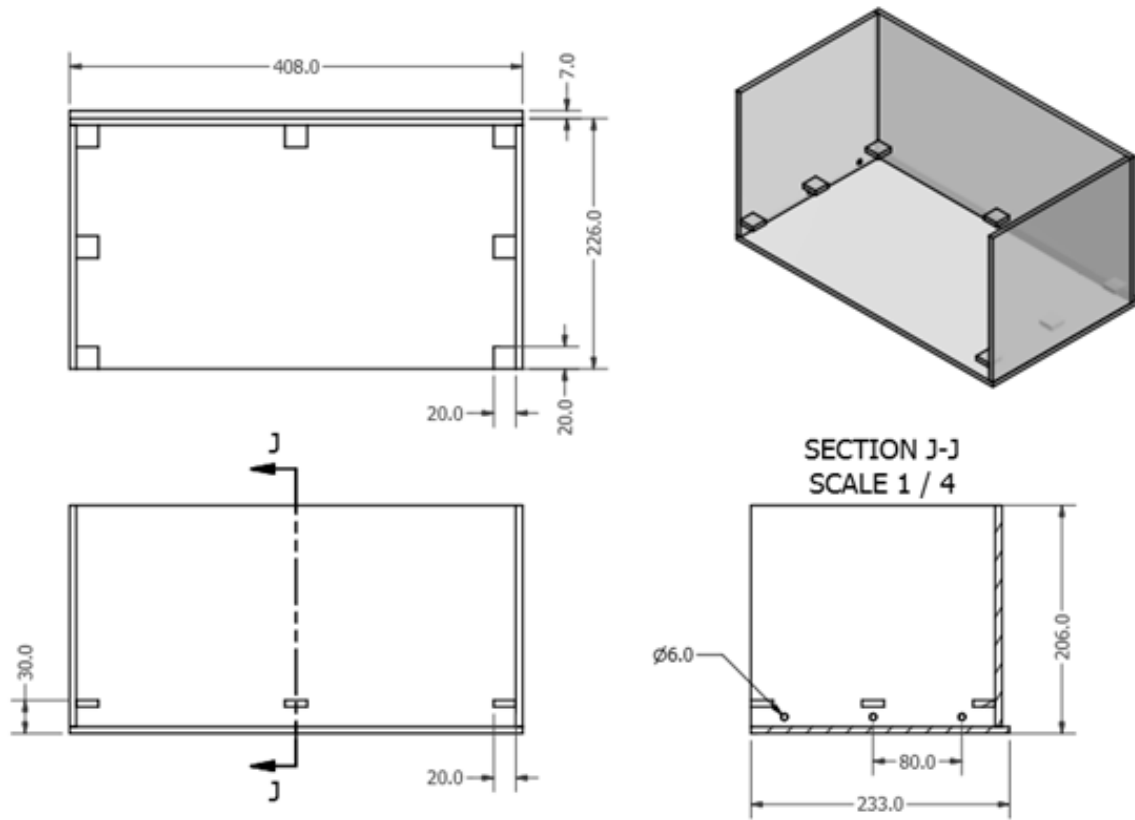


Figura 29. Colector de espuma.  
Fuente. (Bermeo, 2017).

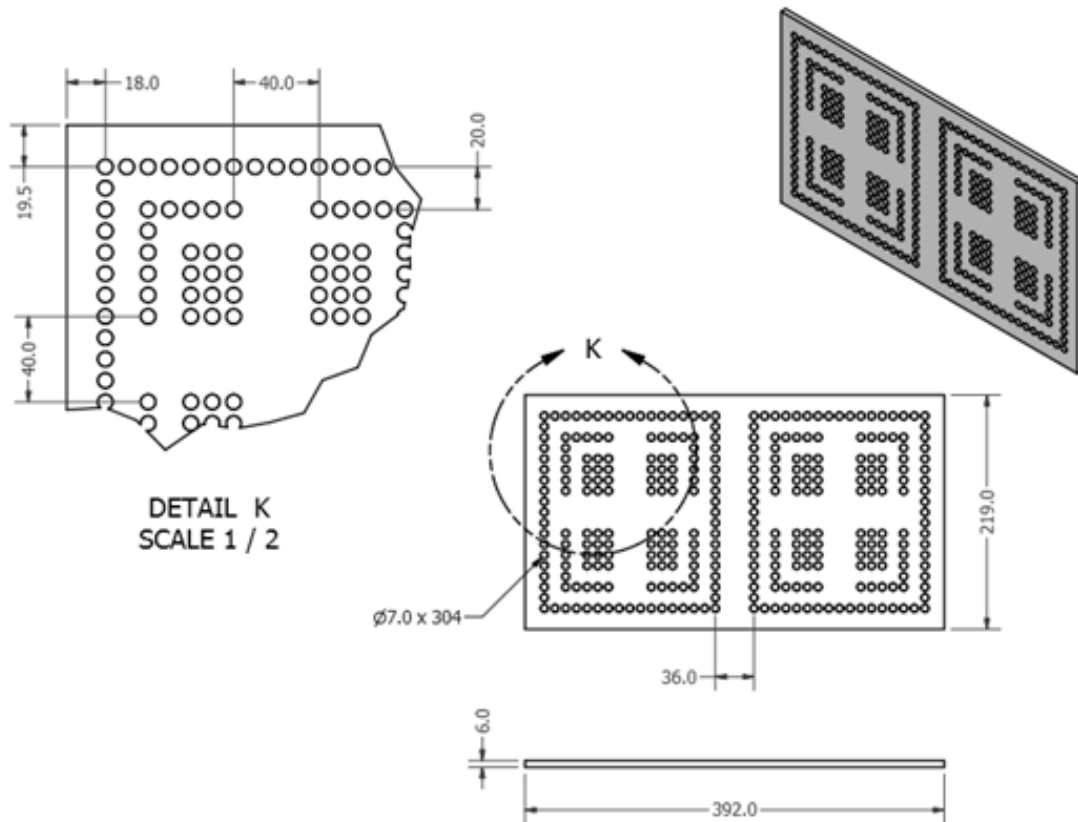


Figura 30. Lámina acrílica con orificios para separar lodos.  
Fuente. (Bermeo, 2017).

El electrodo es de hierro de forma rectangular 200 mm de largo, 100 mm de ancho y 2 mm de espesor (Figura 31). Tienen 2 eje de diámetro de 6 mm de teflón, está separado por 2 placas plásticas de 4 mm (Figura 32). El soporte del paquete es inerte.

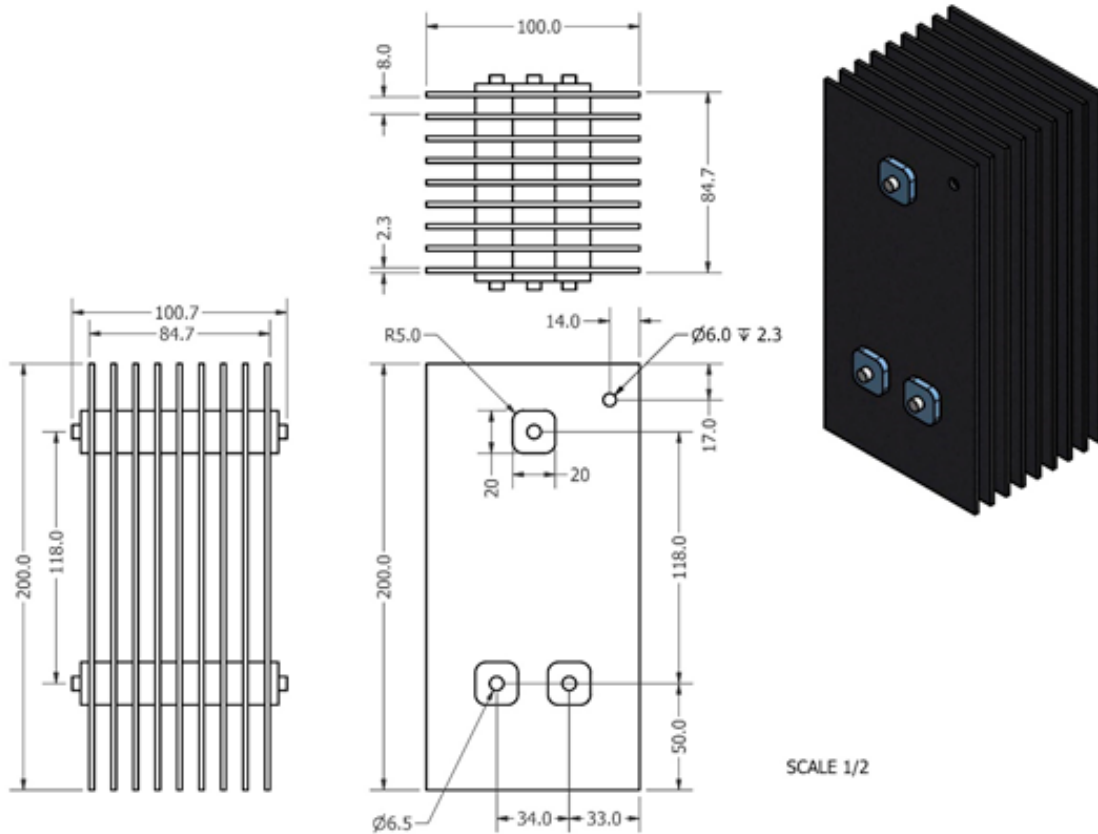


Figura 31: Electrodo de hierro  
Fuente. (Bermeo, 2017).

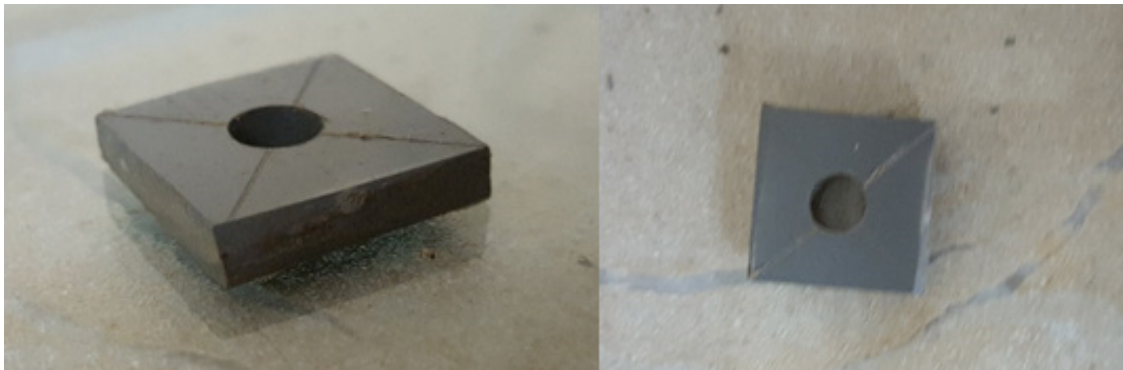


Figura 32. Placas plásticas de 4 mm.  
Fuente. (Bermeo, 2017).

El equipo de sedimentación (Figura 33), tiene una capacidad de 42 litros y tiene las siguientes dimensiones 360 x 390 x 410 mm.



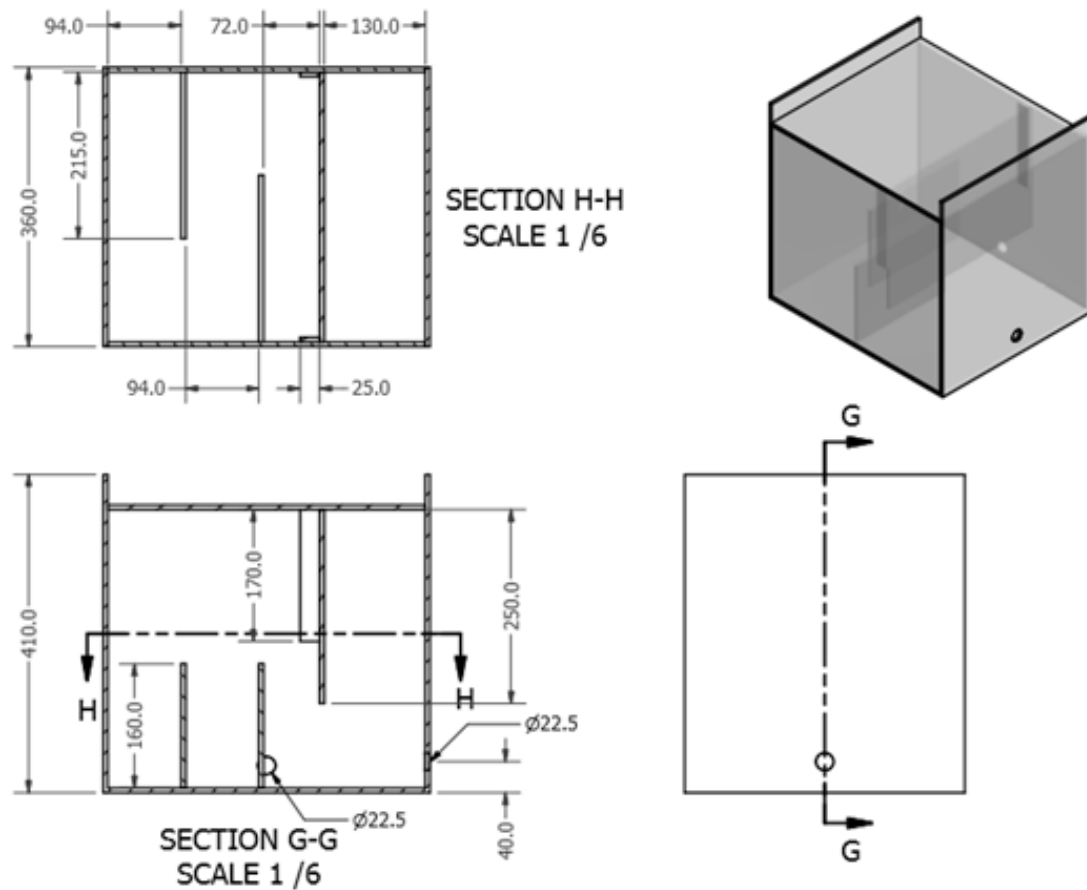


Figura 33. Cámara de sedimentación.  
Fuente. (Bermeo, 2017)

La bomba magnética de las siguiente medida 240x190 mm sirve para bombear el agua residual que contiene productos químicos por su resistencia a la corrosión. Se la utilizó para bombear el efluente sintético del tanque de alimentación hasta la cámara de electrocoagulación (Figura 34).

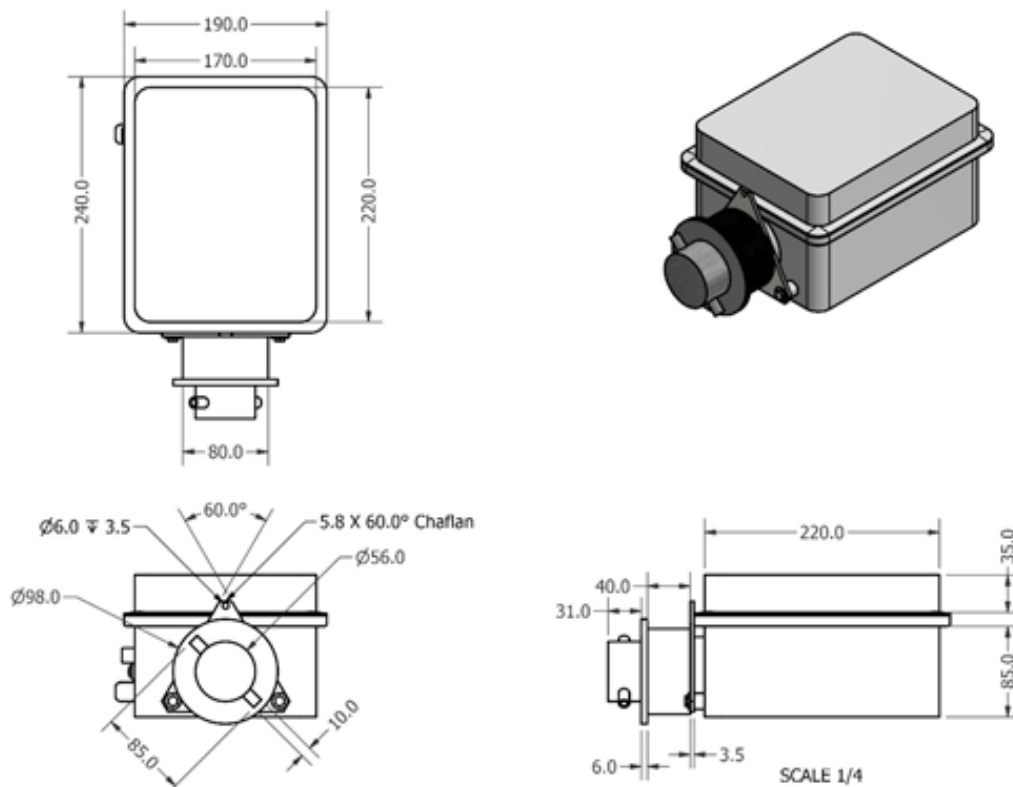


Figura 34. Bomba magnética.  
Fuente. (Bermeo, 2017).

#### 8.4. Características del Equipo de Adsorción

El equipo de adsorción está constituido por 2 filtros de carbón activado de material pvc, que sirve para depurar el agua residual sintética, que están unidos por tuberías que los interconectan a cada uno y el último filtro descarga hacia el tanque de agua tratada.

#### 8.5. Ensamblaje de la Unidad de Electrocoagulación y Adsorción

Para construir el equipo todos los elementos ya previamente armados se los une comenzando con la fuente de poder y ensamblando por medio de tuberías así como se lo muestra en la Figura 35 y 36.

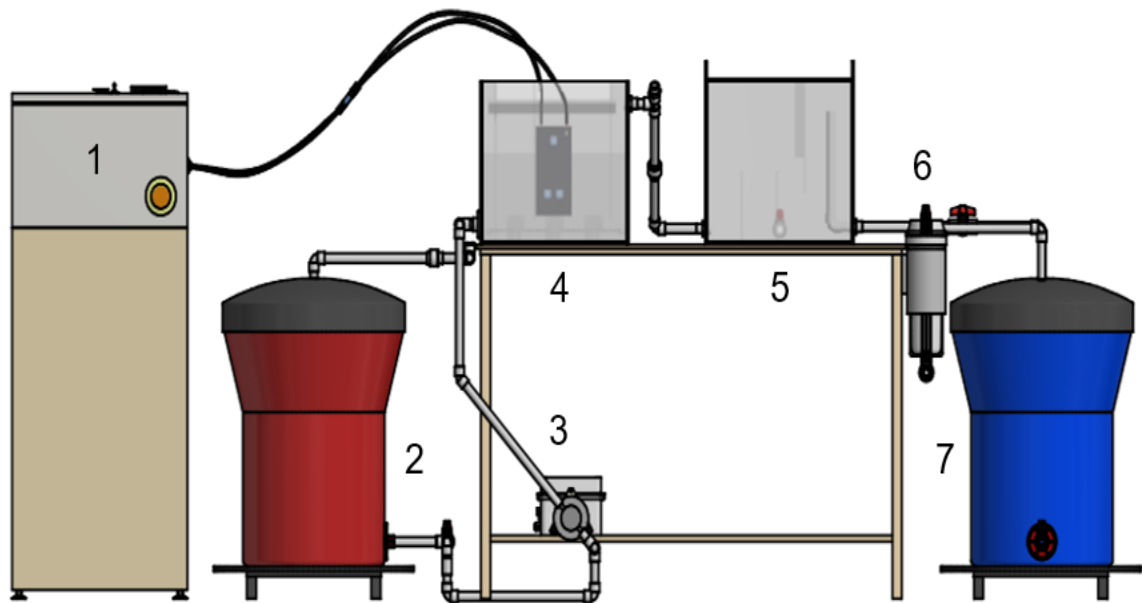


Figura 35. Esquema del sistema de Electrocoagulación armado. Vista lateral.

1. Fuente de poder; 2. Tanque de alimentación; 3. Bomba; 4. Celda electrolítica; 5. Sedimentador; 6. Filtros de carbón activado; 7. Tanque de agua tratada.

Fuente. (Bermeo, 2017)

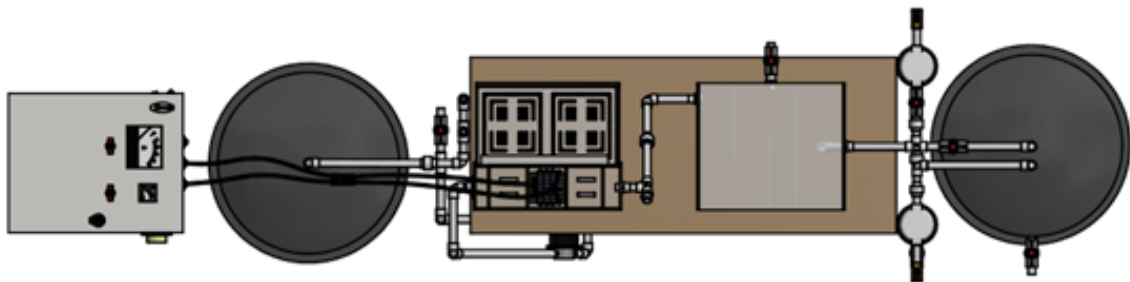


Figura 36. Esquema del sistema de Electrocoagulación armado. Vista arriba.

Figura. (Bermeo, 2017).

## 8.6. Preparación de muestra sintética

Para la preparación de una muestra sintética de agua residual de textilera se debe realizarla en base a una formulación del agua residual de la industria que se requiere tratar. A continuación un ejemplo de agua residual textilera utilizando los siguientes reactivos descritos en la Figura 38.



Figura 38. Constituyentes de muestra sintética.

Fuente. Adaptado de (Lavorante, Álvarez, Chantrill, & Fasoli, 2011), industria textil de la localidad.

Para la obtención de agua residual sintética representativa se debe reproducir en laboratorio con las características del agua residual real, siguiendo las etapas del proceso de tintura y acabados de tejidos de algodón y sus mezclas. En base al volumen a preparar se calculan las cantidades de los reactivos requeridos. La preparación se realiza con agua descalcificada a 60°C y de ahí se añaden los reactivos (Lavorante, Álvarez, Chantrill, & Fasoli, 2011).

(Lavorante, Álvarez, Chantrill, & Fasoli, 2011) en su artículo “Aplicaciones Ambientales de la Electrocoagulación a Escala de Planta Piloto”, para el trabajo prepara una solución de composición similar a la que se encuentra en efluentes textiles: colorante Procion Red HE-3B 0.2 %, carbonato de sodio 1.0%, hidróxido de sodio 0.5% y cloruro de sodio 0.5 %. Estas tres últimas sustancias se emplean habitualmente en el proceso de teñido como auxiliares para facilitar el fijado del colorante sobre la fibra, ensayó también el colorante textil Indanthren Brilliant Green C-FEB en igual concentración que el anterior.



Figura 39. Muestra sintética.  
Fuente. (Bermeo, 2017).





# **CAPÍTULO 9**

## **EXPERIMENTACIÓN**





## 9. EXPERIMENTACIÓN

Pruebas experimentales con la aplicación de tecnologías avanzadas de electrocoagulación y adsorción que remueve tanto contaminantes orgánicos como inorgánicos, teniendo en cuenta algunas consideraciones importantes para el diseño de la celda como son los electrodos, los materiales de los mismos, la geometría y la disposición de los electrodos, el cual es importante para obtener resultados óptimos.

La construcción del paquetes de electrodos se puede realizar con láminas de hierro dispuestas en parejas de dos ánodos y cátodos. Usando los principios de electroquímica, el cátodo es oxidado (pierde electrones), mientras que el agua se reduce (gana electrones), haciendo así que el agua residual sea mejor tratada (Butler, Hung, Yu-Li Yeh, & Suleiman Al Ahmad, 2011).

Al agua residual sintética se aplica el método de electrocoagulación, para lo cual se emplea el diseño experimental que basado en la variación del pH y la intensidad de corriente entre 5, 10 y 15 A. Y a tiempos de 2 y 4 minutos.

Las variables de respuesta consideradas son DQO y color, con el diseño experimental de 3 celdas 2 paquetes, 3 celdas 3 paquetes y 4 celdas 2 paquetes de electrodos para cada una de las experimentaciones. (Figura 41).

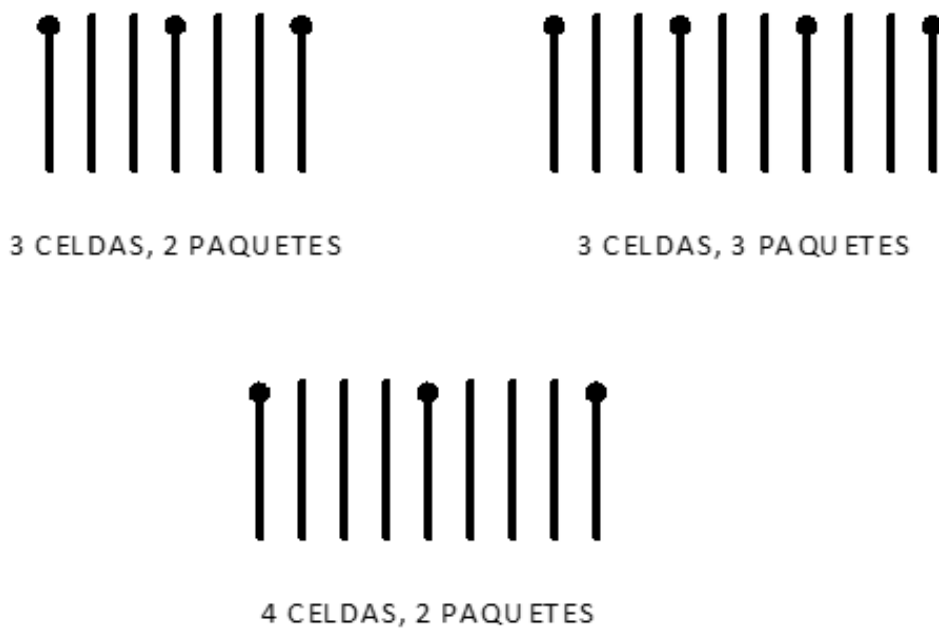


Figura 41. Configuración de electrodos.  
Fuente. (Bermeo, 2017).

Se realizan las pruebas en lote en la celda de electrocoagulación, bombeando el agua sintética de efluente de industria textil, en el equipo de electrocoagulación el que tiene electrodo de sacrificio de hierro, se varió la intensidad de corriente y el voltaje para las cuales se midieron las remociones de DQO, color, a tiempos de 1 a 4 minutos. Los resultados permitieron determinar la eficiencia de remoción a 5, 10 y 15 Amperios de intensidad de corriente.

Una vez obtenida resultados de la experimentación en lotes, se procede a trabajar en continuo con las mejores condiciones de operación obtenidas en el proceso en lotes, bombeando el agua residual sintética a la cámara de electrocoagulación, que tiene como objetivo formar coagulantes por oxidación electrolítica en el ánodo, lo que produce la desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y rompimiento de la emulsión, en la superficie de los electrodos, provocando que las mismas se dirijan hacia la superficie para su posterior separación. Las partículas que permanecen en el fluido pasan a la cámara de sedimentación donde fueron separadas por medio de la gravedad.

Después del proceso anterior comienza el proceso de adsorción para remover los contaminantes remanentes, luego se procede a realizar el muestreo para su respectivo análisis y obtener resultados.

### **9.1. Procedimiento de operación de la unidad de electrocoagulación: Prueba en lote**

- a. Se caracteriza el agua residual sintética. Figura 40.
- b. Se coloca el agua residual sintética en la cámara de electrocoagulación
- c. Se prepara el electrodo de hierro con una configuración bipolar y se lo coloca dentro de la cámara. Figura 42.
- d. Se prende la fuente y se regula para una operación con el amperaje y voltaje. definido Figura 43.
- e. Se procede a tomar una muestra de la unidad a diferentes tiempo de 2,4,...min
- f. A continuación se toma las muestras las que se las direcciona a laboratorio para análisis de color y DQO.



Figura 42. Configuración del electrodo.  
Fuente. (Bermeo, 2017)



Figura 43. Regulación de Fuente de poder.  
Fuente. (Bermeo, 2017).

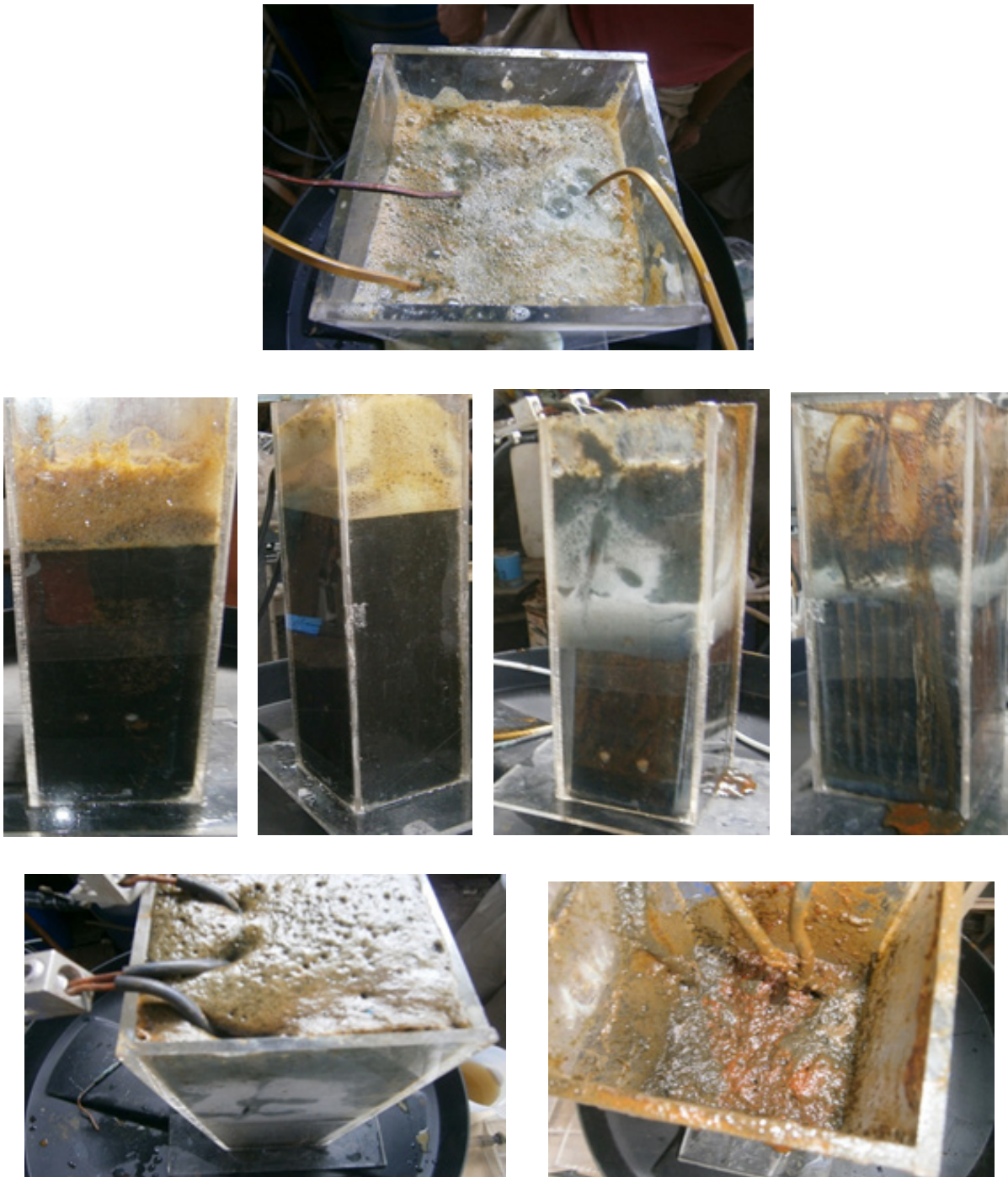
**Etapas durante la reacción de electrocoagulación**

Figura 44. Etapas de la Electrocoagulación.  
Fuente. (Bermeo, 2017).

## 9.2. Operación en la unidad piloto de electrocoagulación y adsorción con carbón activado en continuo.

- a. Conectar la fuente de energía.
- b. Colocar los electrodos.
- c. Se enciende la bomba e ingresa el agua residual.
- d. Se enciende la fuente de poder.
- e. Se ajusta el amperaje y el voltaje.
- f. Se acciona el cronómetro para controlar el tiempo de tratamiento.
- g. Estabilizar las variables de operación.
- h. La muestra pasa de la cámara de electrocoagulación a la de sedimentación.
- i. A continuación atraviesa los filtros de carbón activado.
- j. Toma de datos experimentales.
- k. Al concluir se desconecta el sistema de alimentación hidráulica.
- l. Apagar la fuente de poder.
- m. En estado estacionario se toma una muestra final para análisis del tanque de agua tratada.
- n. Sacar los electrodos para mantenimiento y su posterior limpieza.
- o. Se evacua de las cámaras de electrocoagulación, sedimentación y adsorción el líquido remanente. Se limpia la unidad de electrocoagulación y adsorción.
- p. Se realizan los análisis respectivos .
- q. Se verifica si cumplen con los máximos permisibles para descarga.

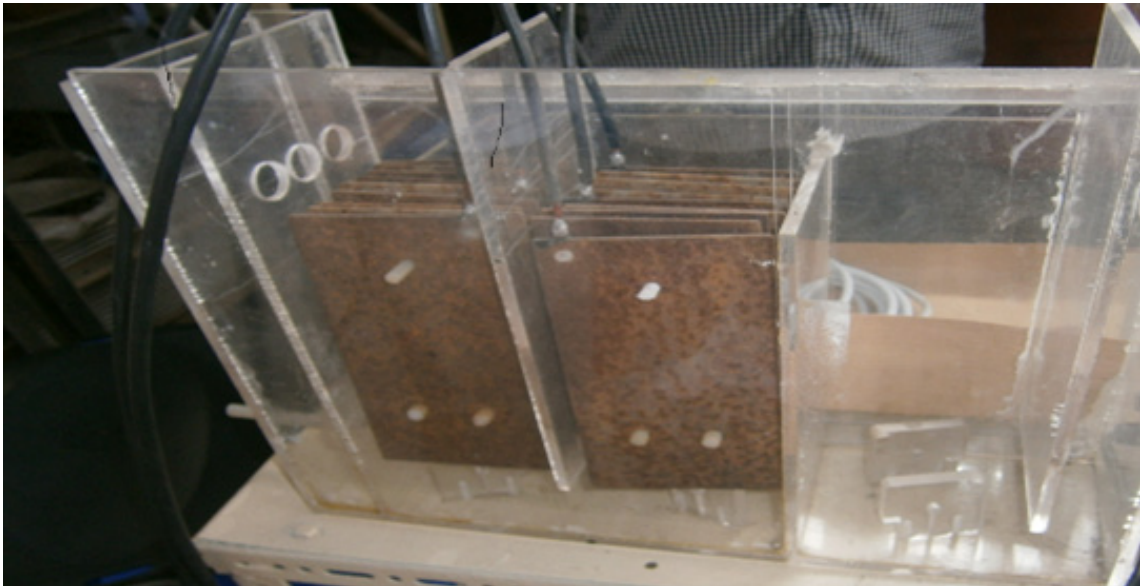


Figura 45. Cámara de electrocoagulación  
Fuente. (Bermeo, 2017).

### 9.3. Procedimiento para toma de muestras

- a. Colocar la pipeta de 100 ml en la punta de succión del pipeteador. (Figura 47)
- b. Introducir la pipeta en la celda electrolítica.
- c. Suavemente presionar el botón de succión hasta el enrase del menisco.
- d. Una vez tomada la muestra, retirar de la celda la pipeta y se presiona el botón de expulsar para colocar el líquido en la botella de muestra. (Figura 48)
- e. Se procede a analizar los análisis de Color y DQO.
- f. El procedimiento se realiza a los 2 y a los 4 minutos, para las tres corridas respectivamente.

Gráficas de pruebas de laboratorio en el que se observamos el proceso con su respectivo resultado obtenido, Figura 46.



Figura 46. Muestra de corrida en línea  
Fuente. (Bermeo, 2017)



# CAPÍTULO 10

## PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO





## 10. PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO

### 10.1. Pruebas estadísticas

Los resultados se grafican como medias $\pm$ desviación estándar. Para verificar la normalidad de los datos se aplicó una prueba de Anderson-Darling y para determinar su homocedasticidad la prueba de Levene. Para comparar la media entre tratamientos cuya distribución fue normal se utilizó ANOVA de una vía ( $p < 0.05$ ) y para los no normales una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ( $p < 0.05$ ). Finalmente, para verificar si existía relación entre las variables se utilizaron gráficos de correlación lineal. Todos los análisis fueron realizados con el programa Minitab versión 17.

### 10.2. Análisis e interpretación de resultados

Se caracterizó la muestra de agua residual sintética y se determinó que los parámetros que superan los Límites Máximos Permisibles (LMP) para descarga a un cuerpo hídrico según el Acuerdo Ministerial 097A de la Norma Ambiental Ecuatoriana fueron DQO, color, DBO, aceites y grasas y los sólidos totales entre otros. (Tabla 8).

Tabla 8. Caracterización de muestra sintética.

Parámetros	Análisis	Unidades	LMP para descargas
<b>pH</b>	8.93	-	6-9
<b>DQO</b>	1300	mg/lt	200
<b>DBO</b>	177	mg/lt	100
<b>SST</b>	132	mg/lt	1600
<b>COLOR</b>	3500	Pt/Co	Inapreciable en dilución 1/20
<b>A y G</b>	37	mg/lt	30
<b>ST</b>	4600	mg/lt	1600
<b>Compuestos Fenólicos</b>	0.031	Fenol	0.031
<b>Sulfatos</b>	780	SO <sub>4</sub> <sup>=2</sup>	1000
<b>Tensoactivos</b>	0.78	SAAM	0.5

Fuente: (Bermeo, 2017).

### 10.2.1. Resultados y análisis estadístico para una configuración de 3 celdas y 2 paquetes con una separación de 0.8 cm.

En la Figura 47A se muestra el efecto de los distintos tratamientos sobre la concentración del color. Se aprecia que hubo una reducción significativa para todos los tratamientos en el tiempo ( $p < 0.05$ ). A partir de los 2 minutos se observan diferencias significativas en la reducción de color entre las intensidades de corriente, siendo la más efectiva la de 15 A donde se redujo de 3500 Pt/Co a  $229.00 \pm 64.93$  Pt/Co ( $F=143.5$ ;  $p=0.000$ ). Finalmente, a los 4 min la remoción se dio en el orden  $15A > 10A > 5A$  con concentraciones de  $31.00 \pm 9.84$  pt/Co,  $138.33 \pm 15.94$  pt/Co y  $369.33 \pm 39.10$  pt/Co, respectivamente.

El porcentaje de remoción se muestra en la Figura 47B donde se aprecia una disminución de del color de  $89,44 \pm 1.12\%$ ,  $96.04 \pm 0.45\%$  y  $99.11 \pm 0.28\%$  para 5A, 10A y 15A.

Por otro lado, en la Figura 53A se muestra el efecto de los distintos tratamientos sobre la concentración de DQO. Se aprecia que hubo una reducción significativa para todos los tratamientos en el tiempo ( $p < 0,05$ ). A partir de los 2 minutos se observan diferencias significativas en la reducción de DQO entre las intensidades de corriente, siendo la más efectiva la de 15 A donde se redujo de 1300 mg/L a  $60,00 \pm 6,92$  mg/L. Finalmente, a los 4 min la remoción se dio en el orden  $15A = 10A > 5A$  con concentraciones de  $32.00 \pm 6.92$  mg/L,  $32.00 \pm 4.00$  mg/L y  $69.33 \pm 2.30$  mg/L, respectivamente.

De igual forma, el porcentaje de disminución de DQO a los 4 min (Figura 53B) fue de  $94.66 \pm 0.17\%$ ,  $97.54 \pm 0.30\%$  y  $97.53 \pm 0.53\%$  para 5A, 10A y 15A, respectivamente.

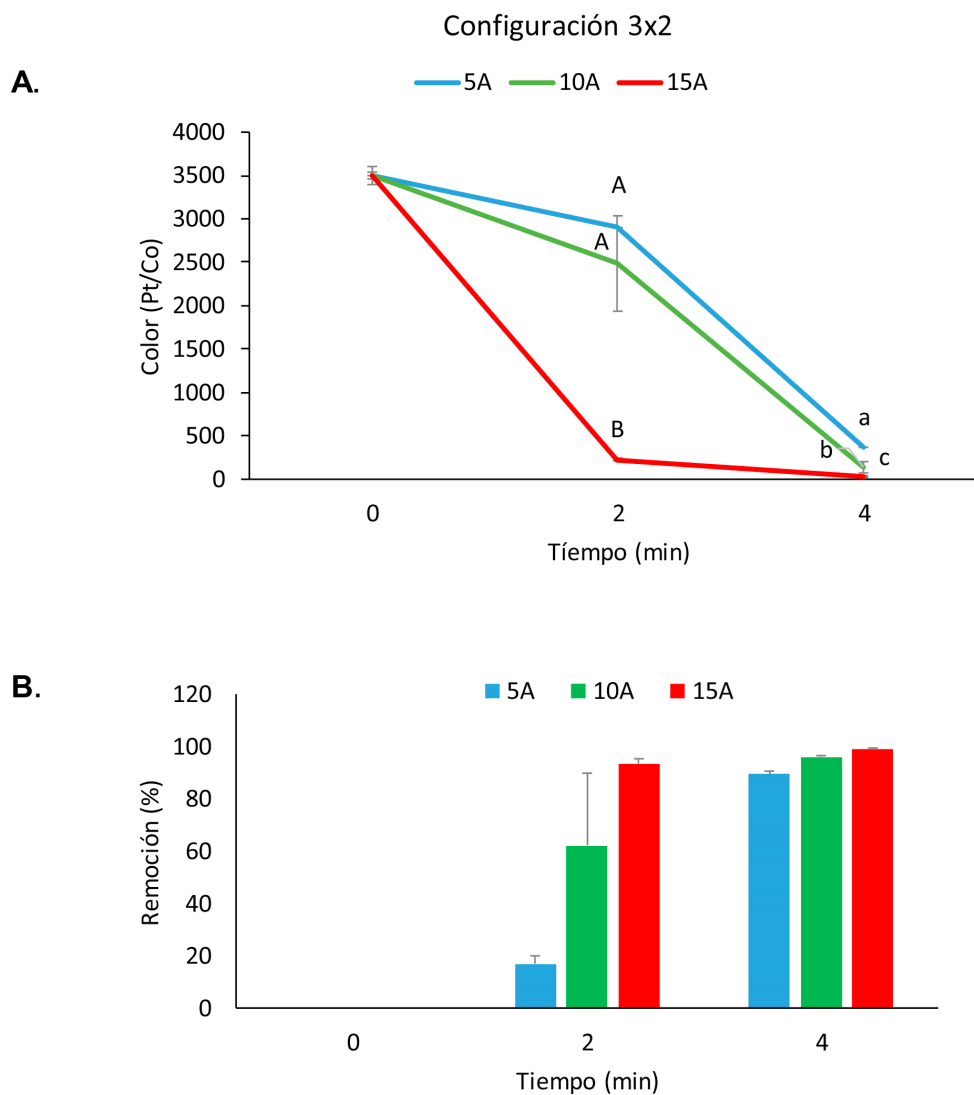


Figura 47. Estadística para 3x2, 0.8 cm en Color.

A. Efecto de los tratamientos con 5, 10 y 15 amperios sobre el color del agua residual sintética de industria textil en el tiempo para la configuración 3x2. Los resultados se muestran como medias±desviación estándar (n=3). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los 2 min ( $p < 0.05$ ). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min. B. Porcentaje de remoción de color.

Fuente. (Bermeo, 2017).

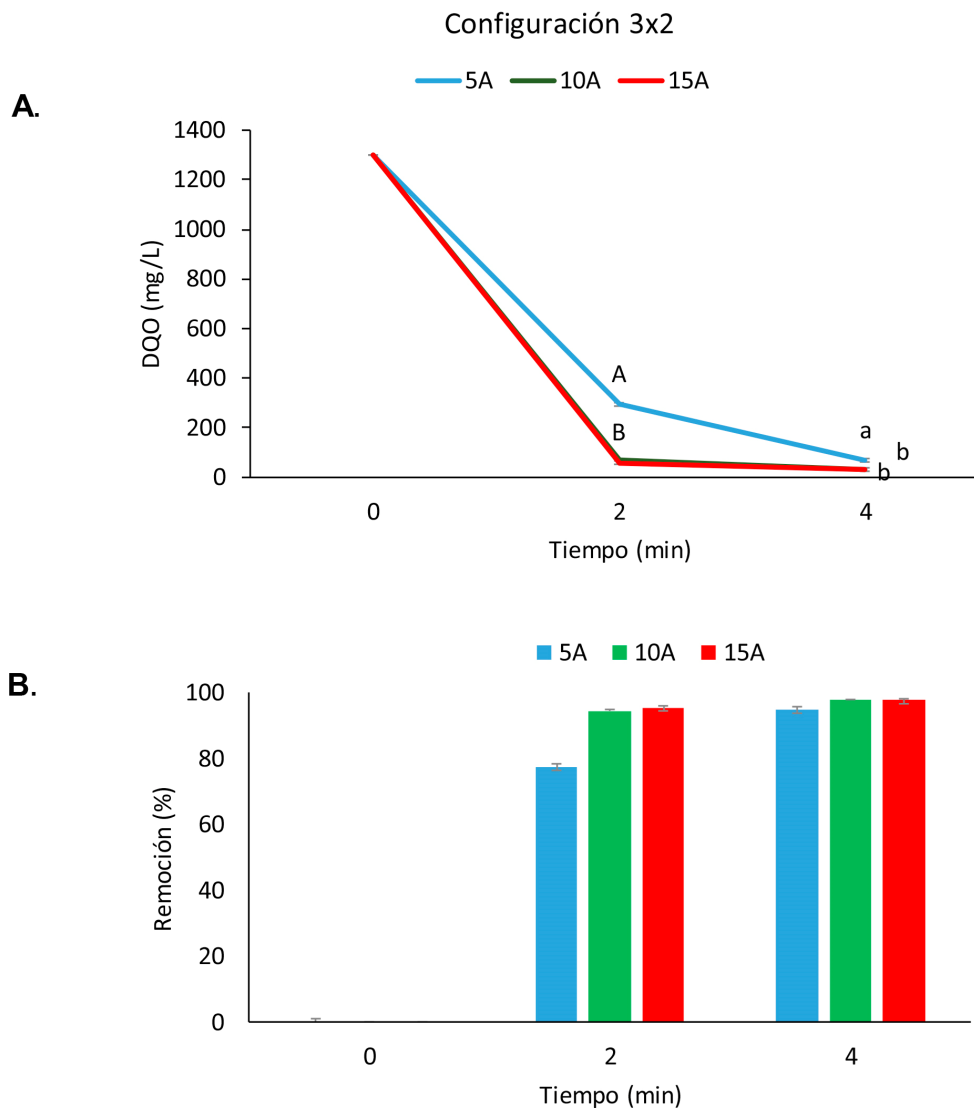


Figura 48. Estadística para 3x2, 0.8 cm en DQO.

A. Efecto de los tratamientos con 5, 10 y 15 amperios sobre el DQO del agua residual sintética de industria textil en el tiempo para la configuración 3x2. Los resultados se muestran como medias  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ ). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los 2 min ( $p<0.05$ ). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min. B. Porcentaje de remoción de DQO.

Fuente. (Bermeo, 2017).

En la Figura 49 se encuentran los beneficios de la aplicación del tratamiento a 15A :

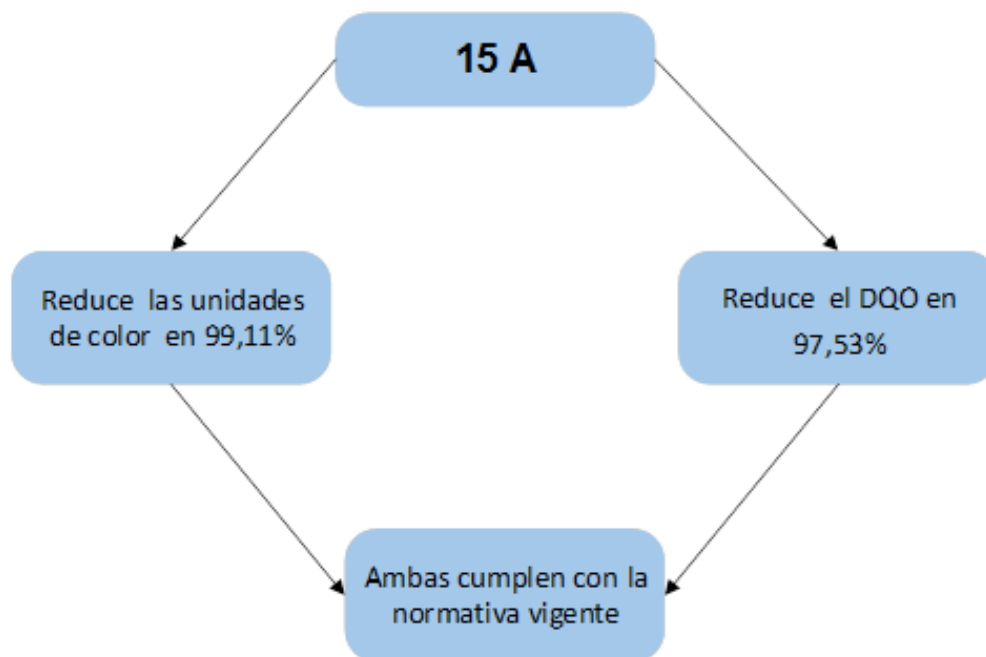


Figura 49. Beneficios de la comparación estadística de configuración 3x2  
Fuente. (Bermeo, 2017).

### 10.2.2. Resultados y análisis estadístico para una configuración de 3 celdas y 3 paquetes con una separación de 0.8 cm.

En la Figura 50 A se muestra la reducción en el color a través del tiempo para el tratamiento de 3x3 donde se aprecia que a 15A se logró una remoción más eficiente a nivel estadístico a partir de los 2 min, con una disminución de 3500 Pt/Co a 18 Pt/Co a los 4 min ( $H=10.18$ ;  $p=0.016$ ), lo que representa un porcentaje de remoción de  $96.00 \pm 1.41\%$  (Figura 50B). En cuanto al DQO, a diferencia del color se apreció una disminución más significativa ( $p<0.05$ ) a 10A a partir de los 2 min, y a los 4 min se redujo de 1300 mg/L a  $75.33 \pm 11.71$  mg/L (Figura 51A), equivalente a  $94.20 \pm 0.90\%$  (Figura 51B).

Después de realizar las pruebas con configuración 3x3 se obtiene comparaciones a través de la herramienta tecnológica Minitab:

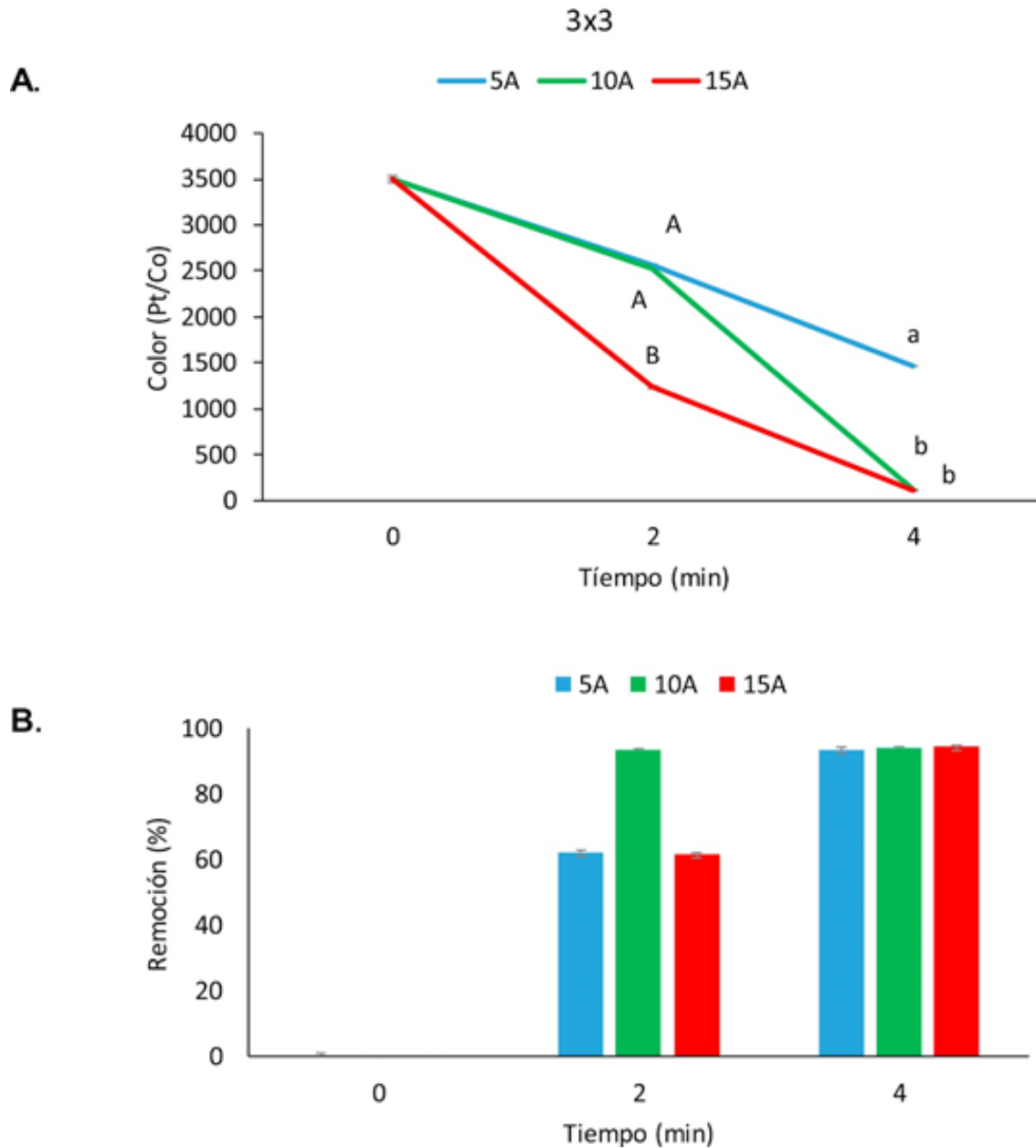


Figura 50. Estadística para 3x3, 0.8 cm en Color.

A. Efecto de los tratamientos con 5, 10 y 15 amperios sobre el color del agua residual sintética de industria textil en el tiempo para la configuración 3x3. Los resultados se muestran como medias  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ ). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los 2 min ( $p<0.05$ ). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min. B. Porcentaje de remoción de color.

Fuente. (Bermeo, 2017).

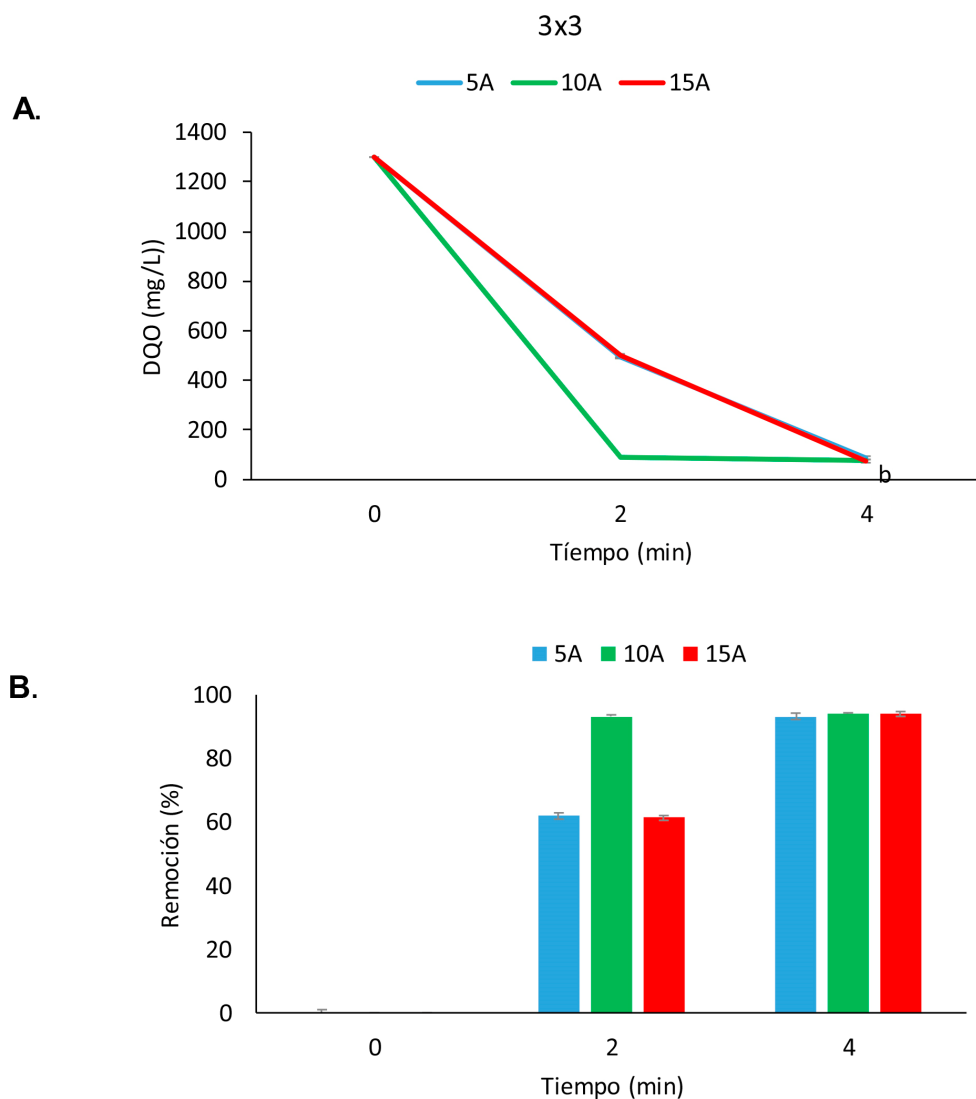


Figura 51. Estadística para 3x3, 0.8 cm en DQO.

A. Efecto de los tratamientos con 5, 10 y 15 amperios sobre el DQO del agua residual sintética de industria textil en el tiempo para la configuración 3x3. Los resultados se muestran como medias  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ ). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los 2 min ( $p<0.05$ ). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min. B. Porcentaje de remoción de DQO.

Fuente. (Bermeo, 2017).

### 10.2.3. Resultados y Análisis de Estadística Configuración de 4 celdas y 2 paquetes con una separación de 0.8 cm.

En la configuración de electrodos de 4x2 de 4 celdas, 2 paquetes, se logra una remoción de color de 3500 Pt/Co a  $37.33 \pm 6.65$  Pt/Co (Figura 52A), lo que representa una reducción del 98.93% a 15A (Figura 52B) con diferencias significativas en comparación a 5A ( $p<0.05$ ). Al igual que el color, el DQO se reduce de forma significativa ( $p<0.05$ ) a partir de los 2 min

a 15 A donde se aprecia una disminución de 1300 mg/L a  $69.33 \pm 2.30$  mg/L (Figura 53A) con un porcentaje de remoción de  $94.66 \pm 0.17\%$  (Figura 53B).

Después de realizar las pruebas con configuración 3x3 se obtiene comparaciones a través de la herramienta tecnológica Minitab:

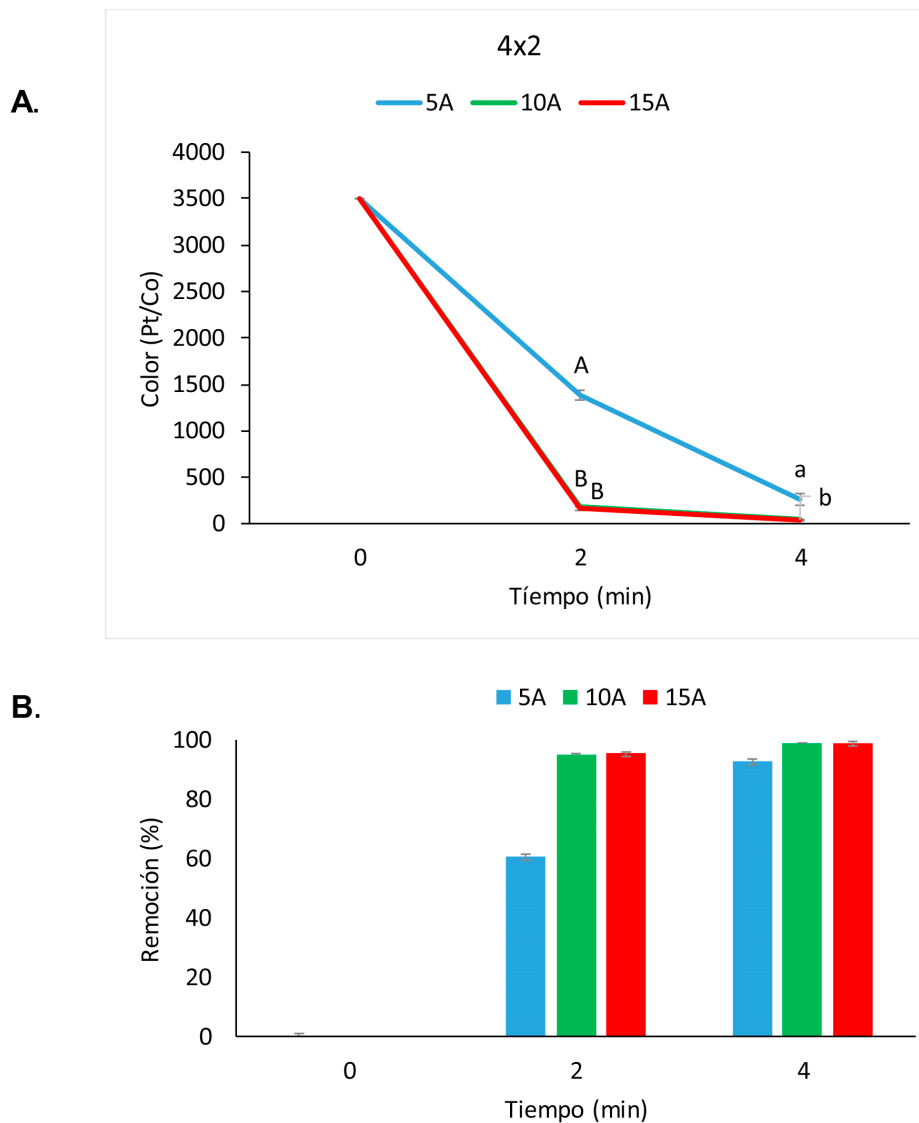


Figura 52. Estadística para 4x2, 0.8 cm en Color.

A. Efecto de los tratamientos con 5, 10 y 15 amperios sobre el color del agua residual sintética de industria textil en el tiempo para la configuración 4x2. Los resultados se muestran como medias  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ ). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a las 2 min ( $p < 0.05$ ). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min. B. Porcentaje de remoción de color.

Fuente. (Bermeo, 2017).



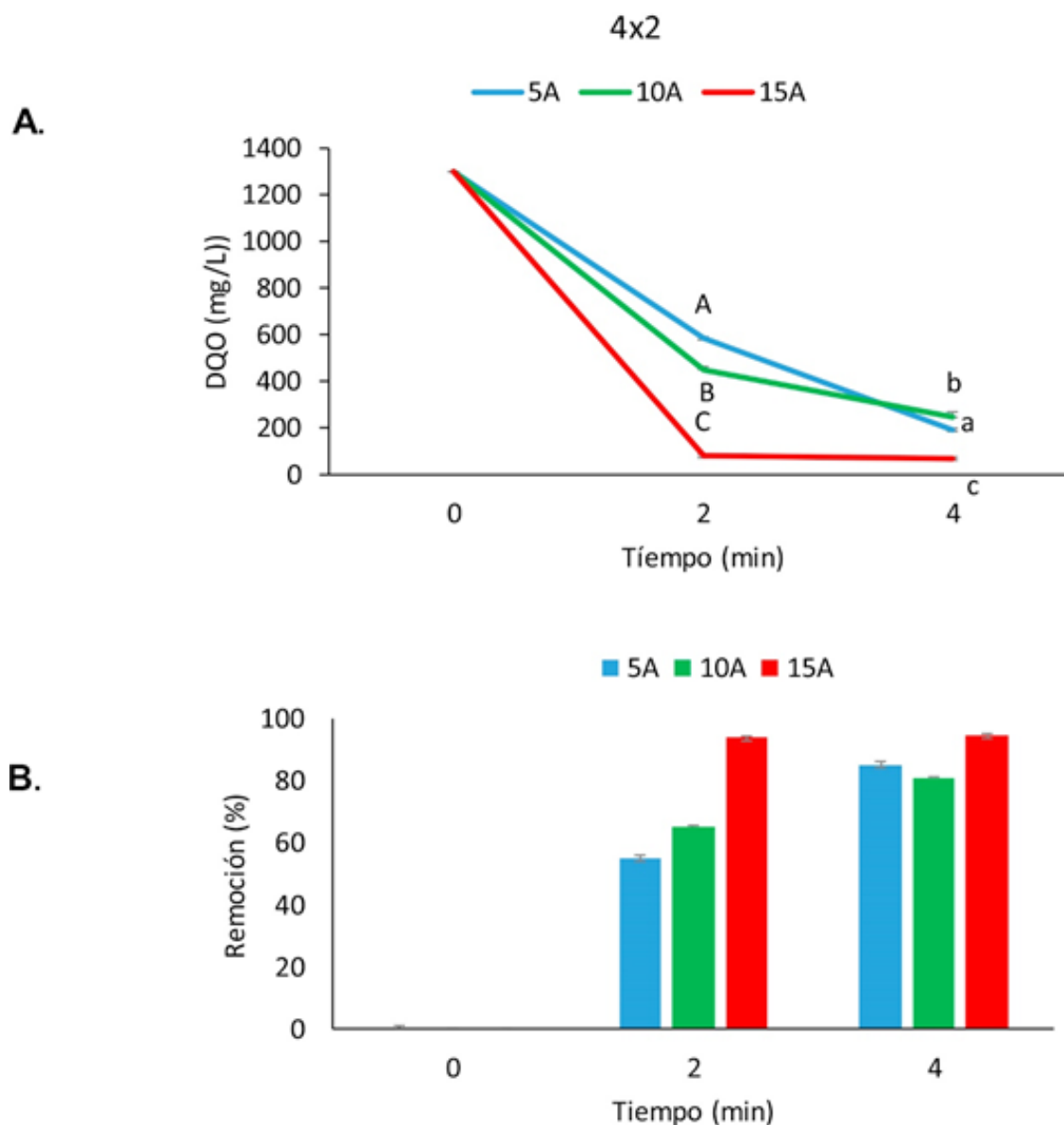


Figura 53. Estadística para 4x2, 0.8 cm en DQO.

A. Efecto de los tratamientos con 5, 10 y 15 amperios sobre el DQO del agua residual sintética de industria textil en el tiempo para la configuración 4x2. Los resultados se muestran como medias  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ ). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los 2 min ( $p<0.05$ ). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min. B. Porcentaje de remoción de DQO.

Fuente. (Bermeo, 2017).

En esta etapa se identifica que la mejor intensidad de corriente que para este es 15 A, y se procede a comparar los porcentajes de remoción entre las distintas configuraciones con la finalidad de determinar cuál era la más eficiente.

En cuanto a la remoción del color 3x2 fue la configuración donde hubo los mayores porcentajes de reducción:  $93.45 \pm 1.86\%$  y  $99.17 \pm 0.28\%$ , a los 2 min y 4 min, respectivamente (Figura 54). Sin embargo, no hubo diferencias estadísticamente significativas con respecto a la configuración 4x2 y la configuración 3x3 fue la menos eficiente con porcentajes de remoción de  $64.68 \pm 0.59\%$  a los 2 min y  $96.75 \pm 1.42\%$  a los 4 min, significativamente menores a la configuración 3x2 según Anova de una vía y test a Posteriori de Tukey ( $F=646.28$ ;  $p=0.000$ ).

Por otro lado el DQO se redujo en mayor proporción al igual que el color en la configuración 3x2. Comparativamente a los 2 min de tratamiento hubo un descenso significativo en el DQO de  $95.38 \pm 0.53\%$  en la configuración 3x2, seguida por  $93.84 \pm 0.30\%$  en 4x2 y  $61.50 \pm 0.65\%$  en 3x3 ( $F=4096.71$ ;  $p=0.000$ ). A los 4 min las diferencias entre los porcentajes de remoción entre configuraciones disminuyó, presentando valores semejantes entre las configuraciones 3x3 y 4x2 de  $94.20 \pm 0.90\%$  y  $94.66 \pm 0.17\%$  y a 3x2 el porcentaje de remoción fue significativamente mayor  $97.53 \pm 0.53\%$  ( $F=25.92$ ;  $p=0.001$ ).

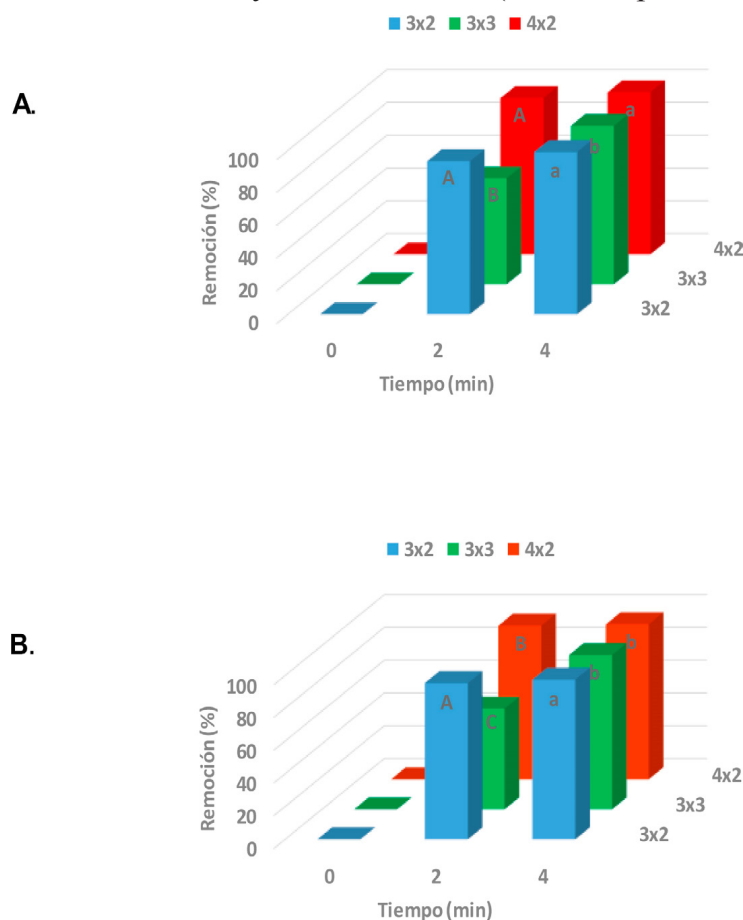


Figura 54. Comparativa de resultados de remoción.

Comparación entre los porcentajes de remoción a 15A para las distintas configuraciones y tiempos. A. Color; B. DQO. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los 2 min según Anova de una vía y test de Tukey ( $p < 0.05$ ). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min.

Fuente. (Bermeo, 2017).

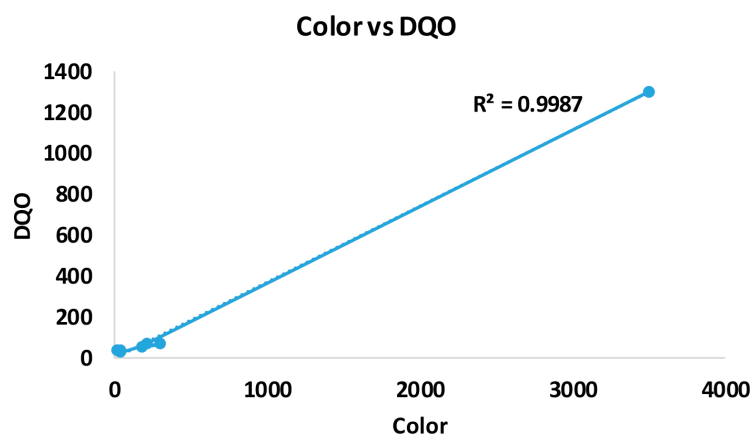


Figura 55. Correlación lineal entre el DQO (mg/L) y el color (Pt/Co).  
Fuente. (Bermeo, 2017) .

En la Figura 55 se evidenció una correlación lineal  $R=0.999$  entre el DQO y el color, por lo que son proporcionales y al disminuir uno de ellos, disminuye el otro.

### 10.3. Comparación de los resultados de las pruebas de color y DQO para el tratamiento de electrocoagulación seguido de adsorción

#### Color

La concentración de color en la prueba de electrocoagulación fue de  $31.00 \pm 9.84$  Pt/Co y al pasar por el proceso de adsorción se redujo a  $28.00 \pm 2.64$  Pt/Co, lo que representa una disminución de 9.6% (Figura 56). Para determinar si las diferencias entre los tratamientos eran significativos, se aplicó un test de Anderson-Darling para determinar la normalidad de los datos. La hipótesis nula de esta prueba es que la distribución de los datos es normal. El valor de  $p$  fue de  $p=0.944$  por lo que se acepta la hipótesis nula y se comprueba que la distribución de los datos es normal.

Posteriormente se debe realizar la prueba de Levene para verificar si las varianzas entre los resultados de las pruebas de electrocoagulación y adsorción eran homocedásticas. El valor de  $p=0.252$ , por lo que se acepta la hipótesis nula de que la varianza entre los tratamientos era igual. Finalmente se aplicó un análisis de varianzas, ANOVA de una vía ( $p < 0.05$ ), cuya hipótesis nula es que la media entre tratamientos es igual. El valor de  $F=0.21$  y  $p=0.637$  por lo que se acepta la hipótesis nula, lo que significa que no existen diferencias significativas en la concentración final de color entre las pruebas de electrocoagulación y adsorción.

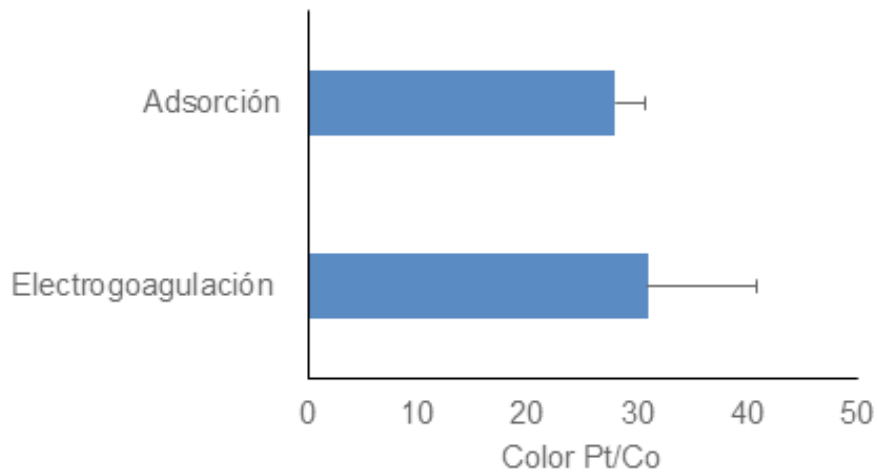


Figura 56. Comparación de la concentración de color con la prueba de electrocoagulación seguida por adsorción.

Fuente. (Bermeo, 2017) .

### DQO

El DQO en el tratamiento de electrocoagulación tiene una concentración de  $32.00 \pm 6.52$  mg/L y posterior al tratamiento con el carbono activado disminuyó a  $26.33 \pm 1.53$  mg/L (17.71%), sin embargo, las diferencias no fueron significativas (Figura 57). Los datos presentaron una distribución normal según la prueba de Anderson-Darling ( $p=0.085$ ) y fueron homocedásticos según la prueba de Levene ( $p=0.499$ ), por lo que se aplicó un análisis de varianza ANOVA de una vía, donde se evidenció que no existían diferencias significativas entre los tratamientos ( $F=1.91$ ;  $p=0.239$ ).

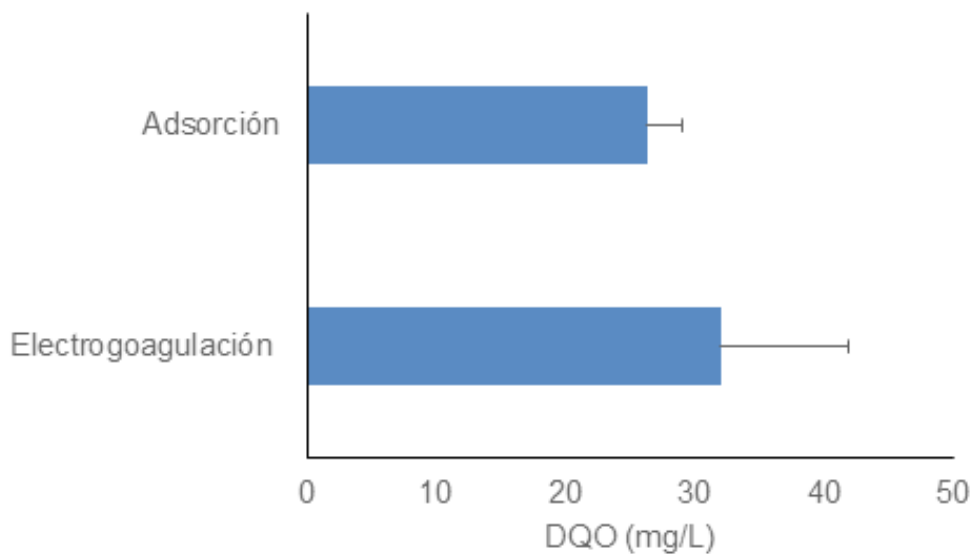


Figura 57. Comparación de la concentración de DQO con la prueba de electrocoagulación seguida por adsorción.

Fuente. (Bermeo, 2017)

#### 10.4. Resultados con verificación hipótesis principal

Corresponde a un diseño experimental con un grupo, comparado con el valor de referencia de 90%, que es el porcentaje de remoción generalmente aceptado

Ho: el porcentaje de remoción es menor o igual a 90%

H1: el porcentaje de remoción es mayor que 90%

Tabla 9. Verificación de hipótesis principal  
One-Sample Test

	Test Value = 90					
	t	df	Valor p	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
<b>Color</b>	8.611	26	.000	5.57963	4.2477	6.9115
<b>DQO</b>	2.333	26	.028	2.44370	0.2903	4.5971

Fuente: (Bermeo, 2017)

En la tabla 9, tanto para color, como para DQO, resulta que el % de remoción es mayor que 90%, dado que el valor p es menor que 0.05.

## 11. NOMENCLATURA

A	Amperio
Ah	Amperio hora
Al	Aluminio
J	Densidad de corriente A/cm <sup>2</sup>
C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub>	Azobenceno
Ca <sup>+2</sup>	Ión de calcio
CaCl <sub>2</sub>	Cloruro de calcio
CAS	Chemical Abstracts Service
CaO	Óxido de calcio
C	Coulombs o Culombio
Co	Concentración inicial de adsorbible en fase líquida,
Ce	Concentración de adsorbible en fase líquida en el equilibrio
Cl <sub>2</sub>	Dicloro, cloro diatómico
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
e <sup>-</sup>	Electrones
EC	Electrocoagulación
EINECS	European Inventory of Existing Chemical
Fe	Hierro
fem	Fuerza Electromotriz
Fe(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido ferroso
Fe(OH) <sub>3</sub>	Hidróxido férrico
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Óxido ferroso férrico
H	Hidrógeno
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Bocarbonato
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de hidrógeno
m	Metros
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
mg/l	Miligramos por litro
mg/Ah	miligramos/ Amperio horas
Mg	Magnesio
Mg <sup>+2</sup>	Ión de magnesio
mS	milisiemens
mno	marino
Na	Sodio
NaCl	Cloruro de sodio
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez
qe	Capacidad de equilibrio
O	Oxígeno
OH●	Radical hidroxilo

pH	Logaritmo negativo de la concentración de iones hidrogeno
PMMA	Polímero de Metil Metacrilato
POA	Procesos de oxidación avanzada
Pt/co	Unidades de color Platino/ cobalto
PVC	Ploricloruro de vinilo
R	Especie reducida
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Sulfato (con dos cargas negativas)
T	Temperatura
t	Tiempo
URSS	Unión de República Socialistas Soviéticas
UV	Ultravioleta
v	Voltios
V	Volumen de disolución
W	Masa de adsorbente
Zn	Zinc, Cinc
$\eta e^-$	el número de electrones transferidos por mol
$\Delta \epsilon$	Delta de $\epsilon$ (Diferencia del potencial entre los electrodos)
$\epsilon_0$	Diferencia de potencial

## 12. GLOSARIO DE TÉRMINOS

### **Adsorción en carbón activado:**

Es una operación unitaria que se realiza sobre una superficie de un sólido adsorbente mediante la acumulación de una sustancia en una fase líquida o gaseosa (absorbible o absorbato). Una capa de moléculas de soluto se acumula sobre la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales.

### **Ánodo:**

Electrodo en el que tiene lugar la oxidación.

### **Anión:**

Ión con carga negativa.

### **Agua residual:**

Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, que hayan sufrido degradación en su calidad original.

### **Agua residual industrial:**

Agua de desecho generada en las operaciones o procesos.

### **Amperio:**

Unidad de intensidad de corriente eléctrica. Un amperio es una corriente constante que manteniéndose en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de un metro uno de otro en el vacío, produciría una fuerza igual a  $2 \cdot 10^{-7}$  newton por metro de longitud.

### **Auxocromo:**

Son grupos o radicales positivos de átomos, que intensifican la acción de un grupo de átomos no saturados que, estando presentes en una molécula de una sustancia química, hacen que esta sea coloreada.

### **Caracterización de un agua residual:**

Proceso destinado al conocimiento integral de las características estadísticamente confiables del agua residual, integrado por la toma de muestra, medición de caudal e identificación de los componentes físico, químico, biológico y microbiológico.

### **Cátodo:**

Electrodo en el que ocurre la reducción.



**Catión:**

Ión con carga positiva.

**Cuerpo receptor o cuerpo de agua:**

Es todo río, lago, laguna, aguas subterráneas, cauce, depósito de agua, corriente, zona marina, estuario, que sea susceptible de recibir directa o susceptible de recibir directa o indirectamente la descarga de aguas residuales.

**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.

**Carga máxima permisible:**

Es el límite de carga de un parámetro que puede ser aceptado en la descarga a un cuerpo receptor o a un sistema de alcantarillado. Industriales.

**Celda electrolítica:**

Celda electroquímica en la que una corriente eléctrica lleva a cabo una reacción que de otra forma no sería espontánea.

**Celda electroquímica:**

Sistema que consiste en electrodos que se sumergen en un electrolito en el que una reacción química usa o genera una corriente eléctrica.

**Coagulantes:**

Partículas líquidas en suspensión que se unen y forman partículas con mayor volumen.

**Conductividad:**

La cantidad de electricidad que el agua puede conducir, expresada en magnitudes químicas. Unidades  $\mu$ Siemens/cm<sup>2</sup>

**Contaminantes:**

Un compuesto que a concentración suficientemente alta causa daño en la vida de los organismos y no son encontrados de forma natural sino que son provocados.

**Color:**

Es el color que forma en agua la cual posee la materia suspendida y disuelta. Unidades Pt/Co

**Coloides:**

Es un sistema físico-químico que forma dos fases una continua y otra dispersa una fluida y la otra en forma de partículas que son sólidas esta se encuentra en menor proporción.

**Coagulación:**

Proceso de desestabilización de las partículas coloidales mediante coagulantes. Comienza en el mismo instante en el que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas, entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma.

**Compuesto inorgánico:**

Compuestos conformados por elementos distintos al carbón. A unos compuestos sencillos de carbono, incluyendo el monóxido de carbono, dióxido de carbono, carbonato y cianuros, se les suele considerar inorgánicos.

**Compuesto orgánico:**

Compuestos que contienen carbono combinado con otros elementos como hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

**Compuestos refractarios:**

Los compuestos químicos refractarios o recalcitrantes son compuestos resistentes a la biodegradación.

**Cromóforo:**

Grupos funcionales de la molécula responsables de la absorción. Principalmente son: dobles y triples enlaces carbono-carbono, sistemas aromáticos, grupo carbonilo, imino ( $C=N$ ), diazo ( $N=N$ ), nitro y enlaces C-Y (Y es un átomo con pares libres).

**Culombio o coulomb (símbolo C):**

Unidad de carga eléctrica, un culombio es la cantidad de electricidad transportada en un segundo por una corriente de un amperio de intensidad.

$$C = A \cdot s = F \cdot V$$

**Demanda bioquímica de oxígeno:**

Demanda bioquímica o biológica de oxígeno que se ejerce por 5 días, el oxígeno consumido por un residuo debido a la acción bacteriana, generalmente entre el 45 y 55 por 100 de la Demanda Teórica de Oxígeno (DTO).

**Demanda química de oxígeno:**

Método de oxidación química de la materia orgánica de una muestra susceptible de oxidar al dicromato de potasio o al permanganato en medio ácido.

**Descarga:**

Acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor, o a un sistema de alcantarillado en forma continua, intermitente o fortuita.

**Depuración:**

Es la remoción de sustancias contaminantes de las aguas residuales para disminuir su impacto ambiental.

**Efluente:**

Líquido proveniente de un proceso de tratamiento, proceso productivo o de una actividad.

**Electrocoagulación:**

Es un proceso complejo con un número de mecanismos, que operan sinérgicamente, para remover los contaminantes del agua residual, presenta dos puntos centrales: el mecanismo de reacción y la configuración del reactor.

**Electrolito:**

Sustancia como el cloruro de sodio, que se disuelve en agua para dar una disolución conductora de electricidad.

**Electrón:**

Partícula con carga negativa muy ligera que existen en la región alrededor del núcleo cargado positivamente de un átomo.

**Electro-Fenton:**

Oxidación avanzada del cual se producen radicales altamente reactivos del hidroxilo (OH•)

**Faradio**

Unidad de capacidad eléctrica, un faradio es la capacidad de un conductor con una diferencia de potencial de un voltio tiene como resultado una carga estática de un culombio.

$$F=(A.s)/V=C/V=C^2/J=C^2/(N.m)=(s^2 C^2)/(m^2 kg)=(s^4 A^2)/(m^2 kg)$$

**Fuerza electromotriz:**

Llamada también diferencia de potencial eléctrico por unidad de carga, y se mide en voltios.

**Hertzio:**

O Hertz, es una unidad de frecuencia que significa “1 ciclo por segundo” o en otras palabras “la oscilación que describe una partícula durante un período de un segundo”.

**Ohmio:**

Unidad de resistencia eléctrica, un ohmio es la resistencia eléctrica que existe entre dos puntos de un conductor cuando una diferencia de potencial constante de 1 voltio aplicado entre dos puntos produce, en dicho conductor, una corriente de intensidad de un amperio, cuando haya fuerza electromotriz en el conductor.

$$\Omega=V/A=(m^2 kg)/(s^3 A^2)$$

**Polución o contaminación del agua:**

Es la presencia en el agua de contaminantes en concentraciones y permanencia superiores o inferiores a las establecidas en la legislación vigente capaz de deteriorar la calidad del agua.

**Protón:**

Partícula que se encuentra en el núcleo del átomo; tiene una carga de igual magnitud pero opuesta en signo a la del electrón y una masa 1836 veces mayor que la del electrón.

**Tratamiento convencional:**

Es aquel que está conformado por tratamiento primario y secundario, incluye desinfección.

**Tratamiento avanzado para efluentes:**

Es el tratamiento adicional necesario para remover sustancias suspendidas y disueltas que permanecen después del tratamiento convencional para efluentes.

**Turbiedad:**

Falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuando más sólidos en suspensión haya en el líquido, generalmente se hace referencia al agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. Unidades NTU.

**Vatio:**

Es la potencia que da lugar a una producción de energía igual a 1 joule por segundo. En términos eléctricos, un vatio es la potencia producida por una diferencia de potencial de 1 voltio y una corriente eléctrica de 1 amperio.

$$W = J/s = V \cdot A = (m^2 \text{ kg})/s^3$$

**Voltio:**

Es la diferencia de potencial eléctrico necesaria para impartir un joule de energía a una carga de un coulomb, o la diferencia de potencial a lo largo de un conductor cuando una corriente con una intensidad de un amperio utiliza un vatio de potencia.

$$V = J/C = (m^2 \text{ kg})/(s^3 \cdot A)$$

**Xenobiótico:**

Compuestos que disponen de una estructura química que no existe en la naturaleza, sino que ha sido desarrollada por el hombre en un laboratorio.

## 13. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, H. O. (1999). Propuesta para la prevención y reducción de contaminates y reducción a las aguas residuales en una planta de teñido de hilo e hilazas. Medellín: Sena.
- American Water Works Association, A., American Public Works Association, A., & Water Environment Federation, W. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Eugene W. Rise; Rodger B. Baird.
- Amezquita, C. (2013). Fundamentos Epistemológicos de la Racionalidad Ambiental, Diálogo de Saberes y Futuro Sustentable. Revista Crecer Empresarial.
- Arango. (2007). Diseño de celda de electrocoagulación. Revista Universidad AEFIT vol 43, 56-67.
- Arango Ruíz, Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En Revista Lasallista de Investigación (Vol. 2). Redalyc. Obtenido de <http://www.redalyc.org/html/695/69520109/>
- Arango Ruíz, A. (2011). Uso de la electrocoagulación para remoción de tartrazina en soluciones acuosas. Producción + Limpia, 6(2), 58- 68.
- Arango-Ruíz, Á. (2014). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: desarrollo y potencial de aplicación. Journal of Engineering and Technology, 3(1). Obtenido de <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/jet/article/view/1132>
- Arbeláez, F. (2005). Química Inorgánica . Bogota Colombia : Santillana .
- Arroyo Núñez, M. G. (2011). Tratamiento de Disoluciones que Contienen Cromo Hexavalente Mediante Electrocoagulación con ánodos de hierro. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Barreda-Reyes, K., Ortega-López, J., Ortega-Regules, A. E., Santiago-Santiago, L. A., & Netzahuatl-Muñoz, A. R. (2015). Remoción de Azul brillante de remazol R de soluciones acuosas empleando biomasa de levadura. Tlaxacla.
- Barrera. (2014). Aplicaciones Electroquímicas al Tratamiento de Aguas Residuales. MÉXICO: REVERTÉ.
- Barrios, L., Gaviria, L., Agudelo, E., & Cardona, S. (2015). Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. Una revisión. Dyna, 82(191). Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/496/49639089015.pdf>
- Bermeo, M. (2017). Remoción eficiente de colorante refractario azul MNO reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación y adsorción. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Obtenido de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/6368>

- Boeco Germany. (2017). Boeco Pipette Pumps. Obtenido de [http://www.boeco.com/download/BOECO%20Liquid%20Handling%202013\\_2014.pdf](http://www.boeco.com/download/BOECO%20Liquid%20Handling%202013_2014.pdf)
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., & Burdge, J. R. (2004). Química, La Ciencia Central (Novena ed., Vols. 970-26-0468-0). (P. Educación, Ed.) Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación.
- Butler, E., Hung, Y.-T., Yu-Li Yeh, R., & Suleiman Al Ahmad, M. (2011). Electrocoagulation in Wastewater Treatment. En *Mdpi, Water*. doi:10.3390/w3020495
- Catellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charris, D. (Junio de 2013). Equilibrio de Adsorción del Colorante Azul de metileno sobre carbón activado. *UDCA Actualizada & Divulgación Científica*, 16(1), 263 - 271. Obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-42262013000100030](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262013000100030)
- Colindres, P. (Diciembre de 2010). Tratamiento de residuales líquidos textiles mediante oxidación con ozono. *Tratamiento de residuales líquidos textiles mediante oxidación con ozono*. México: Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada.
- Cortazar Martínez, A. (2013). Decoloración del colorante rojo ácido 27 utilizando un cultivo mixto de *Trametes versicolor* y *Pseudomonas putida*, diseñado para el tratamiento de efluentes textiles.
- Cortazar Martínez, A., Coronel Olivares, C., Escalante Lozada, A., & González Ramírez, C. (2013). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria*, 2(3). doi:2007-4905
- Cortazar Martínez, A., González Ramírez, C., Coronel Olivares, C., Escalante Lozada, J., Castro Rosas, J., & Villagómez Ibarra, J. (2012). Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil. *Universidad y Ciencia*, 28(2). doi:0186-2979
- DAMA. (1990). *Textiles, planes de acción para el mejoramiento ambiental*. Dama.
- Damaskín, B. B., & Petri, O. A. (1981). *Fundamentos de la Electroquímica Teórica*. URSS: MIR Moscú.
- Ebbing, D., & Gammon, S. (2009). *Química General* (Novena ed., Vols. 978-607-481-306-7). México: Cengage Learning.
- Enciclopedia Práctica del Estudiante. (2012). México .
- Gil Pavas, E. (2008). Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. *Cuadernos de Investigación*, 1692-0694. Obtenido de <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/cuadernos-investigacion/article/download/1279/1158>
- Ibáñez. (2014). *Tecnología de Tratamiento de Aguas*. Santander: Programa Consolider Tragua.

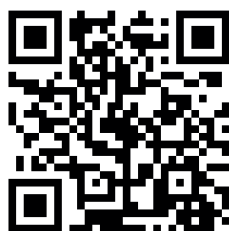
- Kim, H. L. (2015). Treatment and toxicity reduction of textile dyeing wastewater using the electrocoagulation-flotation process. *J Environ Sci Health Hazard Subst ENVIRON ENG*, 661 -668.
- Kirk, R. E., & Othmer, D. F. (2007). *Encyclopedia of Chemical Technology* (Vol. 6).
- Lavorante, M. J., Álvarez, H., Chantrill, C., & Fasoli, H. (Agosto de 2011). Aplicaciones Ambientales de la Electrocoagulación a escala de Planta Piloto. (F. d. Naturales, Ed.) *Ciencia*, 6(21). Obtenido de <http://www.exactas.unca.edu.ar/revista/v210/pdf/ciencia21-4.pdf>
- Lockuán, F. (2012). La industria textil y su control de calidad. V. Tintorería. Obtenido de <https://books.google.com.ec/books?id=6yjBvmYZrTsC&pg=PA91&dq=colorante+reactivo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwikbnPqODRAhUDMSYKHS19At0Q6AEIHjA-B#v=onepage&q=colorante%20reactivo&f=false>
- López, M. (2007). *¿Qué sostenibilidad?: una lectura desde la Filosofía Práctica*. Biblioteca Nueva Madrid, 77.
- López-Grimau, V., Amante García, B., & Gutiérrez, M. (2010). Estudio de la viabilidad en de la reutilizacion de banos de tintura textil. *Afinidad LXVI*, 67(547), 182 - 186. doi:0001-9704
- M.Ambiente. (2012). TULSMA. Quito: Corporacion de Estudios y Publicaciones.
- Meztanza, M. (2012). Tesis Doctoral. Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorante. Madrid.
- Moeller Chávez, G. E. (2000). Evaluación de diferentes procesos de tratamiento para la remoción de colorante sintético utilizados en la industria textil. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Obtenido de <http://repositorio.imta.mx:8080/cenca-repositorio/bitstream/123456789/1406/1/TC-1223.1.pdf>
- Mollah M., Y., Morkovsky, P., Gomes, J., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation (Vol. B114). *Journal of Hazardous Materials*.
- Mondragón, C. (2005). *Química Inorgánica*. Bogotá: Santillana .
- Osorio Robles, F., Torres Rojo, J. C., & Sánchez Bas, M. (2011). Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes.: Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales. Ediciones Díaz de Santos.
- Perry, R. (1992). *Manual del Ingeniero Químico* (TOMO II ed., Vols. 968-422-972-0). México: McGraw-Hill.

- 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). Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-27382011000200010](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000200010)
- Qayyum, H. (2006). Potential Applications of the oxidoreductive enzymes in the decoloration and detoxification of textile and other synthetic dyes from polluted water. *Critical reviews in Biotechnology*, 26, 201-221.
- Rajeshwar, K., & Ibañez, J. (1997). *Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Abatement*. San Diego: Academic Press.
- Ramalho, R. (2014). *Tratamiento de aguas residuales*. Espana : Editorial Reverte S.A.
- Ramos, M., Catena, A., & Trujillo, H. (2004). *Manual de métodos y técnicas de investigación en ciencias del comportamiento*. Madrid. Obtenido de <http://www4.ujaen.es/~eramirez/Descargas/tema6>
- Russell, D. L. (2012). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona : Editorial Reverte.
- Textil, R. A. (2012). *colorantes Textiles*. Red textil Argentina.
- Valenzuela Calahorro, C. (2005). *Adsorción*. Granada. Obtenido de <http://wdb.ugr.es/~academia/discursos/5%20Cristobal%20Valenzuela%20Calahorro.pdf>
- Wang, C., Yediler, A., Linert, D., Wang, Z., & Kettrup, A. (2002). Toxicity evaluation of reactive dye stuff, auxiliaries and selected effluents in textile finishing industry to luminescent bacteria *Vibrio fischeri*. *Chemosphere*.
- Wiley. (2003). *Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications* (Vols. 3527304266, 9783527304264). (K. Hunger, Ed.) Michigan: Universidad de Michigan.
- Zollinger, H. (1978). *Colour chemistry- Synthesis, Properties of organic dyes and pigments*. New York: VCH Publishers.



## ***Descubre tu próxima lectura***

Si quieres formar parte de nuestra comunidad,  
regístrate en <https://www.grupocompas.org/suscribirse>  
y recibirás recomendaciones y capacitación



   @grupocompas.ec  
compasacademico@icloud.com

Martha Bermeo Garay Ingeniera Química.  
Diplomado en Docencia Superior. Magister  
en Ingeniería Ambiental. Doctorado en  
Ciencias Ambientales. Docente Principal  
de la Universidad de Guayaquil, Facultad  
de Ingeniería Química.  
martha.bermeog@ug.edu.ec

Luis Alberto Bonilla Abarca.  
Ingeniero Químico, Diplomado en  
Docencia Superior, Magister en Ingeniería  
Ambiental Docente Principal de la  
Universidad de Guayaquil, Facultad de  
Ingeniería Química, carrera de Ingeniería  
Química.  
luis.bonillaa@ug.edu.ec

compAs  
Grupo de capacitación e investigación pedagógica



@grupocompas.ec  
compasacademico@icloud.com



ISBN: 978-9942-33-174-8



@grupocompas.ec  
compasacademico@icloud.com

**compas**  
Grupo de capacitación e investigación pedagógica

Martha Bermeo Garay Ingeniera Química.  
Diplomado en Docencia Superior. Magister  
en Ingeniería Ambiental. Doctorado en  
Ciencias Ambientales. Docente Principal  
de la Universidad de Guayaquil, Facultad  
de Ingeniería Química.  
martha.bermeog@ug.edu.ec

Luis Alberto Bonilla Abarca.  
Ingeniero Químico, Diplomado en  
Docencia Superior, Magister en Ingeniería  
Ambiental Docente Principal de la  
Universidad de Guayaquil, Facultad de  
Ingeniería Química, carrera de Ingeniería  
Química.  
luis.bonillaa@ug.edu.ec

compAs  
Grupo de capacitación e investigación pedagógica



@grupocompas.ec  
compasacademico@icloud.com



ISBN: 978-9942-33-174-8



9 789942 331748



@grupocompas.ec  
compasacademico@icloud.com

**compas**  
Grupo de capacitación e investigación pedagógica