



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

REDUCCIÓN DE DQO POR TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE  
COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN Y ELECTROCOAGULACIÓN EN AGUAS  
RESIDUALES.

AUTOR

KARLA CELILIA JIMÉNEZ BAUTISTA

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

REDUCCIÓN DE DQO POR TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE  
COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN Y ELECTROCOAGULACIÓN EN AGUAS  
RESIDUALES.

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Ingeniera Ambiental en Prevención y  
Remediación

Profesor Guía

MSc. Daniel Herman Hidalgo Villalba

Autora

Karla Cecilia Jiménez Bautista

Año

2018

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Reducción de DQO por tratamientos físico-químicos de coagulación-floculación y electrocoagulación en aguas residuales, a través de reuniones periódicas con el estudiante Karla Cecilia Jiménez Bautista, en el semestre 2018-1 orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Daniel Herman Hidalgo Villalba

Magister En Ciencias De La Ingeniería Especialización Ingeniería Ambiental

C.I.: 1801914449

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, reducción de DQO por tratamientos físico-químicos de coagulación-floculación y electrocoagulación en aguas residuales de Karla Cecilia Jiménez Bautista, en el semestre 2018-1, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Viviana Pavlova Sigcha Terán

Máster Universitario En Gestión Integral Del Agua

C.I.: 1722216163

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”.

---

Karla Cecilia Jiménez Bautista

C.I.: 1717005274

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios y mi familia, en especial a mi hermano y mami quienes han estado siempre conmigo apoyándome. También al MSc. Daniel Hidalgo quien me ha guiado en el desarrollo de mi proyecto de titulación y a los docentes que han contribuido en mi formación académica.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo lo dedico a Dios por guiarme paso a paso en el transcurso de mi vida, a mi familia y sobre todo a mi hermano quien es mi amigo y ha compartido muchos momentos de mi vida, y a mi mami quien nos ha formado e inculcado valores y apoyado para siempre seguir adelante.

## RESUMEN

Las actividades antrópicas producen diferentes tipos de aguas residuales por lo que es necesario tratarlas para mantener un ambiente equilibrado. El objetivo del desarrollo de esta investigación fue realizar una comparación entre dos tipos de tratamiento para ver cuál es más eficiente en cuanto a la disminución de DQO en aguas procedentes de la trampa de grasas de una estación de servicio; uno de los tratamientos fue coagulación - floculación usando como variables tipo de coagulante y dosificación; con policloruro de aluminio y sulfato férrico como coagulantes y con una dosificación de 30, 35, 40, 45, 50 y 55 microlitros (ul), al realizar el cruce de variables el mejor fue de 35 ul con sulfato férrico dando con un resultado del 73,42% en la remoción del DQO; mientras que, el otro tratamiento fue electrocoagulación en el que se usó placas de aluminio y hierro, mismas que actúan como ánodo y cátodo respectivamente. Las variables que se usaron fueron intensidad y tiempo; 10 y 30 amperios como intensidad y 30, 45 y 60 minutos como tiempo. El cruce más eficiente de las variables fue con 30 amperios y 60 minutos el mismo que tuvo una remoción del 94,52% en la reducción de DQO. Después de contrastar los tratamientos físicos-químicos de coagulación – floculación y electrocoagulación se determinó que el tratamiento de electrocoagulación a mayor tiempo e intensidad obtuvo una mejor remoción de DQO.

**Palabras Claves:** Coagulación, floculación, dosis, electrocoagulación, DQO.



## **ABSTRACT**

Anthropological activities produce different types of wastewater, which is why it is necessary to treat them in order to keep our environment balanced. The main objective of the present research was to make a comparison between two types of treatment to determine which one was more efficient in terms of COD reduction in wastewater from the grease trap of a service station. One of the treatments was coagulation - flocculation using variables such as type of coagulant and dosage; with aluminum polychloride and ferric sulfate as coagulants and with dosages of 30, 35, 40, 45, 50 and 55 microliters (ul). Once the variable combinations were made, the most successful one was 35 ul of ferric sulfate, producing a 73.42% COD removal. On the other hand, electrocoagulation treatment was also applied, in which plates of aluminum and iron were used as anode and cathode respectively. The variables used in this case were intensity and time; 10 and 30 amps as intensity and 30, 45 and 60 minutes for time ranges. The most efficient variable combination was 30 amps and 60 minutes, which produced a 94.52% COD removal. After comparing both the physiochemical treatments of coagulation - flocculation and the electrocoagulation, it was determined that the electrocoagulation treatment with greater time and intensity achieved a better COD removal.

**Key Words:** Coagulation, flocculation, dose, electrocoagulation, COD.

# ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Antecedentes .....	1
1.2.	Objetivos .....	2
1.2.1.	Objetivo General.....	2
1.2.2.	Objetivos específicos.....	2
1.3.	Hipótesis.....	3
1.4.	Alcance.....	3
1.5.	Justificación.....	3
2.	MARCO TEÓRICO .....	4
2.1.	Aguas Residuales .....	4
2.2.	Parámetros físico-químico.....	5
2.2.1.	Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	5
2.2.2.	Turbidez .....	5
2.2.3.	Potencial de Hidrógeno .....	5
2.2.4.	Conductividad.....	6
2.2.5.	Sólidos.....	6
2.3.	Tratamiento de Aguas Residuales .....	7
2.3.1.	Coagulación – Flocculación.....	7
2.3.2.	Electrocoagulación (EC) .....	10
2.4.	Marco Legal .....	12

3.	METODOLOGÍA .....	13
3.1.	Muestreo del Agua Residual .....	13
3.2.	Caracterización físico-químico del Agua Residual .....	15
3.2.1.	Determinación De La Demanda Química Oxígeno (DQO) .....	15
3.2.2.	Turbidez .....	16
3.2.3.	Potencial de Hidrógeno (pH) y Conductividad.....	17
3.2.4.	Sólidos Sedimentables (SSed) .....	18
3.2.5.	Sólidos Totales (ST) .....	18
3.2.6.	Sólidos Disueltos (SDT).....	19
3.2.7.	Sólidos Suspendidos (SST) .....	20
3.2.8.	Sólidos Volátiles y Sólidos Fijos .....	21
3.3.	Coagulación–Floculación mediante Test de Jarras.....	22
3.4.	Electrocoagulación.....	22
3.5.	Diseño Experimental.....	24
3.5.1.	Diseño experimental de coagulación-floculación .....	24
3.5.2.	Diseño experimental tratamiento de electrocoagulación .....	26
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	27
4.1.	Resultados de la caracterización del agua residual .....	27
4.1.1.	Toma Uno (1) .....	27
4.1.2.	Toma Dos (2).....	29
4.2.	Resultados de las pruebas experimentales .....	32
4.2.1.	Resultados de Coagulación-Floculación.....	32
4.2.2.	Resultados de Electrocoagulación.....	36

4.3.	Análisis de los Resultados.....	39
4.3.1.	Análisis General .....	39
4.3.2.	Análisis Estadístico.....	48
4.3.3.	Análisis Comparativo entre Coagulación–Floculación y Electrocoagulación .....	65
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
5.1.	Conclusiones.....	71
5.2.	Recomendaciones .....	72
	REFERENCIAS .....	74
	ANEXOS .....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	<i>Rangos de pH para los diferentes tipos de tratamiento.....</i>	6
Tabla 2.	<i>Propiedades de un coagulante .....</i>	9
Tabla 3.	<i>Límites permisibles punto de descarga.....</i>	12
Tabla 4.	<i>Matriz de factores y sus niveles de tratamiento de coagulación-floculación.....</i>	25
Tabla 5.	<i>Matriz de combinación de factores y niveles.....</i>	25
Tabla 6.	<i>Matriz de factores y sus niveles de tratamiento de electrocoagulación.....</i>	26
Tabla 7.	<i>Matriz de combinación de factores y niveles.....</i>	26
Tabla 8.	<i>Caracterización de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), toma uno (1).....</i>	27
Tabla 9.	<i>Caracterización de sólidos totales de la toma uno (1).....</i>	27
Tabla 10.	<i>Caracterización de sólidos disueltos de la toma uno (1) .....</i>	28
Tabla 11.	<i>Caracterización de sólidos suspendidos de la toma uno (1) .....</i>	28
Tabla 12.	<i>Caracterización de sólidos volátiles de la toma uno (1) .....</i>	28
Tabla 13.	<i>Caracterización de sólidos fijos de la toma uno (1).....</i>	29
Tabla 14.	<i>Caracterización de DQO, toma uno (2). .....</i>	29
Tabla 15.	<i>Caracterización de sólidos totales de la toma dos (2).....</i>	29
Tabla 16.	<i>Caracterización de sólidos disueltos de la toma dos (2) .....</i>	30
Tabla 17.	<i>Caracterización de sólidos suspendidos de la toma dos (2) .....</i>	30
Tabla 18.	<i>Caracterización de sólidos volátiles de la toma dos (2).....</i>	30
Tabla 19.	<i>Caracterización de sólidos fijos de la toma dos (2) .....</i>	31
Tabla 20.	<i>Resultados de Demanda Química de Oxígeno.....</i>	32

Tabla 21.	<i>Resultados de Turbidez</i> .....	33
Tabla 22.	<i>Resultados de Conductividad</i> .....	33
Tabla 23.	<i>Resultados de Color</i> .....	34
Tabla 24.	<i>Resultados de Potencial de Hidrógeno</i> .....	35
Tabla 25.	<i>Resultados de Demanda Química de Oxígeno</i> .....	36
Tabla 26.	<i>Resultados de Turbidez</i> .....	36
Tabla 27.	<i>Resultados de Conductividad</i> .....	37
Tabla 28.	<i>Resultados de Color</i> .....	38
Tabla 29.	<i>Resultados de Potencial de Hidrógeno</i> .....	38
Tabla 30.	<i>Información del factor (variables independientes)</i> .....	49
Tabla 31.	<i>Análisis de Varianza</i> .....	50
Tabla 32.	<i>Resumen del modelo</i> .....	50
Tabla 32.	<i>Coeficientes</i> .....	51
Tabla 33.	<i>Comparaciones por parejas: Dosis (ul)</i> .....	52
Tabla 34.	<i>Comparaciones por parejas: Tipo de Coagulante</i> .....	53
Tabla 35.	<i>Comparaciones por parejas: Dosis*Tipo de Coagulante</i> .....	54
Tabla 36.	<i>Información del factor (variables independientes)</i> .....	57
Tabla 37.	<i>Análisis de Varianza</i> .....	58
Tabla 38.	<i>Resumen del modelo</i> .....	59
Tabla 39.	<i>Coeficientes</i> .....	59
Tabla 40.	<i>Comparaciones por parejas Intensidad (amperios)</i> .....	60
Tabla 41.	<i>Comparaciones por parejas: Tiempo (minutos)</i> .....	61
Tabla 42.	<i>Comparaciones por parejas: Intensidad * Tiempo</i> .....	62
Tabla 43.	<i>Comparación de la eficiencia de DQO entre coagulación-floculación y electrocoagulación.</i> .....	65

Tabla 44.	<i>Método del análisis estadístico comparativo</i> .....	66
Tabla 45.	<i>Información del factor</i> .....	66
Tabla 46.	<i>Análisis de Varianza</i> .....	67
Tabla 47.	<i>Resumen del modelo</i> .....	67
Tabla 48.	<i>Medias y Desviación Estándar del análisis comparativo</i> .....	67
Tabla 49.	<i>Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%</i> .....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i>	Partícula coloidal de carga negativa y positiva. ....	9
<i>Figura 2.</i>	Sitio de Muestreo.....	14
<i>Figura 3.</i>	Recipientes usados para el muestreo del agua residual, para su posterior tratamiento.....	15
<i>Figura 4.</i>	Proceso de DQO. Adaptado de (“Macherey- Nagel”, 2002).....	16
<i>Figura 5.</i>	Bloque digestor.....	16
<i>Figura 6.</i>	Medición de Conductividad en el Sitio de muestreo con el equipo Milwaukee Ec 59. ....	17
<i>Figura 7.</i>	Medición de pH con tirillas en el sitio de muestreo. ....	18
<i>Figura 8.</i>	Peso de crisoles para análisis de sólidos totales. ....	19
<i>Figura 9.</i>	Papel filtro después de filtración. ....	21
<i>Figura 10.</i>	Test de Jarras de marca VELP SCIENTIFICA modelo JLT6 Flocculation Tester.....	22
<i>Figura 11.</i>	Reactor en tratamiento. ....	23
<i>Figura 12.</i>	Precipitación de lodos en tiempo de sedimentación. ....	24
<i>Figura 13.</i>	Análisis de Sólidos Sedimentables.....	31
<i>Figura 14.</i>	Demanda Química de Oxígeno. ....	39
<i>Figura 15.</i>	Turbidez. ....	40
<i>Figura 16.</i>	Conductividad.....	41
<i>Figura 17.</i>	Color.....	42
<i>Figura 18.</i>	Potencial de Hidrógeno. ....	43
<i>Figura 19.</i>	Demanda Química de Oxígeno. ....	44
<i>Figura 20.</i>	Turbidez. ....	45



<i>Figura 21.</i>	Conductividad.....	46
<i>Figura 22.</i>	Color.....	47
<i>Figura 23.</i>	Potencial de Hidrógeno. ....	48
<i>Figura 24.</i>	Residuos para Remoción de DQO. ....	52
<i>Figura 25.</i>	Medias de Dosificación y Tipo de Coagulante. ....	54
<i>Figura 26.</i>	Interacciones de medias ajustadas de Dosis * Tipo de coagulante. ....	55
<i>Figura 27.</i>	Diagrama de cajas de coagulación–floculación. ....	56
<i>Figura 28.</i>	Diagrama de variables y media de remoción de DQO para Coagulación–Floculación. ....	57
<i>Figura 29.</i>	Diagrama de Residuos para Remoción de DQO. ....	60
<i>Figura 30.</i>	Medias de Intensidad y Tiempo.....	61
<i>Figura 31.</i>	Interacciones de medias de datos de Intensidad * Tiempo.....	63
<i>Figura 32.</i>	Diagrama de cajas de electrocoagulación. ....	63
<i>Figura 33.</i>	Diagrama de variables y media de remoción de DQO para Electrocoagulación.....	64
<i>Figura 34.</i>	Comparación de Eficiencia de DQO en los tratamientos. ....	66
<i>Figura 35.</i>	Diagrama de Residuos para Remoción de DQO. ....	68
<i>Figura 36.</i>	Diagrama de intervalos de remoción de DQO vs Tratamientos. ..	70
<i>Figura 37.</i>	Diagrama de valores individuales. ....	70
<i>Figura 38.</i>	Diagrama de caja de Remoción de DQO.....	71
<i>Figura 39.</i>	Soldadura de un extremo del cable con pinza tipo lagarto.....	82
<i>Figura 40.</i>	Materiales para electrocoagulación.....	83

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Antecedentes**

Las actividades humanas han demandado, a lo largo del tiempo, un uso cada vez mayor del recurso agua, sobre todo obtenida de fuentes superficiales de agua dulce. Al respecto, para el año 2007, en el mundo, aproximadamente se usaba por año un 40% de agua para la agricultura, un 20% para la industria y el 10% para ciudades, extraída de lagunas, ríos y esteros (Miller, 2007); generando las correspondientes aguas residuales de los procesos.

Según The Global Water Policy Project, en países en desarrollo se descarga de un 80 a 90% de aguas negras e industriales, por lo que estas aguas residuales cada vez se constituyen en una problemática a nivel mundial, toda vez que no todo este porcentaje es tratado previo a su descarga (Metcalf & Eddy, INC, 1995).

Un tipo de agua residual, que reviste especial importancia por el tipo de contaminantes que lleva, es aquella que contiene hidrocarburos, grasas y metales pesados, obstruyendo los pretratamientos, los cuales no son eficientes y permiten la descarga de estos contaminantes a los cuerpos receptores en condiciones adecuadas; estas aguas no tratadas pueden llegar a ecosistemas acuáticos afectando al medio ambiente y a la salud de las personas (EPA, 2000).

Una de las actividades antropogénicas que generan este tipo de aguas residuales son las Estaciones de Servicio, dado que utilizan este recurso para la limpieza de las pistas de carga y descarga. Para este tipo de aguas están normados los límites máximo permisible en el Reglamento Ambiental de Actividades Hidrocarburíferas (RAHOE, 2012).

La Estación de Servicio Alóag, objeto del presente estudio, se dedica a la comercialización y venta de combustible, sus aguas residuales superan los límites máximos permisibles (LMP) en lo que referente a DQO, problema que se agrava porque la zona en la que está ubicada la estación es de alta circulación

vehicular con un flujo constante de vehículos, para lo cual el área operativa cuenta con seis islas de despacho, habilitadas las 24 horas.

Para este tipo de aguas que presentan una gran cantidad de DQO, existen algunos tratamientos físico-químicos que se usan para reducir los contaminantes, como por ejemplo la coagulación–floculación, la electrocoagulación y, en los dos casos, la posterior sedimentación.

En la actualidad la Estación de Servicios Alóag cuenta con una trampa de grasas por pista la misma que tiene tres cámaras. A pesar de este pretratamiento el agua no logra alcanzar los límites máximos permisibles para descarga.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Determinar la eficiencia de la reducción de DQO mediante tratamientos de coagulación-floculación y electrocoagulación en aguas residuales procedentes de la limpieza de la pista de la Estación de Servicios Alóag.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar el agua residual antes y después de la trampa de grasa mediante análisis físico–químico.
- Determinar las condiciones del agua tratada mediante el uso del test de jarras y el reactor de electrocoagulación.
- Contrastar los tratamientos físico-químicos de coagulación-floculación y electrocoagulación, mediante ensayos de laboratorio y análisis estadístico para determinar sus eficiencias.

### **1.3. Hipótesis**

Reducir la cantidad de DQO del agua de descarga de la trampa de grasas de la Estación de Servicio Alóag al menos en un 50 %.

- Prueba de Hipótesis

Se pudo constatar que existió una reducción en la demanda química de oxígeno (DQO) del agua de descarga de la trampa de grasas de la Estación de Servicios Alóag en más de un 50 %.

### **1.4. Alcance**

El presente trabajo de titulación tiene como alcance, comparar la eficiencia entre los tratamientos de coagulación-floculación y electrocoagulación para la reducción del DQO en el efluente de la trampa de grasa, para disminuir la contaminación del agua que ha tenido contacto con aceites, desengrasantes e hidrocarburos.

El trabajo se realizó a escala laboratorio con la finalidad de identificar cuál de los tratamientos es más eficiente mediante la caracterización físico-química del agua tratada, su comparación con la caracterización inicial y el correspondiente análisis estadístico.

### **1.5. Justificación**

En la actualidad se manifiesta constantemente una presión global sobre los recursos naturales, especialmente por el agua dado que se espera un incremento del consumo, de más del 90% en los próximos 15 años (Barwal & Chaudhary, 2016). En el Ecuador la mayor parte de las actividades económicas están relacionadas con la utilización de grandes cantidades de agua dentro de los distintos procesos, estas aguas no reciben un tratamiento posterior a su uso; amenazando las distintas cuencas hidrográficas que conforman el país (CEPAL,

2011). En virtud de dicha problemática, es indispensable buscar alternativas de solución adecuadas, de tal manera que permita aplicar tecnologías eficientes y amigables con el ambiente.

En el presente proyecto se desea reducir el DQO del agua residual generada en la Estación de Servicio Alóag, con el fin de cumplir con los límites permisibles de la normativa de actividades hidrocarburíferas.

A partir de la implementación de los tratamientos químicos, se beneficiarán tanto los ecosistemas acuáticos como a los pobladores cercanos al sitio de descarga final, por la disminución de la contaminación. Los estudios comparativos de electrocoagulación con la coagulación - floculación química son escasos y se limitan a evaluaciones comparativas de la eficiencia de remoción (Harif, Khai, & Adin, 2012). Por lo tanto, un enfoque más fundamental puede ser necesario para poder postular la relevancia del proceso de la electrocoagulación en los procesos de tratamiento de agua, frente a la coagulación química.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Aguas Residuales**

Las aguas residuales provenientes de procesos industriales representan una amenaza para el ambiente debido a la presencia de una gran cantidad de contaminantes que afectan al desarrollo natural de ecosistemas ocasionando el cambio de parámetros físico-químico (Forero, Ortiz & Ríos, 2005).

El agua proveniente del lavado de estaciones de servicio puede ocasionar problemas ambientales con consecuencias a largo plazo tanto en ecosistemas y en el hombre. Estas sustancias provocan efectos negativos sobre la salud como complicaciones renales o hepáticas, o pueden actuar como depresores del sistema nervioso central. Además, originan problemas fisiológicos o bioquímicos alterando el sistema reproductivo y provocando alteraciones genéticas (Montoya & Páez, 2012).

## **2.2. Parámetros físico-químico**

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

Este parámetro establece la cantidad de Oxígeno que se necesita para oxidar la materia orgánica e inorgánica (Rodríguez, 2007), proporcionando de esta manera una medida indirecta de la presencia de materia presente (Aznar & Barba, 2000), por lo tanto cuando existe una oxidación de los contaminantes orgánicos e inorgánicos de aguas residuales, el oxígeno disminuye provocando efectos negativos en la vida acuática (Crespi & Huertas, 1986).

### **2.2.2. Turbidez**

La turbidez es la dificultad para transmitir luz, es un fenómeno óptico que consiste en la absorción de luz acompañado con la obstrucción del paso de esta (Lapeña, 1989). Está expresada en unidades nefelométricas de turbiedad (NTU), y está asociada con el tamaño de partículas en el agua: a menor tamaño existirá una mayor turbidez (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010). Los sólidos suspendidos con velocidades de sedimentación lentas y tamaños de 1  $\mu\text{m}$  y 1nm son los causantes de la turbidez y color del agua (Ramalho, Beltrán, & de Lora, 1990). Pueden provenir de actividades industriales, por vertidos urbanos o por eventos de arrastre como de remoción de tierras (Pérez Garrido, León Rodríguez, & Delgadillo García, 2013).

### **2.2.3. Potencial de Hidrógeno**

El pH se mide a partir de la concentración de iones de hidrógeno, que al mismo tiempo es la medida de la acidez del agua, al tener un exceso de iones de hidrógeno se tiene una solución ácida; mientras que, la escasez de iones de hidrógenos lo hace básico (Peirce, Weiner, & Vesilind, 2003). Existen algunos niveles de pH para los diferentes tipos de tratamientos como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1.

*Rangos de pH para los diferentes tipos de tratamiento*

<b>Tipo de Proceso</b>	<b>Rango de pH</b>
Vida biológica	6,5 a 8,5
Tratamiento Secundario	6 a 9
Procesos biológicos de nitrificación	7,2 a 9,0
Desnitrificación	6,5 a 7,5

Adaptada de (Jairo Alberto Romero Rojas, 2005)

**2.2.4. Conductividad**

La conductividad es un parámetro que determina la destreza del agua de pasar energía eléctrica. Indica la materia ionizable presente en el agua por lo que es el resultado del movimiento de los iones de las impurezas de la misma (Lapeña, 1989). Se ve afectada por la presencia de sólidos disueltos como aniones de cloratos, nitratos, sulfatos, y fosfatos o cationes de sodio, magnesio, calcio, hierro, aluminio (López, Nevels, & Kading, 2011).

**2.2.5. Sólidos**

Generalmente las aguas residuales contienen un 99.9% de agua y lo restante está constituido por materia sólida (Ramalho et al., 1990). Esta materia sólida puede ser clasificada por gravimetría o temperatura. Dentro de los de los sólidos de gravimetría se engloban los sólidos sedimentables, disueltos y suspendidos, mientras que los sólidos de temperatura se subdividen en fijos y volátiles. Los

sólidos sedimentables son las partículas gruesas que se decantan por la gravedad en un tiempo determinado, las mismas que se quedan en el fondo del recipiente (Metcalf & Eddy, INC, 1995). Los sólidos suspendidos están compuestos por partículas inorgánicas y orgánicas que pueden ser fácilmente separadas de la fase líquida mediante procesos de sedimentación, centrifugación o filtración (Ramalho et al., 1990). Los sólidos disueltos corresponden a la materia orgánica e inorgánica disuelta en el agua que se determina por la evaporación de un volumen de agua previamente filtrada siendo éstos el residuo seco restante (Lapeña, 1989).

Por otro lado, los sólidos fijos son el restante de los sólidos disueltos o suspendidos, después de someter una muestra a sequedad por un tiempo específico y una temperatura de 550 °C, mientras que los sólidos volátiles son el peso resultante de la pérdida por combustión (Lapeña, 1989).

### **2.3. Tratamiento de Aguas Residuales**

El tratamiento de aguas residuales radica en una serie de procesos, y existen diferentes tipos de tratamientos tanto físicos, biológicos y químicos que tienen como finalidad la reducir la cantidad de contaminantes existentes en el agua como grasas, metales e hidrocarburos. El agua residual contaminada con hidrocarburos o sus derivados es de gran importancia ya que hasta el año 2004 existió un derrame aproximado de 1.5 millones de toneladas al año (Ferrera, Rojas, Poggi, Alarcón, & Cañizares, 2006).

#### **2.3.1. Coagulación – Floculación**

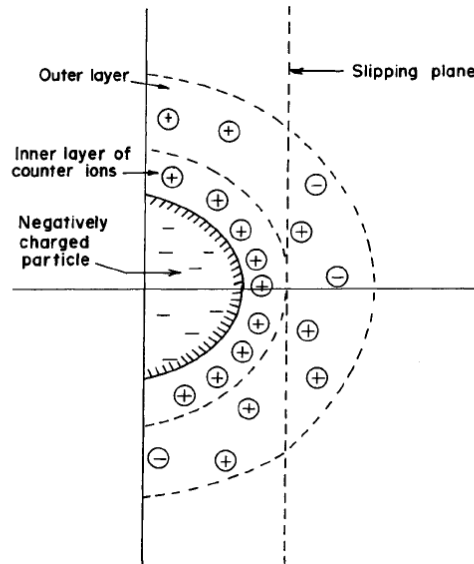
La coagulación-floculación es un proceso físico-químico que consiste en de dos fases destinadas a la eliminación de las partículas estables en el agua, formando agregados mayores que pueden separarse de la fase acuosa mediante una etapa de separación posterior (Oyegbile, Ay, & Narra, 2016).



La coagulación es la fase preliminar que se enfoca en la eliminación de partículas coloidales<sup>1</sup>, para que se agrupen entre sí y se formen partículas más grandes que puedan ser eliminadas por sedimentación (Andía Cárdenas, 2000); y por lo general el material coloidal tiene carga negativa impidiendo así su agrupación. No obstante, las capas cargadas que envuelven a las partículas generan una energía entre ellas para su eliminación se requiere la reducción de esta barrera de energía neutralizando las cargas eléctricas y excitando a las partículas a colisionar entre sí, a esta neutralización de carga se denomina coagulación. Una forma de lograr este fin es agregar cationes trivalentes al agua. La presencia de partículas insolubles en el agua se debe a la repulsión de las mismas causada por la interacción eléctrica de doble capa en donde la capa exterior tiene, por lo general, carga negativa que impide su agrupación. No obstante, las capas cargadas que envuelven a las partículas generan una energía entre ellas. Para lograr la coagulación se requiere la reducción de esta barrera de energía neutralizando las cargas eléctricas y excitando a las partículas a colisionar entre sí (Vargas & Romero, 2006). La adición de compuestos iónicos solubles afectará al potencial superficial de las partículas coloidales por adsorción a la superficie de las partículas o por compresión de doble capa. (Ramalho et al., 1990). Al añadir cationes trivalentes al agua, las partículas cargadas negativamente se unirán y neutralizarán (Salas, 2003). De esta manera se reduce la carga neta negativa y, en consecuencia, se disminuye la fuerza de repulsión logrando que las partículas colisionen y se unan. Así, la suspensión coloidal estable se convierte en una suspensión coloidal inestable (Peirce et al., 2003). Es importante considerar que los coagulantes se rigen por el límite de solubilidad que está ligado directamente con el pH y la dosis de coagulante (Amirtharajah & O'Melia, 1990) .

---

<sup>1</sup> Coloidales: Partículas microscópicas con un diámetro de entre  $10^{-9}$  a  $10^{-5}$  m.



*Figura 1.* Partícula coloidal de carga negativa y positiva.  
Tomada de (Peirce et al., 2003, p. 467.)

Existen diferentes tipos de coagulantes iónicos que incluyen cationes y aniones multivalentes, tensoactivos iónicos, hidrógeno e iones de hidroxilo (Hogg, 2000). Los coagulantes más usados a nivel comercial son los de aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) y hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) los cuales cumplen con las propiedades que debe tener un coagulante como se describe en la Tabla 2 (Cornwell & Mackenzie L., 2013).

Tabla 2.

*Propiedades de un coagulante*

---

Catión trivalente

Comúnmente los coloides tienen cargas negativas por lo que se requiere de un catión para neutralizar la carga.

---

---

No toxico	Es fundamental para tener agua sin contaminantes.
-----------	---

---

Insoluble en un rango de pH neutro	El coagulante que se añade debe precipitarse, para que los iones no queden como residuo en el agua.
------------------------------------	---

---

Adaptada de (Cornwell & Mackenzie L., 2013, p. 580.)

La floculación es la segunda etapa del proceso combinado y consiste en la agregación de partículas coaguladas y precursores precipitados en flóculos dado al someter al agua a velocidades elevadas o como efecto de la turbulencia del flujo de transporte (Bratby, 1980). El éxito de la agregación entre partículas dependerá del grado de desestabilización alcanzado en la fase de coagulación y de la velocidad de colisión entre las partículas. En esta etapa se pueden identificar varias fases que estarán determinadas por el crecimiento de los flóculos (Tambo, 1991). Después de un tiempo determinado, se alcanza un estado estacionario entre la agregación y la fragmentación, marcado por una distribución de tamaño de flóculos que es constante con el tiempo y es única para las condiciones prevalecientes de cada sistema (Jarvis, Jefferson, Gregory, & Parsons, 2005).

En este tratamiento se puede usar ayudantes de floculación que son generalmente polímeros catiónicos, aniónicos o no iónicos que ayudan a formar flóculos más densos para su sedimentación. (Delphos & Wesner, 2005)

### **2.3.2. Electrocoagulación (EC)**

La electrocoagulación en la última década ha ganado reconocimiento como un proceso eficaz para diversas aplicaciones de tratamiento de agua. Es un tratamiento que requiere una corriente eléctrica para la generación de iones de

diferentes cargas para producir una desestabilización de las partículas, de esta forma se generan partículas pesadas para la sedimentación (Morante, 2002). La investigación en EC, aunque no ha sido extensa, ha examinado la eliminación de materia orgánica y coloidal (Vik, Carlson, Eikum, & Gjessing, 1984). En una amplia gama de aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales. Poco a poco es más considerado como un proceso económico avanzado de tratamiento de agua que ha demostrado ser eficaz en la eliminación de sólidos en suspensión, metales pesados y la degradación de los emulsionantes (Lai & Lin, 2004).

En la electrocoagulación, las especies coagulantes activas se generan in situ por oxidación electrolítica de un material de ánodo apropiado, diferenciándose así de coagulación química (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006). Las reacciones electroquímicas semicelulares que se producen en la célula EC (usando un ánodo de aluminio) y sus correspondientes potenciales de electrodo estándar son:

- Cátodo:  $2H_2O + 2 e^- \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^-$
- Ánodo:  $O_{2(g)} + 4 H^+ + 4 e^- \rightarrow 2H_2O$

La placa de hierro tiene una polaridad negativa (cátodo), y la de aluminio una polaridad positiva (ánodos), que cumplen la función de electrodos en paralelo dentro de la celda electrolítica (Morales & Acosta, 2010).

Se realizan estos procesos químicos en el agua de tal manera que los iones cargados positivamente son atraídos a los iones hidróxidos cargados negativamente que producen hidróxidos iónicos con una fuerte tendencia a atraer partículas suspendidas que conducen a la coagulación (Acosta, 2006).

En experimentos anteriores se ha observado que la electrocoagulación ha logrado una remoción de DQO, grasa y aceites; por consiguiente, se considera a esta tecnología como un posible tratamiento efectivo a la hora de tratar agua residual (Morante, 2002).

## 2.4. Marco Legal

En la Constitución de la República del Ecuador con Registro Oficial No.449 del 20 de octubre del 2008, se establece que se debe seguir un orden jerárquico legal de acuerdo con lo señalado al artículo 425. Además, en el artículo 14 se establece el derecho del buen vivir en un ambiente sano y el numeral 27 del artículo 66 establece el derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado, libre de contaminación y en armonía con la naturaleza.

En este sentido, el reglamento ambiental empleado para evaluar los LMP de descarga es el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) con Decreto Ejecutivo 3516 del 31 de marzo del 2003, la misma que rige nacionalmente en el componente ambiental, la misma que detalla los límites máximos permisibles para calidad del agua, suelo, ruido y desechos.

Sin embargo, para todas las operaciones hidrocarburíferas rige el Reglamento Ambiental de Actividades Hidrocarburíferas, Decreto Ejecutivo 1215 con Registro Oficial 265 del 13 de febrero del 2001 y con una modificación el 29 de septiembre del 2010.

Para este tipo de aguas están normados los límites máximo permisible en la Tabla No.4a del RAHOE los cuales se detallan en la Tabla 3; en esta normativa se establece que se realicen análisis de bario, cromo total, Demanda Química de Oxígeno (DQO), plomo, pH, conductividad, sólidos totales, hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y vanadio, para caracterizar dichas aguas.

Tabla 3.

*Límites permisibles punto de descarga.*

<b>Parámetro</b>	<b>Expresado en</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Límite Permisible</b>	<b>Promedio Anual</b>
Potencial hidrógeno	pH	---	5<pH<9	5.0<pH<9.0
Conductividad eléctrica	CE	μS/cm	<2500	<2000

<b>Parámetro</b>	<b>Expresado en</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Límite Permisible</b>	<b>Promedio Anual</b>
Hidrocarburos totales	TPH	mg/l	<20	<15
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	<120	<80
Sólidos Totales	ST	mg/l	<1700	<1500
Bario	Ba	mg/l	<5	<3
Cromo (total)	Cr	mg/l	<0.5	<0.4
Plomo	Pb	mg/l	<0.5	<0.4
Vanadio	V	mg/l	<1	<0.8

Adaptada de RAHOE 1215.

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Muestreo del Agua Residual**

Los muestreos para los tratamientos fueron realizados en la tercera cámara de la trampa de grasas de la Estación de Servicio Alóag, antes de ser descargadas al alcantarillado, mientras para la caracterización del agua residual, se muestreo en la primera y tercera cámara de la trampa de grasas. En la *Figura 2* se observa la trampa de grasas en donde se realizó el muestreo.



*Figura 2.* Sitio de Muestreo.

Para la recolección del agua residual se realizó un muestreo simple que consiste en coleccionar el agua en un lugar y tiempo determinado para su posterior análisis. Al realizar el muestreo del agua residual se trasladado al laboratorio de aguas de la Universidad De Las Américas, para mantener en refrigeración a 4 grados centígrados de esta manera se preserva la muestra para su posterior utilización. Para la toma de muestras se usó la metodología establecida en las guías metodológicas de buenas prácticas de muestreo establecidas por la EPA, las mismas que son usadas a nivel nacional e internacional por los laboratorios acreditados.

Los recipientes usados se enjuagaron al menos dos veces con el agua a ser recogida, para evitar un cruce de muestras, una vez realizado este procedimiento se almacena en recipientes para su diferente tratamiento en el laboratorio, mientras para el análisis de la caracterización del agua se sumergió el frasco destapado por debajo de la superficie del agua, procurando colocar la boca de la botella en el centro. La muestra se ubicó tan lejos de los bordes y de los obstáculos, como sea posible, la muestra se selló herméticamente, posteriormente se etiquetaron los frascos.



*Figura 3.* Recipientes usados para el muestreo del agua residual, para su posterior tratamiento.

### **3.2. Caracterización físico-químico del Agua Residual**

#### **3.2.1. Determinación De La Demanda Química Oxígeno (DQO)**

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) fue medida mediante determinación fotométrica de la concentración de cromo después de la oxidación con dicromato potásico, ácido sulfúrico y sulfato de plata (Nanocolor, Macherey-Nagel COD Ref. 985 026).

En el tubo de reacción, se agregó 2 mL de muestra de agua residual sin filtrar. Luego se agitó verticalmente hasta completar la disolución, se colocó el tubo de ensayo en el bloque digestor a una temperatura de 150°C durante 120 min, después de este tiempo se agitó y se dejó enfriar a temperatura ambiente. El tubo de ensayo se llevó al fotómetro de marca Macherey-Nagel Nanocolor D500 y se midió a una longitud de onda de 436 nm la concentración de demanda química de oxígeno en mg/L DQO (“Macherey- Nagel”, 2002).



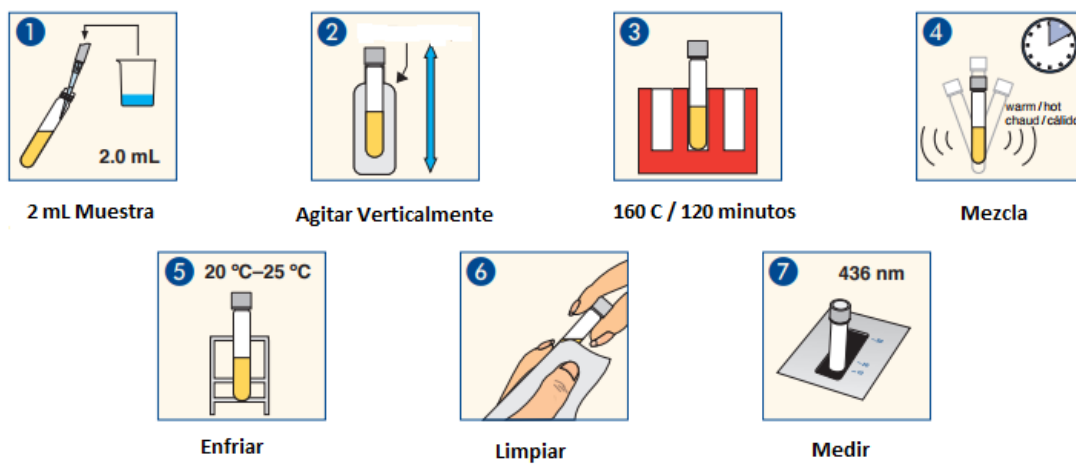


Figura 4. Proceso de DQO.  
Adaptado de ("Macherey- Nagel", 2002)

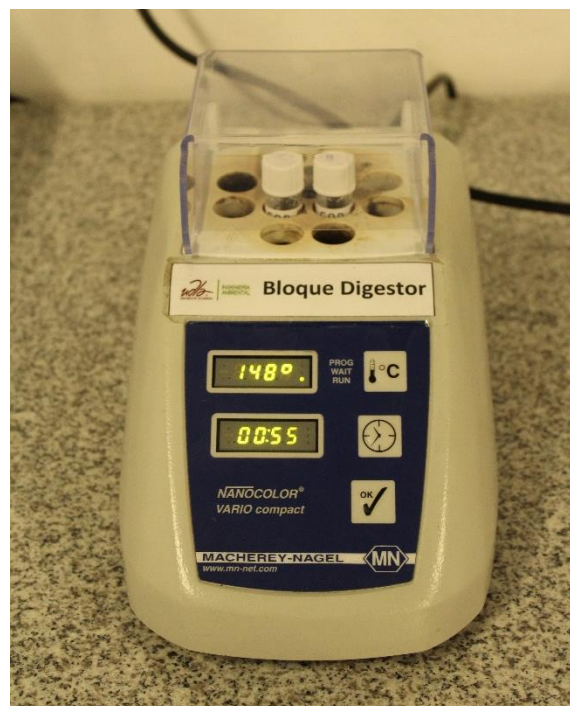


Figura 5. Bloque digestor.

### 3.2.2. Turbidez

Este parámetro se midió al inicio y final de cada tratamiento con el fotómetro de marca Macherey-Nagel Nanocolor D500 que mide de 0.1-1000 NTU.

Para la medición de turbidez, se colocó 15 mL de muestra en tubos de ensayo previamente lavados y secados en la estufa, una vez preparados los tubos de ensayo se los colocó en el espacio para la cubeta, se buscó la función de turbidez en las funciones básicas del fotómetro, se esperó unos segundos para obtener los resultados.

### 3.2.3. Potencial de Hidrógeno (pH) y Conductividad

El pH y la conductividad son parámetros que se midieron en el sitio de muestreo y en el laboratorio para su posterior análisis, además estos parámetros fueron medidos a la misma hora.

Para la medición de pH en campo se usó el equipo de marca Milwaukee MW102 y tirillas de pH de marca MACHERY-NAGEL las mismas que se empapan de agua, se sacude y se compara el resultado con la caja misma que contiene rangos de pH.

Para la conductividad se usó el equipo Milwaukee Ec 59 el cual tiene un electrodo que se sumerge en el agua, se esperó unos minutos a que se estabilice para obtener el resultado; mientras, en el laboratorio se usó el equipo de marca HANNA INSTRUMENT, modelo HI 2550, el mismo que fue previamente calibrado, la medición se realizó con el mismo procedimiento.



*Figura 6.* Medición de Conductividad en el Sitio de muestreo con el equipo Milwaukee Ec 59.



Figura 7. Medición de pH con tirillas en el sitio de muestreo.

#### 3.2.4. Sólidos Sedimentables (SSed)

Se agregó un litro de la muestra de agua residual en el tubo Imhoff y se esperó 45 minutos, al finalizar este tiempo con una varilla de vidrio se desplazó con suavidad los sólidos que se han adherido en las paredes. Y se dejó sedimentar por 15 minutos antes de obtener los resultados.

#### 3.2.5. Sólidos Totales (ST)

Para sólidos totales se pesó la cápsula de porcelana en la balanza analítica, posteriormente se colocó 25 ml de agua residual y se llevó al horno a una temperatura de 103 a 105 °C, hasta que se evaporó, este proceso duró aproximadamente una hora. Se dejó enfriar en el decantador durante una hora y se pesó la cápsula.

*Ecuación 1*

$$ST = 10^6 * \frac{(A - B)}{C} \left[ \frac{mg}{L} \right]$$

*Donde:*

*A = Peso del recipiente con sólido seco [g]*

$B = \text{Peso del recipiente vacío [g]}$

$C = \text{Volumen de la muestra [ml]}$



Figura 8. Peso de crisoles para análisis de sólidos totales.

### 3.2.6. Sólidos Disueltos (SDT)

Para sólidos disueltos se filtró al vacío 100 ml de agua residual con papel filtro de fibra de vidrio con un diámetro de poro de 47 mm. Se recolectó 10 ml de agua filtrada en un matraz, se midió la conductividad y se llevó al horno a vaporizar a una temperatura de 105°C, posteriormente se colocó en el desecador.

Para la preparación del papel filtro se llevó a la estufa durante 15 minutos a una temperatura de 105°C para eliminar la humedad posteriormente se pesó en la balanza analítica. El papel filtro se manipuló usando pinzas.

*Ecuación 2*

$$SD = 10^6 * \frac{(A - B)}{C} \left[ \frac{mg}{L} \right]$$

Donde:

$A = \text{Peso del recipiente con sólido seco [g]}$

$B = \text{Peso del recipiente vacío [g]}$

$C = \text{Volumen de la muestra [ml]}$

### 3.2.7. Sólidos Suspendidos (SST)

El papel filtro que se usó en sólidos disueltos se lo puso en un crisol y se lo colocó en la estufa a 105°C, después se ubicó en el desecador y se pesó.

*Ecuación 3*

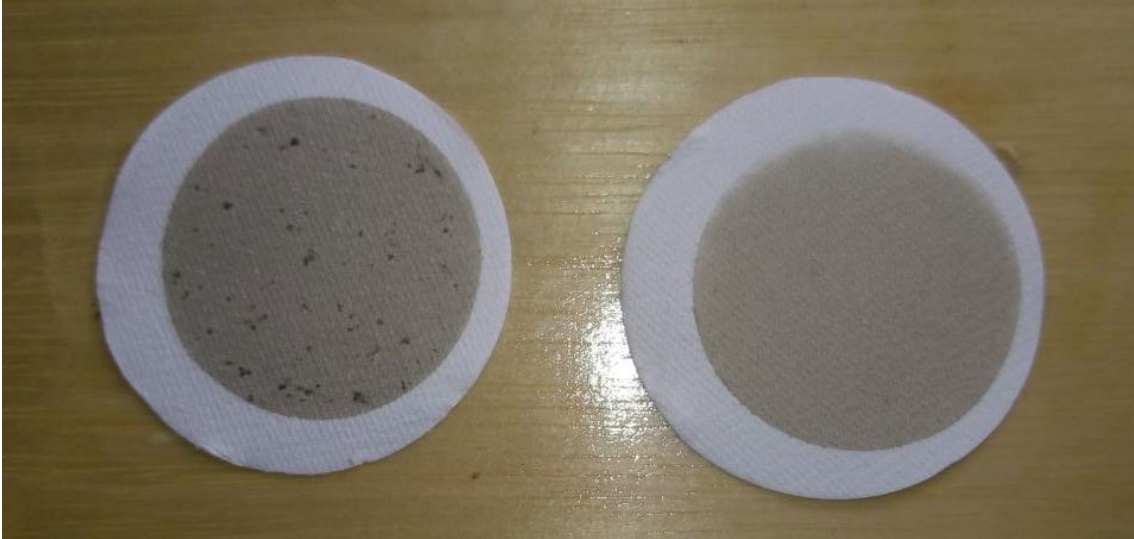
$$SS = 10^6 * \frac{(A - B)}{C} \left[ \frac{mg}{L} \right]$$

Donde:

$A = \text{Peso del papel filtro con muestra sólida seca [g]}$

$B = \text{Peso inicial del papel filtro [g]}$

$C = \text{Volumen de la muestra [ml]}$



*Figura 9.* Papel filtro después de filtración.

### 3.2.8. Sólidos Volátiles y Sólidos Fijos

Para sólidos volátiles se tomó los crisoles pesados de sólidos totales, y se los llevó a la mufla a 500°C por 2 horas. Posteriormente dejó secar y pesar.

*Ecuación 4*

$$SV = 10^6 * \frac{(A - B)}{C} \left[ \frac{mg}{L} \right]$$

*Donde:*

*A = Peso del sólidos totales [g]*

*B = Peso del sólidos totales despues de calcinación [g]*

*C = Volumen de la muestra [ml]*

### 3.3. Coagulación–Floculación mediante Test de Jarras

Para este tratamiento se usaron dos tipos de coagulantes, los mismos que fueron preparados previamente. Para sulfato férrico se preparó una solución patrón, mientras que para el policloruro de aluminio no requiere preparar una solución.

Se usó el test de jarras de marca VELP SCIENTIFICA modelo JLT6 Flocculation Tester como equipo para coagulación y floculación con diferentes velocidades, para coagulación se requiere una velocidad de 100 rpm durante dos minutos, mientras se agregó la dosis de coagulante, posteriormente a una velocidad de 40 rpm durante 20 minutos mientras se encuentra en el test de jarras se deberá romper el vórtex, para tener una mezcla homogénea. Una vez finalizado este proceso se dejó reposar por una hora. El volumen de agua residual usado en el test de jarras fue de 1000 ml.



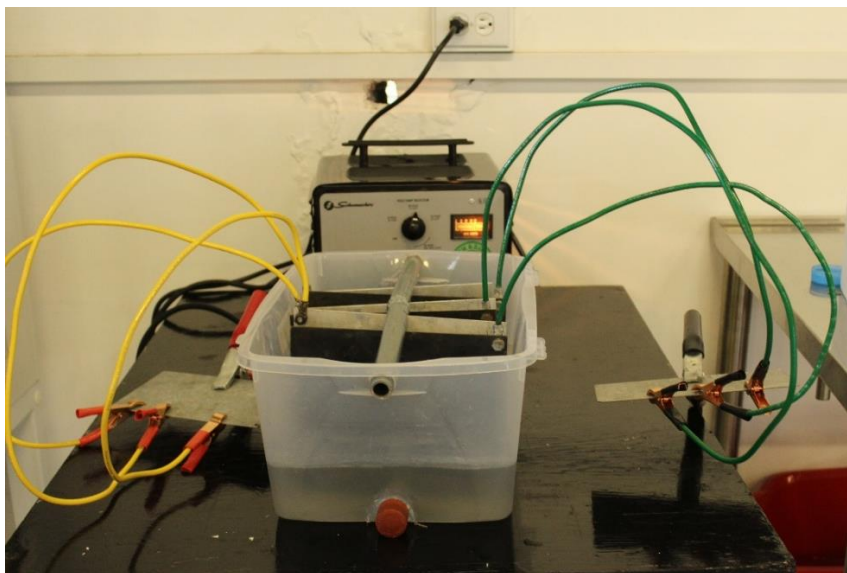
*Figura 10.* Test de Jarras de marca VELP SCIENTIFICA modelo JLT6 Flocculation Tester.

### 3.4. Electrocoagulación

Para este tratamiento se elaboró un reactor de capacidad de 4000 mL en el que se usaron tres (3) placas metálicas de hierro, tres (3) placas de aluminio,

colocadas en forma vertical e intercaladas, con una separación de 3 cm entre ellas. La placa de hierro funcionó como cátodo, y la de aluminio como ánodo.

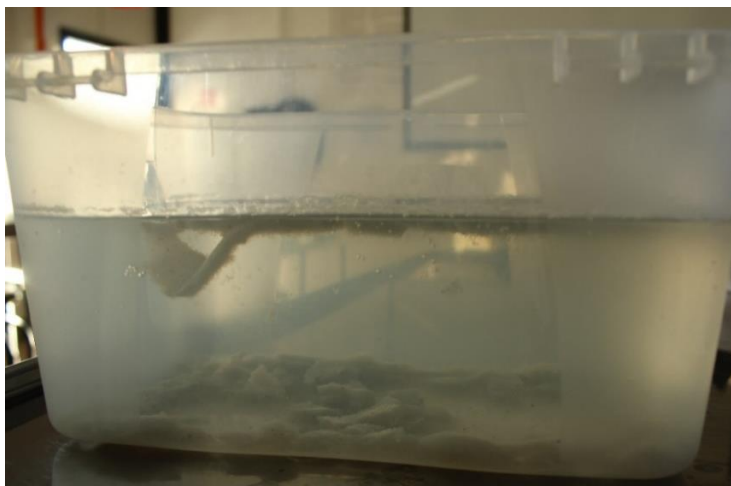
Se conectaron las pinzas tipo lagarto de polaridad positiva a un extremo de una lata mientras al otro extremo se conectó la pinza procedente del cargador de batería del mismo polo, de igual manera con las pinzas de polaridad negativa como se muestra en la *Figura 11*.



*Figura 11.* Reactor en tratamiento.

Posteriormente se regula en el cargador de batería la intensidad establecida en el diseño experimental al igual que el tiempo, una vez finalizado este procedimiento se deja reposar durante una hora para que los sedimentos se precipiten como se muestra en la *Figura 12*.





*Figura 12.* Precipitación de lodos en tiempo de sedimentación.

### **3.5. Diseño Experimental**

Se utilizaron dos diseños experimentales, uno para la electrocoagulación y otro para la coagulación – floculación, cada uno con dos repeticiones, para evidenciar la reducción de DQO de los afluentes de la actividad de la Estación de Servicio, los diseños utilizados corresponden a Diseños Factoriales Completamente Aleatorios (DFCA), de esta manera se determinó la efectividad y eficacia de las variables analizadas de cada tratamiento.

#### **3.5.1. Diseño experimental para tratamiento de coagulación-floculación**

Al realizar este tratamiento no se evidenciaba el pico de las dosis eficientes por lo que se incrementó una dosis mínima y una máxima en el factor dosificación, lo que implicó una modificación en el diseño factorial.

En la Tabla 4 se pueden apreciar a las variables categóricas que se usaran y en la Tabla 5, se puede observar su combinación realizada aleatoriamente y sus niveles para generar un total de 12 (doce) tratamientos. En cada tratamiento se analizará el porcentaje de remoción de DQO. La dosificación está dada para un litro de agua residual y la cantidad de dosis es en microlitros (ul).

Tabla 4.

*Matriz de factores y sus niveles de tratamiento de coagulación-floculación.*

<b>Factores</b>	<b>Nivel (-A)</b>	<b>Nivel (+A)</b>	<b>Nivel (-B)</b>	<b>Nivel (+B)</b>	<b>Nivel (-C)</b>	<b>Nivel (+C)</b>
Tipo de coagulante	Policloruro de Aluminio	Sulfato Férrico	-	-	-	-
Dosificación	30 ul	35 ul	40 ul	45 ul	50 ul	55 ul

Tabla 5.

*Matriz de combinación de factores y niveles*

<b>Tratamiento</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>
C1		- A (30 ul)
C2		+ A (35 ul)
C3	- A (Policloruro de Aluminio)	- B (40 ul)
C4		+ B (45 ul)
C5		- C (50 ul)
C6		+ C (55 ul)
C7		- A (30 ul)
C8		+ A (35 ul)
C9	+ A (Sulfato férrico)	- B (40 ul)
C10		+ B (45 ul)
C11		- C (50 ul)
C12		+ C (55 ul)

### 3.5.2. Diseño experimental tratamiento de electrocoagulación

En la Tabla 6 se pueden apreciar a las variables categóricas que se usaron y en la Tabla 7, se puede observar su combinación realizada aleatoriamente y sus niveles para generar un total de 6 (seis) tratamientos. En cada tratamiento se analizará el porcentaje de remoción de DQO.

Tabla 6.

*Matriz de factores y sus niveles de tratamiento de electrocoagulación.*

<b>Factores</b>	<b>Nivel (-A)</b>	<b>Nivel (+A)</b>	<b>Nivel (-B)</b>
Intensidad	10 amperios	30 amperios	-
Tiempo	30 minutos	45 minutos	60 minutos

Tabla 7.

*Matriz de combinación de factores y niveles*

<b>Tratamiento</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>
E1	- A (10 A)	- A (30 min)
E2	- A (10 A)	+ A (45 min)
E3	- A (10 A)	- B (60 min)
E4	+ A (30 A)	- A (30 min)
E5	+ A (30 A)	+ A (45 min)
E6	+ A (30 A)	- B (60 min)

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Resultados de la caracterización del agua residual

Para el cálculo de los diferentes sólidos se usaron fórmulas que se detallaron en el capítulo 3 Metodología, mientras que el cálculo se puede observar en el Anexo 1.

#### 4.1.1. Toma Uno (1)

Tabla 8.

*Caracterización de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), toma uno (1).*

Parámetro	Resultados Cámara 1	Resultados Cámara 3
DQO	486 mg/LO <sub>2</sub>	318 mg/LO <sub>2</sub>
pH	7,2	7,4

Tabla 9.

*Caracterización de sólidos totales de la toma uno (1)*

Muestra de agua	Peso del Crisol vacío	Volumen de muestra	Peso con Muestra Final	Sólidos Totales
Cámara Inicial	39,1182 g	25 ml	39,1264 g	328,00 mg/L
Cámara Final	41,7974 g	25 ml	41,8094 g	480,00 mg/L

Tabla 10.

*Caracterización de sólidos disueltos de la toma uno (1)*

<b>Muestra de Agua</b>	<b>Peso de crisol vacío</b>		<b>Volumen de muestra</b>		<b>Peso con muestra final</b>		<b>Sólidos Disueltos</b>	
Cámara Inicial	40,0384	g	25	ml	40,0442	g	232	mg/L
Cámara Final	37,2311	g	25	ml	37,2421	g	440	mg/L

Tabla 11.

*Caracterización de sólidos suspendidos de la toma uno (1)*

<b>Muestra de Agua</b>	<b>Peso Inicial del papel filtro</b>		<b>Cantidad de muestra tomada</b>		<b>Peso de papel filtro con muestra</b>		<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>	
Cámara Inicial	0,0934	g	100	ml	0,1030	g	96	mg/L
Cámara Final	0,0936	g	100	ml	0,0976	g	40	mg/L

Tabla 12.

*Caracterización de sólidos volátiles de la toma uno (1)*

<b>Muestra de Agua</b>	<b>Peso de sólidos totales</b>		<b>Volumen</b>		<b>Peso después de Calcinarse</b>		<b>Sólidos Volátiles</b>	
Cámara Inicial	39,1264	g	25	ml	39,1318	g	214	mg/L
Cámara Final	41,8094	g	25	ml	41,8142	g	192	mg/L

Tabla 13.

*Caracterización de sólidos fijos de la toma uno (1)*

<b>Muestra de agua</b>	<b>Sólidos Fijos</b>	
Cámara Inicial	114	mg/L
Cámara Final	288	mg/L

#### 4.1.2. Toma Dos (2)

Tabla 14.

*Caracterización de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), toma uno (2).*

<b>Parámetro</b>	<b>Resultados Cámara 1</b>	<b>Resultados Cámara 3</b>
DQO	476 mg/LO <sub>2</sub>	357 mg/LO <sub>2</sub>
pH	6,48	6,58

Tabla 15.

*Caracterización de sólidos totales de la toma dos (2)*

<b>Muestra de agua</b>	<b>Peso del Crisol vacío</b>		<b>Volumen de muestra</b>		<b>Peso con Muestra Final</b>		<b>Sólidos Totales</b>	
Cámara Inicial	39,1199	g	25	ml	39,1246	g	188	mg/L
Cámara Final	41,8438	g	25	ml	41,8494	g	224	mg/L

Tabla 16.

*Caracterización de sólidos disueltos de la toma dos (2)*

<b>Muestra de Agua</b>	<b>Peso de crisol vacío</b>		<b>Volumen de muestra</b>		<b>Peso con muestra final</b>		<b>Sólidos Disueltos</b>	
Cámara Inicial	39,3778	g	25	ml	39,3817	g	154	mg/L
Cámara Final	33,3830	g	25	ml	33,3881	g	204	mg/L

Tabla 17.

*Caracterización de sólidos suspendidos de la toma dos (2)*

<b>Muestra de Agua</b>	<b>Peso Inicial del papel filtro</b>		<b>Cantidad de muestra tomada</b>		<b>Peso de papel filtro con muestra</b>		<b>Sólidos Suspendidos</b>	
Cámara Inicial	0,0929	g	100	ml	0,0963	g	34	mg/L
Cámara Final	0,0944	g	100	ml	0,0964	g	20	mg/L

Tabla 18.

*Caracterización de sólidos volátiles de la toma dos (2)*

<b>Muestra de Agua</b>	<b>Peso de sólidos totales</b>		<b>Volumen</b>		<b>Peso después de Calcinarse</b>		<b>Sólidos Volátiles</b>	
Cámara Inicial	39,1246	g	25	ml	39,1292	g	184	mg/L
Cámara Final	41,8494	g	25	ml	41,8515	g	84	mg/L

Tabla 19.

Caracterización de sólidos fijos de la toma dos (2)

Muestra de agua	Sólidos Fijos	
Cámara Inicial	4	mg/L
Cámara Final	140	mg/L

Los sólidos fijos se calculan por diferencia entre sólidos totales con sólidos volátiles, mientras que al realizar el análisis de sólidos sedimentables se pudo evidenciar que no existen sólidos sedimentables, como se muestra en la *Figura 13*.



Figura 13. Análisis de Sólidos Sedimentables.



## 4.2. Resultados de las pruebas experimentales

### 4.2.1. Resultados de Coagulación-Floculación

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

Tabla 20.

*Resultados de Demanda Química de Oxígeno*

TIPO DE COAGULANTE	DOSIS	1era.	2da.	Eficiencia
		Repetición	Repetición	
		(mg/LO <sub>2</sub> )	(mg/LO <sub>2</sub> )	(%)
POLICLORURO DE ALUMINIO	30	85,5	81,8	43,48
	35	698	693	49,67
	40	671	671	51,45
	45	661	641	52,89
	50	605	602	56,33
	55	65,2	65,8	55,74
SULFATO FÉRRICO	30	128	126	14,19
	35	342	393	73,41
	40	586	569	58,21
	45	613	547	58,03
	50	625	621	54,92
	55	110	119	22,64

#### 4.2.1.2. Turbidez

Tabla 21.

*Resultados de Turbidez*

TIPO DE COAGULANTE	DOSIS	1era.	2da.	Eficiencia
		Repetición	Repetición	
		(NTU)	(NTU)	(%)
POLICLORURO DE ALUMINIO	30	8	11	95,87
	35	26,5	41,6	52,38
	40	13,6	14,5	80,35
	45	3,5	4,8	94,20
	50	7,9	7,9	88,95
	55	4,1	6,1	97,78
SULFATO FÉRRICO	30	19,7	16,2	92,19
	35	1,9	1,1	97,90
	40	2,2	1,1	97,69
	45	10,4	8,3	86,92
	50	7,4	7,8	89,37
	55	15,2	14,5	93,54

#### 4.2.1.3. Conductividad

Tabla 22.

*Resultados de Conductividad*

TIPO DE COAGULANTE	DOSIS	1era.	2da.	Promedio
		Repetición	Repetición	
		(uS)	(uS)	(uS)
POLICLORURO DE ALUMINIO	30	357	358	357,5
	35	409	300	354,5
	40	419	393	406
	45	390	431	410,5

TIPO DE COAGULANTE	DOSIS	1era.	2da.	Promedio
		Repetición	Repetición	
		(uS)	(uS)	(uS)
	50	326	315	320,5
	55	412	414	413
SULFATO FÉRRICO	30	335	333	334
	35	472	386	429
	40	489	387	438
	45	630	638	634
	50	590	609	599,5
	55	339	326	332,5

#### 4.2.1.4. Color

Tabla 23.

*Resultados de Color*

TIPO DE COAGULANTE	DOSIS	1era.	2da.	Eficiencia
		Repetición	Repetición	
		(Pt)	(Pt)	(%)
POLICLORURO DE ALUMINIO	30	5	7	97,54
	35	175	212	34,63
	40	78	157	60,30
	45	26	164	67,91
	50	62	56,7	79,95
	55	17	22	92,01
SULFATO FÉRRICO	30	142	116	47,13
	35	24	18	92,91
	40	30	23	91,05
	45	270	95	38,34
	50	80	92	70,95
	55	98	92	61,07

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

Tabla 24.

*Resultados de Potencial de Hidrógeno*

TIPO DE COAGULANTE	DOSIS	1era. Repetición	2da. Repetición	Promedio
POLICLORURO DE ALUMINIO	30	7	7	7
	35	7	7	7
	40	7	7	7
	45	7	7	7
	50	7	7	7
	55	7	7	7
SULFATO FÉRRICO	30	7	7	7
	35	7	6,88	6,94
	40	6	6	6
	45	7	7	7
	50	5	6	5,5
	55	7	7	7

## 4.2.2. Resultados de Electrocoagulación

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

Tabla 25.

*Resultados de Demanda Química de Oxígeno*

TRATAMIENTO	Intensidad	1era.	2da.	Eficiencia
		Repetición	Repetición	
		(mg/LO <sub>2</sub> )	(mg/LO <sub>2</sub> )	(%)
E1		155	150	77,00
E2	10 amperios	131	119	79,94
E3		138	131	78,98
E4		128	131	80,47
E5	30 amperios	120	117	81,48
E6		35,5	34,7	94,52

### 4.2.2.2. Turbidez

Tabla 26.

*Resultados de Turbidez*

TRATAMIENTO	Intensidad	1era.	2da.	Eficiencia
		Repetición	Repetición	
		(NTU)	(NTU)	(%)
E1		23,2	25,7	56,65
E2	10 amperios	10,3	16,5	75,50

TRATAMIENTO	Intensidad	1era.	2da.	Eficiencia
		Repetición	Repetición	
		(NTU)	(NTU)	(%)
E3		29,4	29,6	34,15
E4		13,1	26,2	65,16
E5	30 amperios	13,6	10,6	72,99
E6		7,3	7,9	83,04

#### 4.2.2.3. Conductividad

Tabla 27.

*Resultados de Conductividad*

TRATAMIENTO	Intensidad	1era.	2da.	Promedio
		Repetición	Repetición	
		(uS)	(uS)	(uS)
E1		318	304	311,00
E2	10 amperios	297	304	300,50
E3		303	293,5	298,25
E4		293,9	287,4	290,65
E5	30 amperios	306	311	308,50
E6		306	296,3	301,15

#### 4.2.2.4. Color

Tabla 28.

*Resultados de Color*

TRATAMIENTO	Intensidad	1era.	2da.	Eficiencia
		Repetición	Repetición	
		(Pt)	(Pt)	(%)
E1		106	116	37,99
E2	10 amperios	63	46	80,18
E3		130	133	30,05
E4		51	114	53,91
E5	30 amperios	69	59	65,96
E6		44	51	74,73

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

Tabla 29.

*Resultados de Potencial de Hidrógeno*

TRATAMIENTO	Intensidad	1era.	2da.	Promedio
		Repetición	Repetición	
E1		7,12	7,28	7,2
E2	10 amperios	7	6,8	6,9
E3		7	7	7
E4	30 amperios	7,3	7,28	7,29

TRATAMIENTO	Intensidad	1era. Repetición	2da. Repetición	Promedio
E5		7	7	7
E6		7	7	7

### 4.3. Análisis de los Resultados

Se efectuó un análisis por tratamiento y parámetros además se realizaron gráficas para evidenciar cual es más eficiente y un análisis estadístico en donde se mide el porcentaje de remoción de DQO.

#### 4.3.1. Análisis General

##### 4.3.1.1. Coagulación-Floculación

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

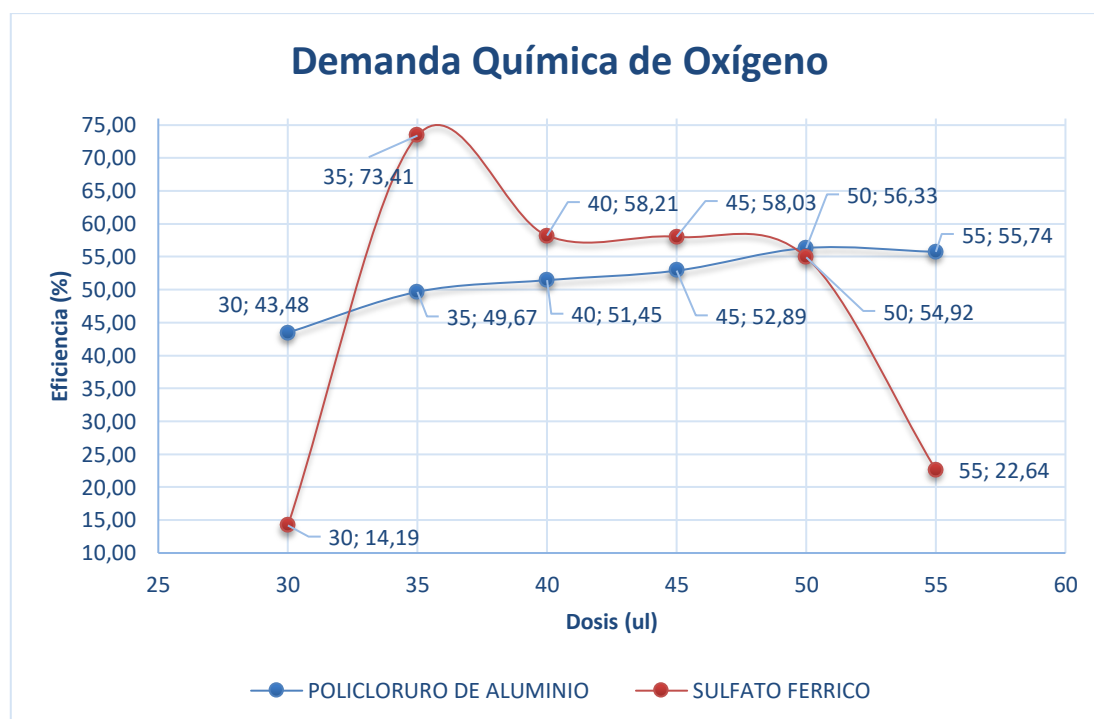
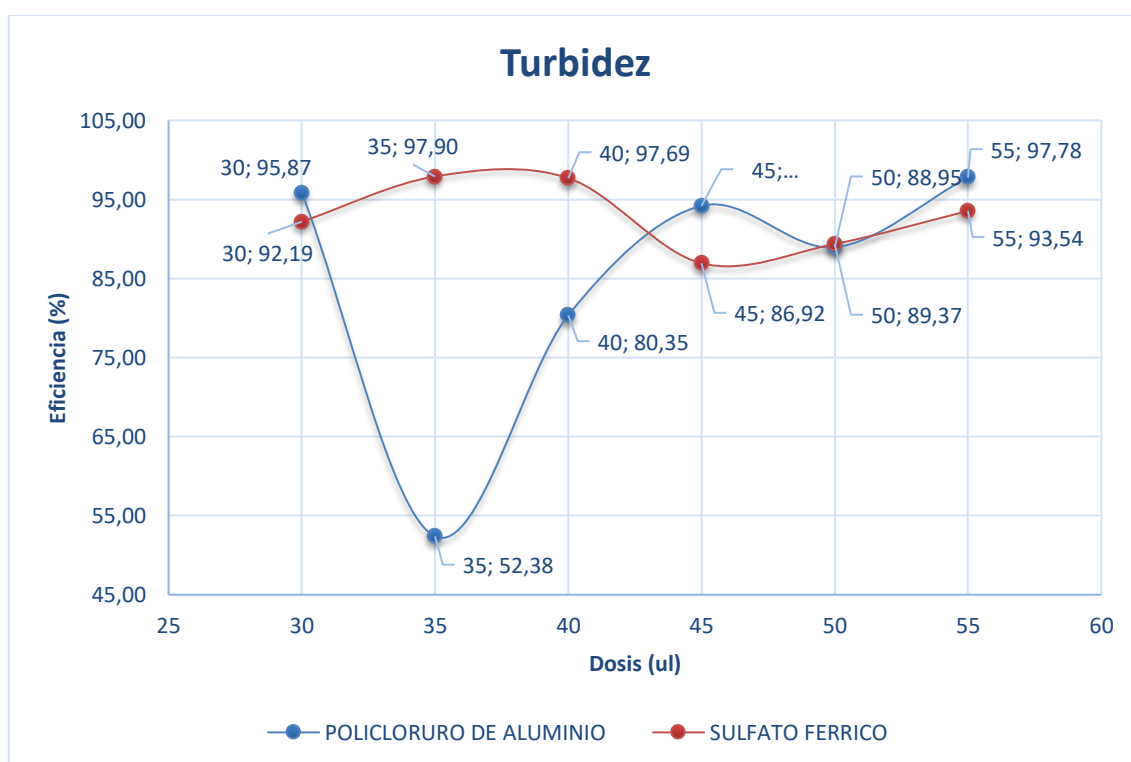


Figura 14. Demanda Química de Oxígeno.



Como se puede evidenciar en la *Figura 14* existe un pico, el mismo que refleja la mejor remoción de DOQ con un 73,41 % el que corresponde al tratamiento ejecutado con sulfato férrico como coagulante y con una dosis de 35 microlitros (ul). En general se muestra que el sulfato férrico ha tenido una mejor remoción a pesar de su variación en cuanto a dosificación, sin embargo, el policloruro de aluminio muestra cambios progresivos en cuanto su dosificación, teniendo como mejor remoción un 56,33 %.

## Turbidez



*Figura 15.* Turbidez.

Este parámetro tiene correlación con el DQO, ya que, al disminuir su concentración, la cantidad de sólidos también disminuye, permitiendo al agua tener una turbiedad menor. En la *Figura 15* se puede observar que la eficiencia de reducción de turbidez corresponde en un 97,90 %, en el mismo tratamiento que se redujo la demanda química de oxígeno.

## Conductividad

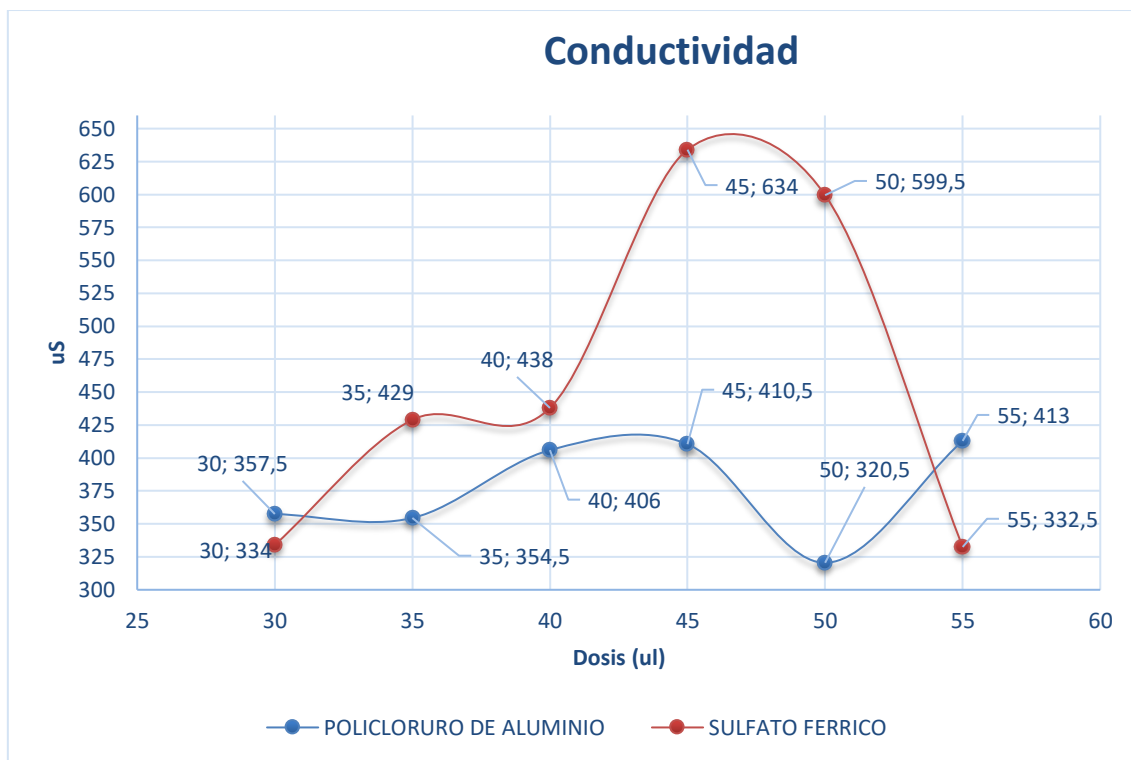


Figura 16. Conductividad.

En este parámetro no se sacó eficiencias, lo que se realizó es un promedio del resultado de las repeticiones, donde se evidencio que la mayor conductividad es de 634 us, la que corresponde al tratamiento con sulfato férrico como coagulante y a una dosis de 45 ul; mientras que, la menor conductividad es de 320, 5 us del tratamiento realizado con policlورو de aluminio y a una dosis de 50 ul.

## Color

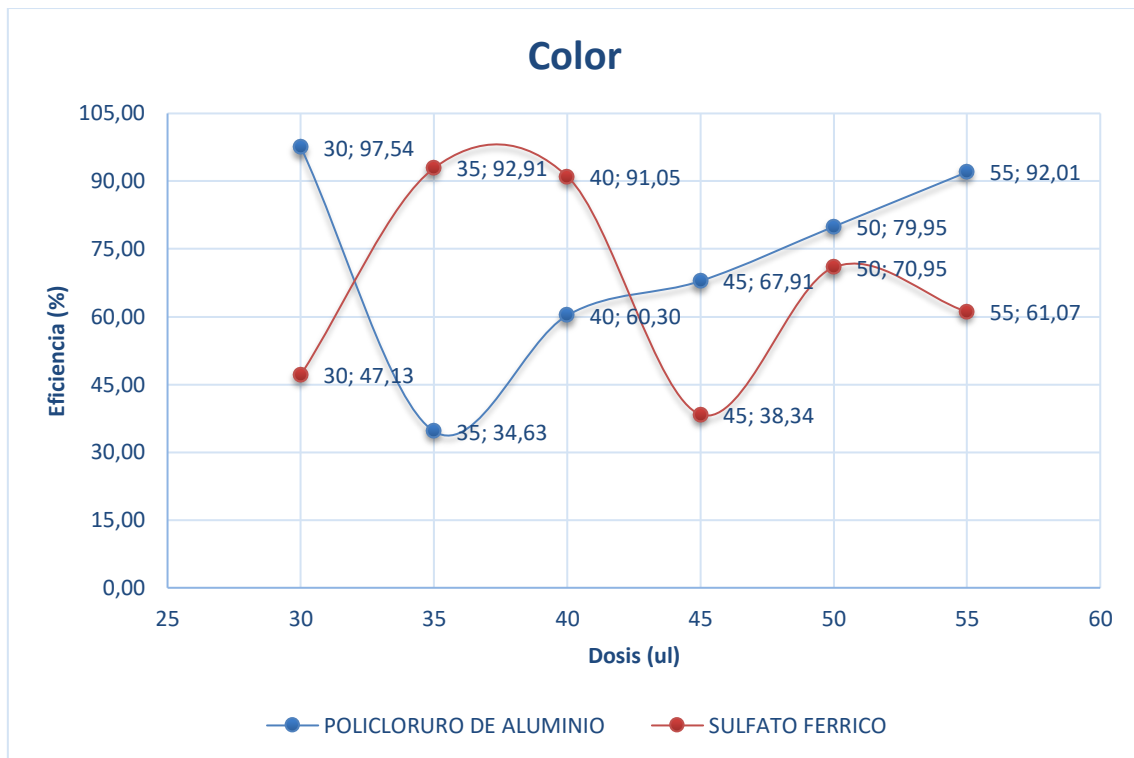


Figura 17. Color.

En cuanto a color tuvo una eficiencia de reducción de 97,54 % en el tratamiento con polícloruro de aluminio con una dosis de 30 ul; mientras que, con el sulfato férrico con una dosis de 35 ul, la eficiencia de reducción fue de 92,91 %.

## Potencial de Hidrógeno

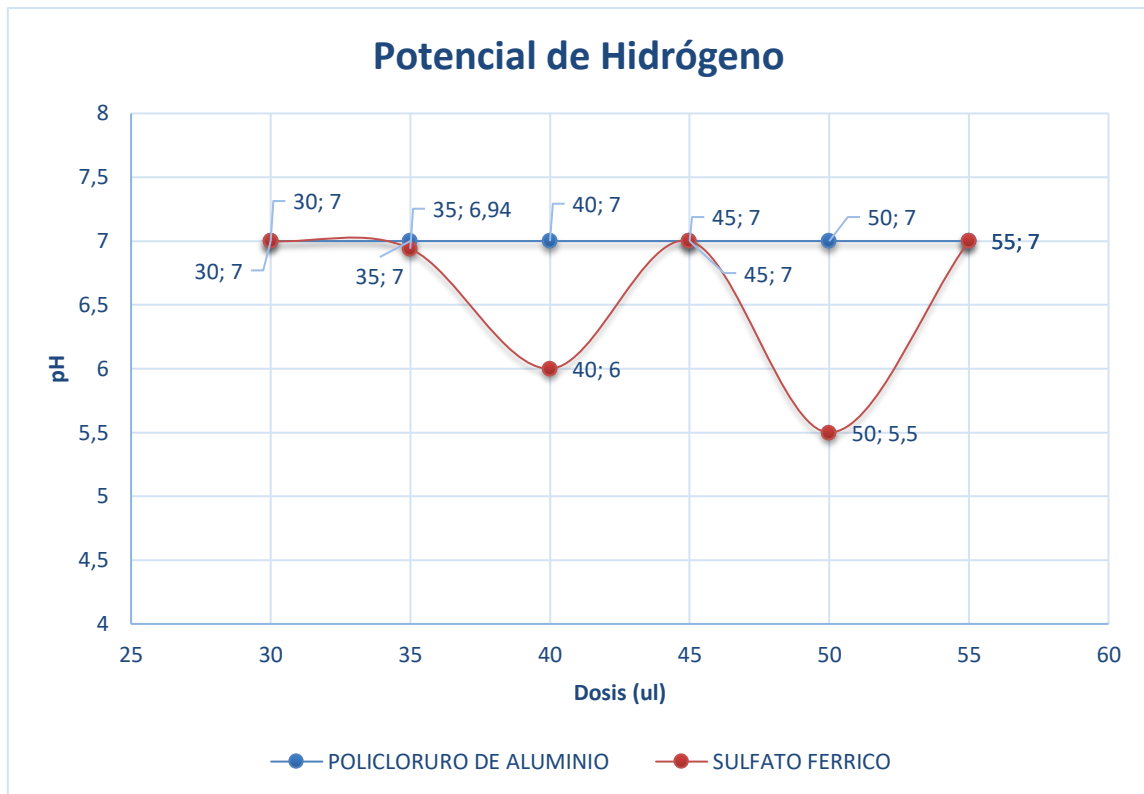


Figura 18. Potencial de Hidrógeno.

En caso del pH no se hace análisis ya que este dato no busca establecer un pH óptimo, sino el pH final luego del tratamiento.

### 4.3.1.2. Electrocoagulación Demanda Química de Oxígeno (DQO)

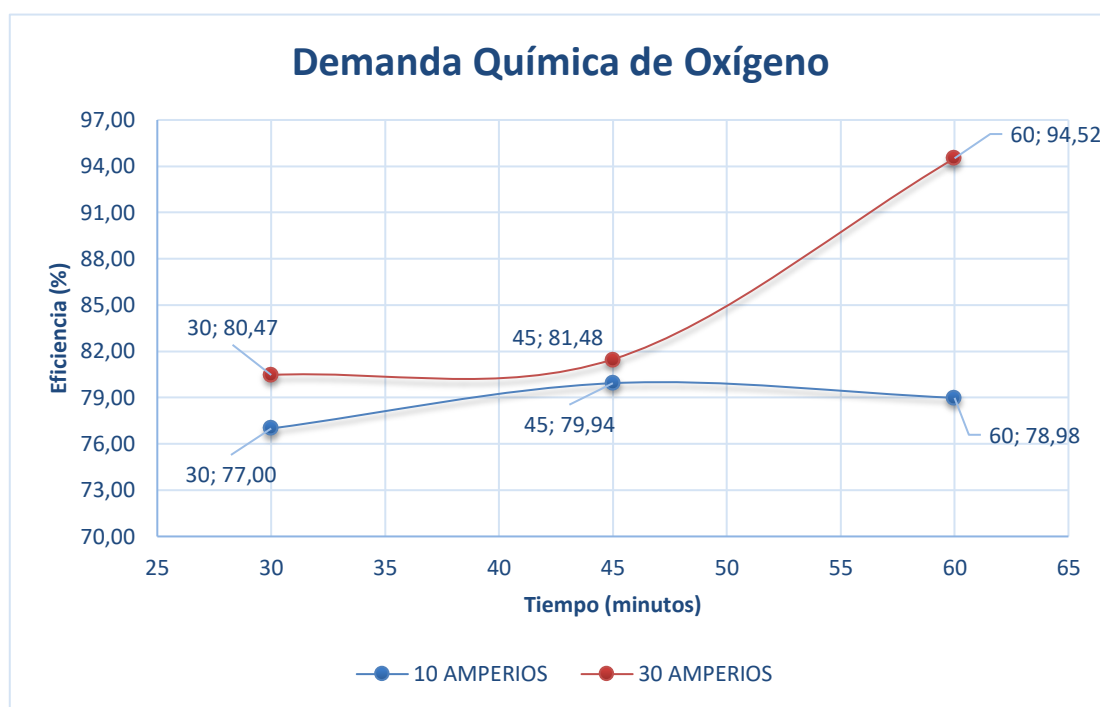


Figura 19. Demanda Química de Oxígeno.

Como se puede observar en la *Figura 19* el tratamiento más eficiente es a 30 amperios durante 60 minutos con un 94,52 % de remoción de DQO; mientras que, el menos eficiente es a 10 amperios durante 30 minutos con 77,00 % de remoción de esta manera se puede evidenciar que a una mayor intensidad y más tiempo mejor resultado se obtienen.

## Turbidez

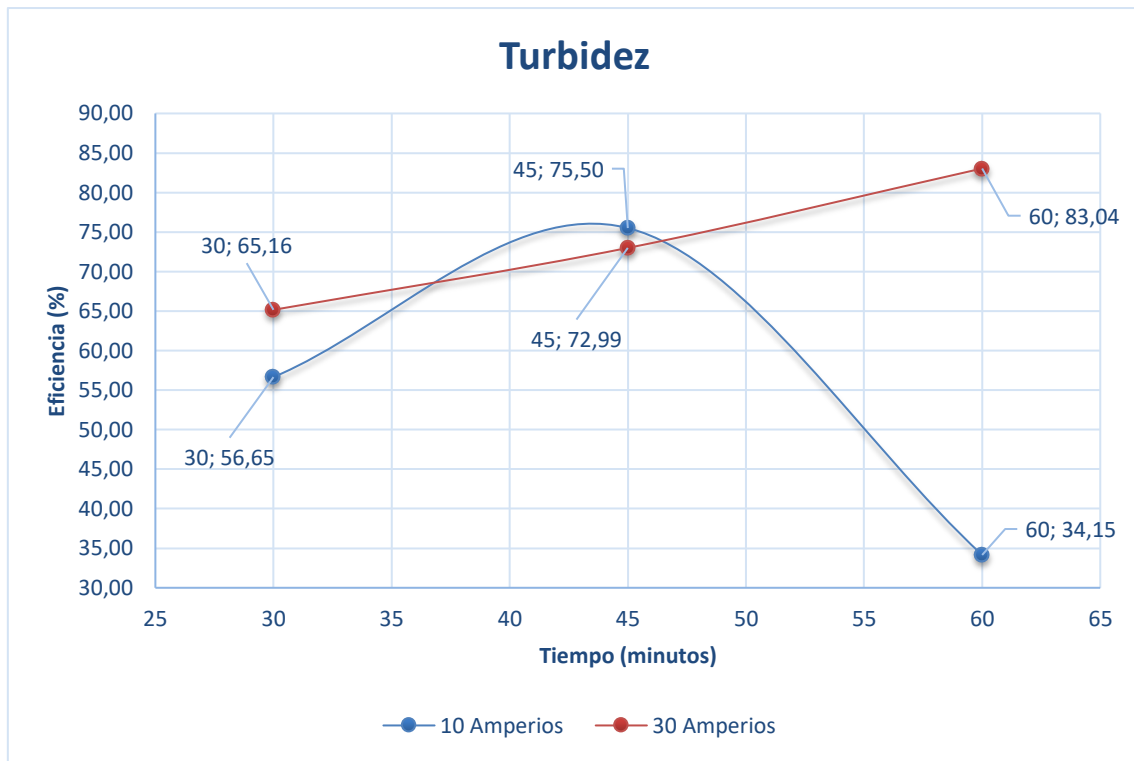


Figura 20. Turbidez.

En la *Figura 20* se puede observar que existe una progresión en cuanto al porcentaje de la eficiencia de reducción de turbidez de acuerdo con el tiempo a una intensidad de 30 amperios, dando como mejor resultado un 83,04 % de reducción; a diferencia de una intensidad de 10 amperios se puede observar un pico a los 45 minutos el que corresponde a una reducción del 75,50 %.

## Conductividad

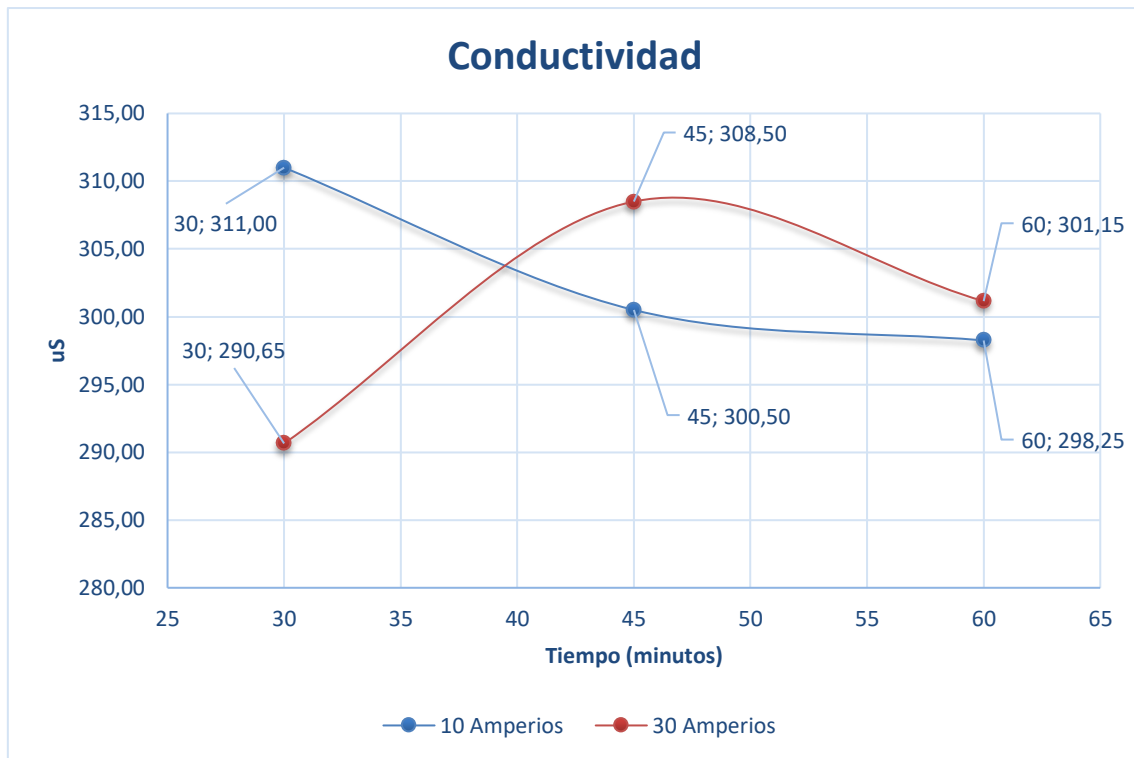


Figura 21. Conductividad.

Para la conductividad no se calculó eficiencias, lo que se efectuó es un promedio del resultado de las repeticiones, donde se observó que la mayor conductividad es de 311,00 uS, la que corresponde al tratamiento ejecutado con una intensidad de 10 amperios y un tiempo de 30 minutos. La menor conductividad fue de 290,65 uS del tratamiento realizado con 30 amperios y con un tiempo de 30 minutos.

## Color

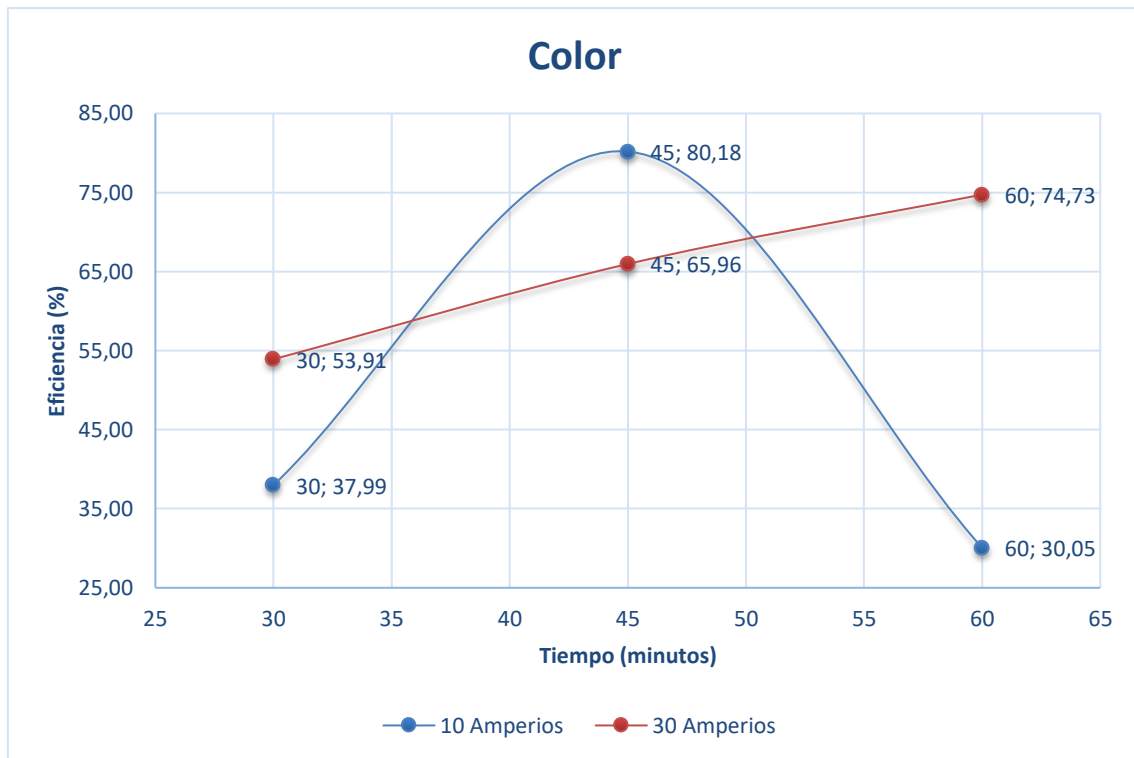


Figura 22. Color.

En la *Figura 22* se puede ver una relación en cuanto a la turbidez ya que se nota una progresión en cuanto a la eficiencia de reducción del color del agua de un 74,73 % a 30 amperios y al tiempo, mientras que, a una intensidad de 10 amperios y 45 minutos, se observa un pico en el que la eficiencia de reducción es de 80,18 %.



## Potencial de Hidrógeno

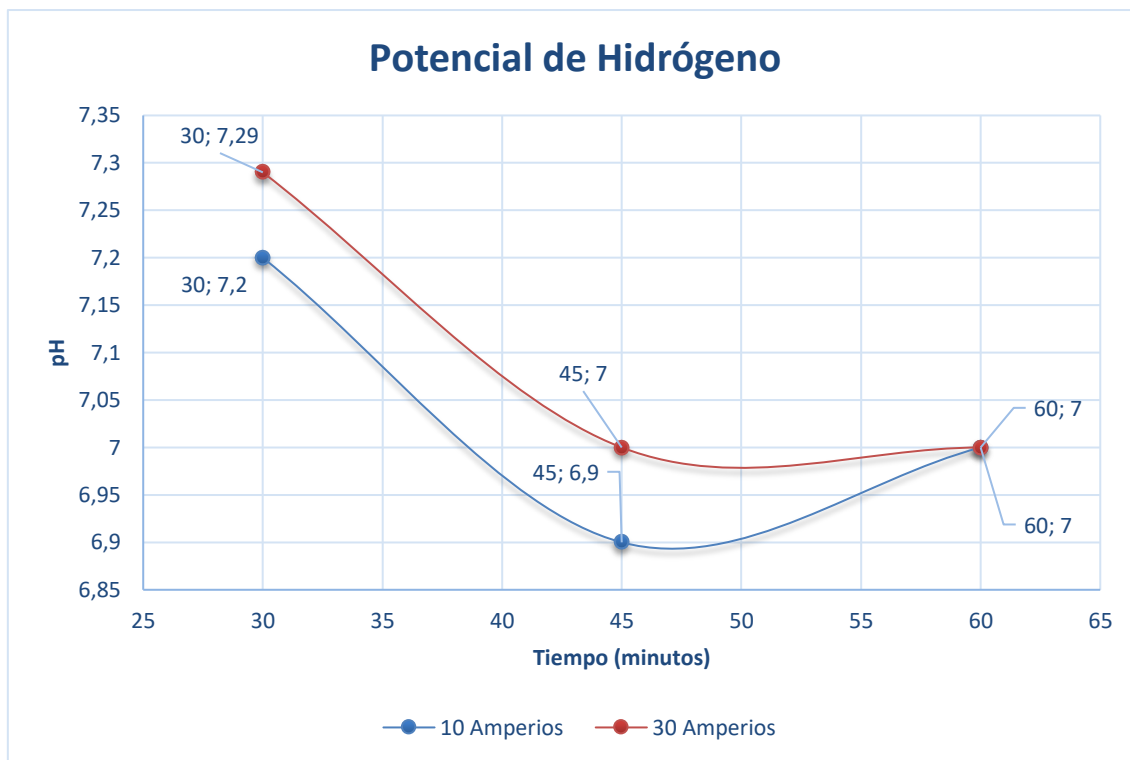


Figura 23. Potencial de Hidrógeno.

Para pH no se hace análisis ya que este dato no busca establecer un pH óptimo, sino el pH final luego del tratamiento

### 4.3.2. Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico se usó el programa Minitab 18, con el cual se realizó un análisis individual por diseño experimental y un análisis comparativo.

Para el tratamiento de coagulación–floculación y electrocoagulación se usó un modelo lineal general que es un procedimiento ANOVA, el mismo que relaciona la distribución aleatoria de la variable dependiente. El método que se usó en el modelo lineal general fue (-1, 0, +1), el cual determina que cada coeficiente

representa la diferencia entre cada media de nivel y la media general (Minitab Inc., 2017).

#### 4.3.2.1. Coagulación-Floculación

Para el tratamiento de coagulación–floculación, como variables independientes se tiene la dosis y tipo de coagulante y como variable dependiente el % de remoción de DQO. A continuación, se presenta el análisis realizado para este tratamiento:

Tabla 30.

*Información del factor (variables independientes)*

<b>Factor</b>	<b>Tipo</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>
Dosis	Fijo	6	30; 35; 40; 45; 50; 55
Tipo de Coagulante	Fijo	2	PCA; SF

Tomada de (Minitab Inc., 2017)

Para determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa se compara el valor de p con alfa que es 0.05. Si el valor de p es menor o igual se determina que es estadísticamente significativa y si el vapor de p es mayor se determina que no existe una diferencia significativa.

Tabla 31.  
*Análisis de Varianza*

<b>Fuente</b>	<b>GL*</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	3117,92	623,584	175,01	0,000
Tipo de Coagulante	1	132,29	132,285	37,13	0,000
Dosis (ul)*Tipo de Coagulante	5	2459,24	491,849	138,04	0,000
Error	12	42,76	3,563		
<b>Total</b>	<b>23</b>	<b>5752,20</b>			

Tomada de (Minitab Inc., 2017).

Nota: GL (grados de libertad), SC Ajust. (Suma ajustada de los cuadrados), MC Ajust. (cuadrados medios ajustados).

En la Tabla 31 se observa los valores de p y se determina que es estadísticamente significativa, tanto en dosificación, tipo de coagulante como en la interrelación de ambos, por lo que se procede realizar una comparación Tukey el mismo que sirve para comparar pares de medias.

Tabla 32.  
*Resumen del modelo*

<b>Desviación Estándar</b>	<b>R-cuad.</b>	<b>R-cuad.(ajustado)</b>	<b>R-cuad.(pred)</b>
1,88762	99,26%	98,58%	97,03%

Adaptada de (Minitab Inc., 2017).

Tabla 33.  
Coeficientes

<b>Término</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Error Estándar del Coeficiente</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
Constante	49,247	0,385	127,81	0,000	
Dosis (ul)					
30	-20,413	0,862	-23,69	0,000	1,67
35	12,294	0,862	14,27	0,000	1,67
40	5,583	0,862	6,48	0,000	1,67
45	6,216	0,862	7,21	0,000	1,67
50	6,379	0,862	7,40	0,000	1,67
Tipo de Coagulante					
PCA	2,348	0,385	6,09	0,000	1,00
Dosis *Tipo de Coagulante					
30 PCA	12,298	0,862	14,27	0,000	1,67
35 PCA	-14,215	0,862	-16,50	0,000	1,67
40 PCA	-5,731	0,862	-6,65	0,000	1,67
45 PCA	-4,916	0,862	-5,71	0,000	1,67
50 PCA	-1,642	0,862	-1,91	0,081	1,67

Tomada de (Minitab Inc., 2017).

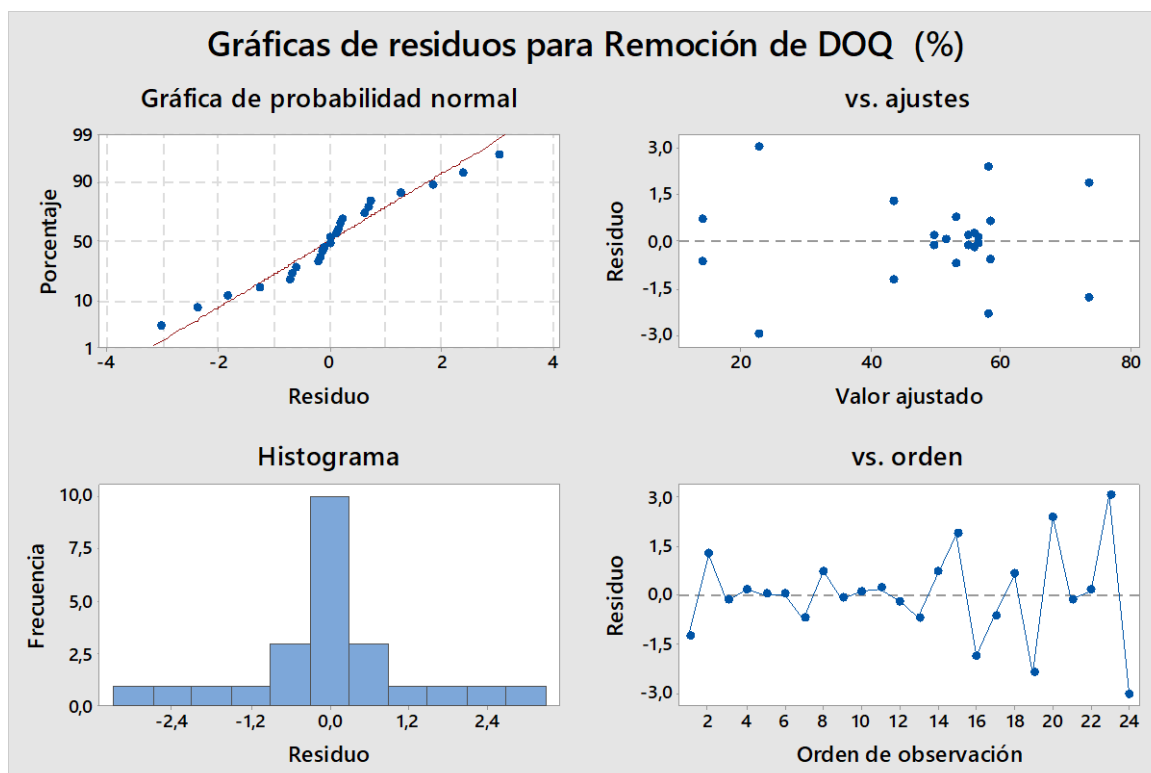


Figura 24. Residuos para Remoción de DQO.

### Comparaciones por parejas de Tukey

La comparación se realiza para todas aquellas que tienen un grado estadístico significativo. El método de Tukey tendrá una confianza de 95%.

### Comparaciones para Coagulación-Floculación

Tabla 34.

Comparaciones por parejas de Tukey: Dosis (ul)

Dosis (ul)	N	Media	Agrupación
35	4	61,5412	A
50	4	55,6259	B
45	4	55,4631	B

<b>Dosis (ul)</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
40	4	54,8300	B
55	4	39,1892	C
30	4	28,8345	D

Tomada de (Minitab Inc., 2017).

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Las medias no comparten una letra por lo que son significativamente diferentes, por lo que se puede afirmar que la mejor dosis fue de 35 ul ya que su media es de 61,5412 siendo la mejor.

Tabla 35.

Comparaciones por parejas de Tukey: Tipo de Coagulante

<b>Tipo de Coagulante</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
PCA	12	51,5950	A
SF	12	46,8996	B

Tomada de (Minitab Inc., 2017).

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

En esta comparación se determina que la media más alta es para policloruro de aluminio, esto se da ya que los valores son similares en todos los datos, mientras que con sulfato férrico existe una mayor dispersión de los datos.

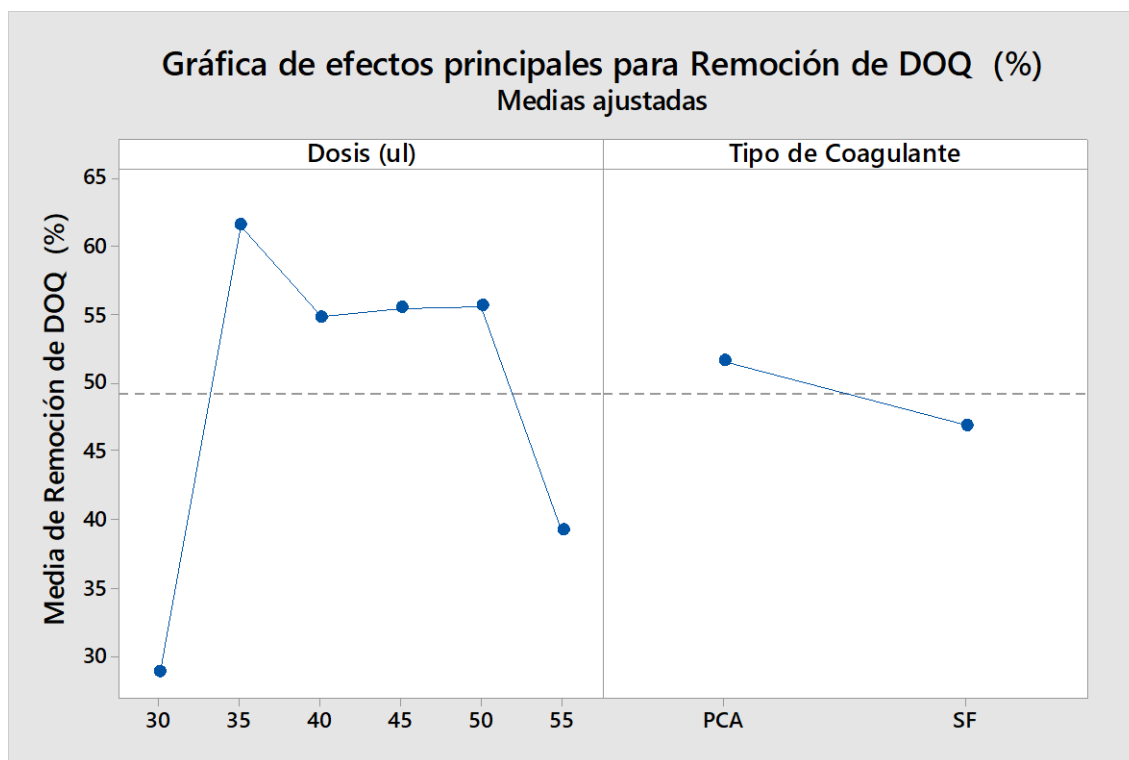


Figura 25. Medias de Dosificación y Tipo de Coagulante.

Tabla 36.

Comparaciones por parejas de Tukey: Dosis\*Tipo de Coagulante

Dosis*Tipo de Coagulante	N	Media	Agrupación
35 SF	2	73,4081	A
40 SF	2	58,2127	B
45 SF	2	58,0318	B
50 PCA	2	56,3314	B C
55 PCA	2	55,7432	B C
50 SF	2	54,9204	B C
45 PCA	2	52,8944	B C
40 PCA	2	51,4472	B C

Dosis*Tipo de Coagulante	N	Media	Agrupación
35 PCA	2	49,6744	C D
30 PCA	2	43,4797	D
55 SF	2	22,6351	E
30 SF	2	14,1892	F

Tomada de (Minitab Inc., 2017).

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

La comparación con la interacción entre dosis y tipo de coagulante se evidencia que la media más alta es de 73,4081 la misma que corresponde al tratamiento de 35 ul y con sulfato férrico.

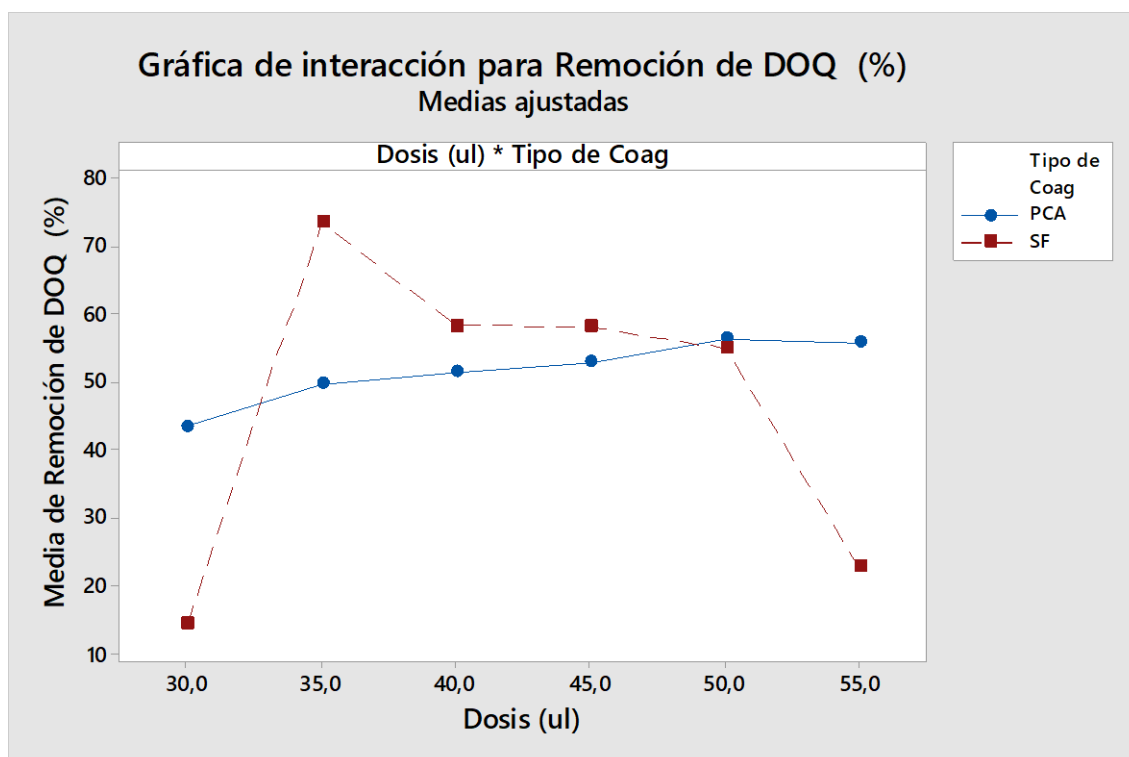
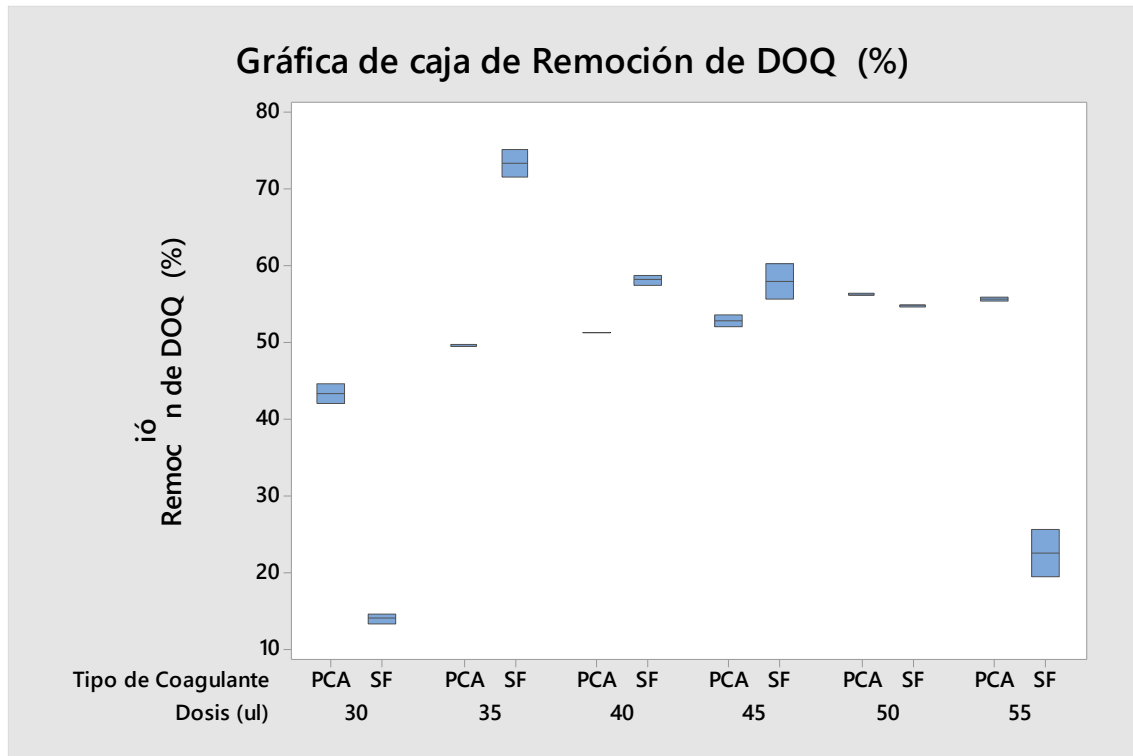


Figura 26. Interacciones de medias ajustadas de Dosis \* Tipo de coagulante.





*Figura 27.* Diagrama de cajas de coagulación–floculación.

En la *Figura 27* se puede observar la mediana la cual es la línea que atraviesa los cuadrados, además la distancia entre los cuadrados señala la distancia entre el primer y tercer intercuartil. Además, se observa valores que se superponen en los diferentes tratamientos, lo que significa que existe una similitud en los resultados.

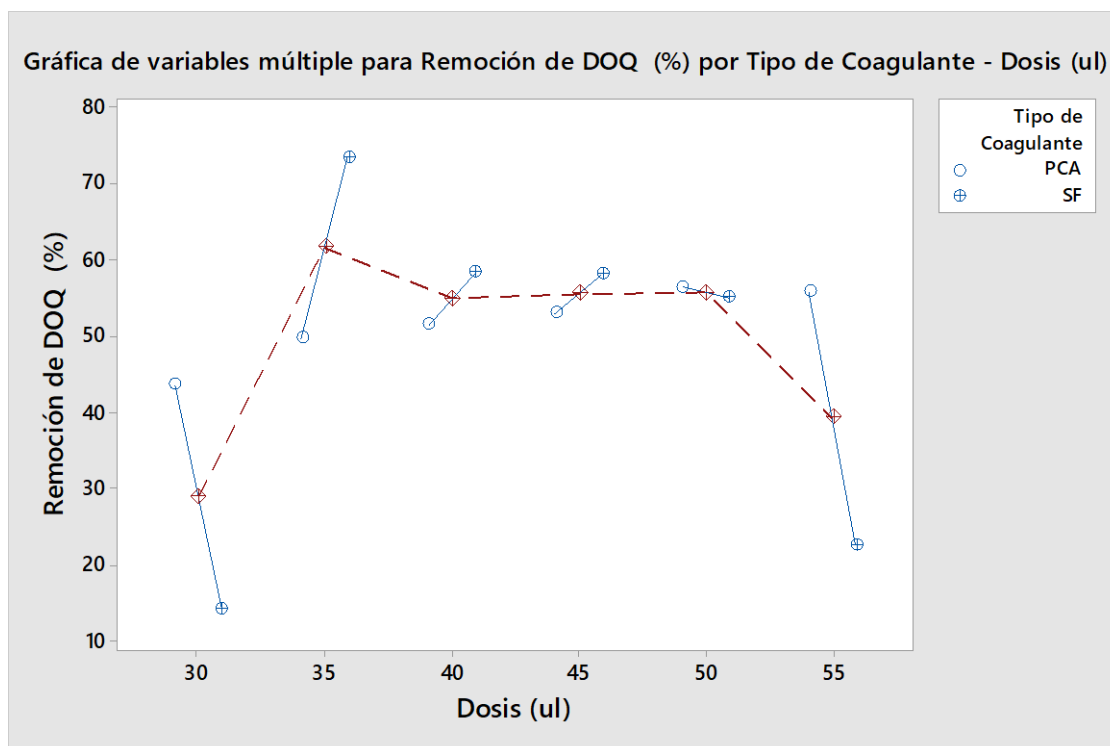


Figura 28. Diagrama de variables y media de remoción de DQO para Coagulación–Floculación.

En la *Figura 28* se puede evidenciar las repeticiones y la media de cada uno de los tratamientos realizados, evidenciando que el de mejor resultado.

#### 4.3.2.2. Electrocoagulación

Para el tratamiento de electrocoagulación, como variables independientes se tiene la intensidad y tiempo y como variable dependiente el % de remoción de DQO. A continuación, se presenta el análisis realizado para este tratamiento.

Tabla 37.

*Información del factor (variables independientes)*

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Intensidad (amperios)	Fijo	2	10; 30

<b>Factor</b>	<b>Tipo</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>
Tiempo (minutos)	Fijo	3	30; 45; 60

Para establecer si existe una diferencia estadísticamente significativa se compara el valor de p con alfa que es 0.05. Si el valor de p es menor o igual se determina que es estadísticamente significativa y si el vapor de p es mayor se determina que no existe una diferencia significativa.

Tabla 38.

*Análisis de Varianza*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Intensidad (amperios)	1	140,753	140,753	285,54	0,000
Tiempo (minutos)	2	139,548	69,774	141,55	0,000
Intensidad * Tiempo	2	114,900	57,450	116,55	0,000
Error	6	2,958	0,493		
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>398,158</b>			

Tomada de (Minitab Inc., 2017).

Nota: GL (grados de libertad), SC Ajust. (Suma ajustada de los cuadrados), MC Ajust. (cuadrados medios ajustados).

En el análisis de varianza se puede identificar que variables son estadísticamente significativas con los valores de p, y se puede observar que

tanto la intensidad, el tiempo y la interrelación de ambos es estadísticamente significativo, por lo que se realiza una comparación Tukey.

Tabla 39.

*Resumen del modelo*

<b>Desviación Estándar</b>	<b>R-cuad.</b>	<b>R-cuad.(ajustado)</b>	<b>R-cuad. (pred)</b>
0,702094	99,26%	98,64%	97,03%

Tabla 40.

*Coefficientes*

<b>Término</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Error Estándar del Coeficiente</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
Constante	82,064	0,203	404,90	0,000	
Intensidad (amperios)					
10	-3,425	0,203	-16,90	0,000	1,00
Tiempo (minutos)					
30	-3,331	0,287	-11,62	0,000	1,33
45	-1,354	0,287	-4,72	0,003	1,33
Intensidad * Tiempo					
10 30	1,690	0,287	5,90	0,001	1,33
10 45	2,651	0,287	9,25	0,000	1,33

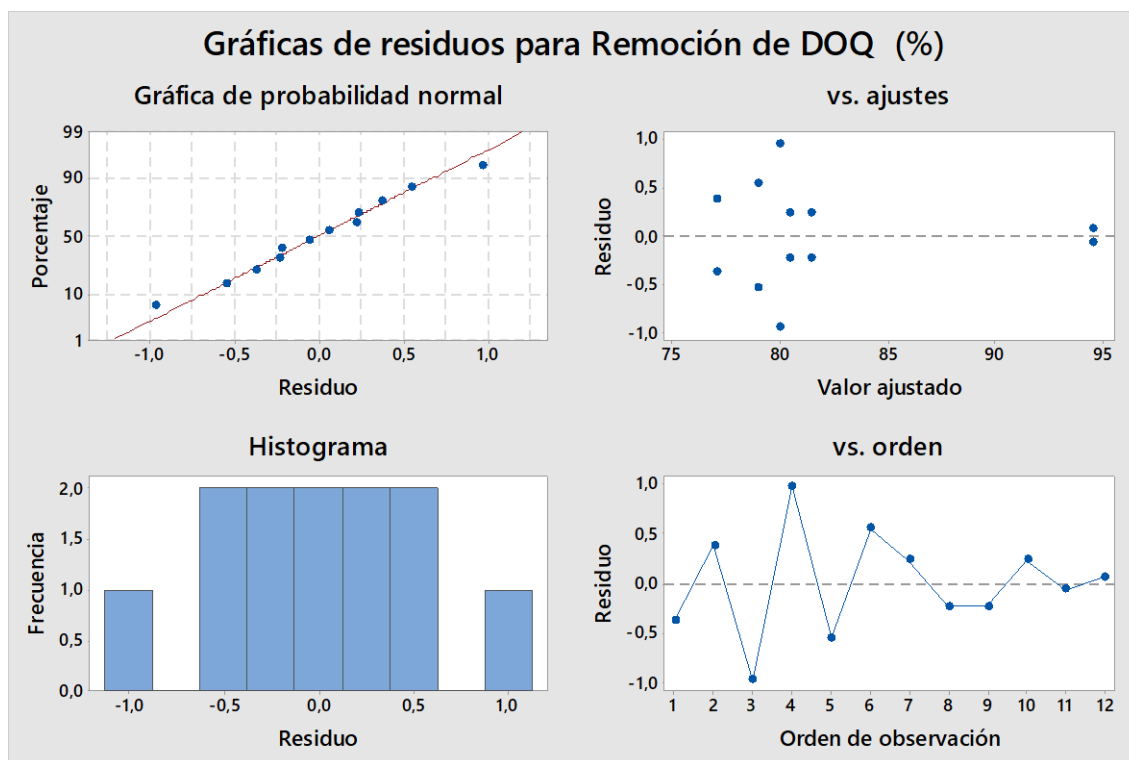


Figura 29. Diagrama de Residuos para Remoción de DQO.

### Comparaciones por parejas de Tukey

La comparación se efectúa para todas aquellas que tienen un grado estadístico significativo. El método de Tukey tendrá una confianza de 95%.

### Comparaciones para Electrocoagulación

Tabla 41.

*Comparaciones por parejas de Tukey: Intensidad (amperios)*

<b>Intensidad (amperios)</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
30	6	85,4892	A
10	6	78,6396	B

Tomada de (Minitab Inc., 2017).

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

La mayor media es de 85,4892 la que corresponde a 30 amperios de intensidad por lo que se puede afirmar que existe una diferencia estadística significativa.

Tabla 42.

*Comparaciones por parejas de Tukey: Tiempo (minutos)*

Tiempo (minutos)	N	Media	Agrupación
60	4	86,7500	A
45	4	80,7101	A B
30	4	78,7330	B

Tomada de (Minitab Inc., 2017):

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

En esta comparación se aprecia que existen dos variables significativamente diferentes a 60 y 30 minutos; sin embargo, la media alta es de 86,750 que corresponde a 60 minutos.

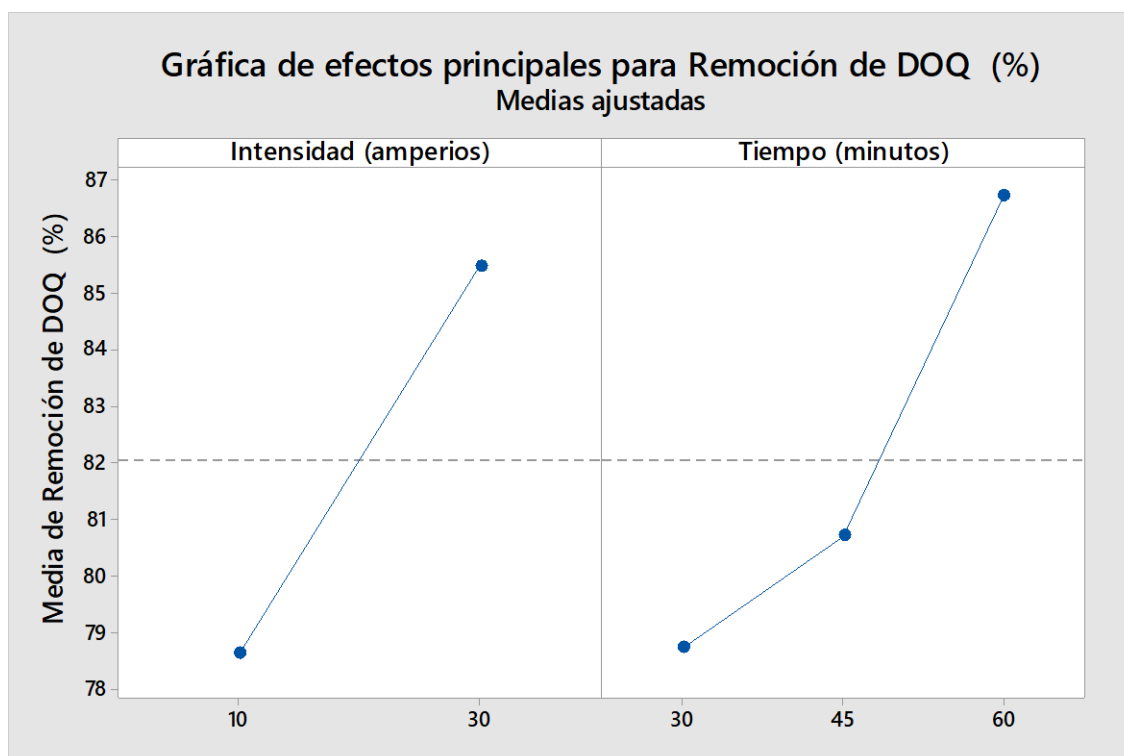


Figura 30. Medias de Intensidad y Tiempo.

Tabla 43.

*Comparaciones por parejas de Tukey: Intensidad (amperios) \* Tiempo (minutos)*

<b>Intensidad * Tiempo</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
30 60	2	94,5156	A
30 45	2	81,4844	B
30 30	2	80,4676	B
10 45	2	79,9358	B
10 60	2	78,9844	B C
10 30	2	76,9985	C

Tomada de (Minitab Inc., 2017):

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

La comparación con la interacción entre intensidad y tiempo se evidencia que la media más alta es de 94,5156 la misma que corresponde al tratamiento de 30 amperios y 60 minutos.

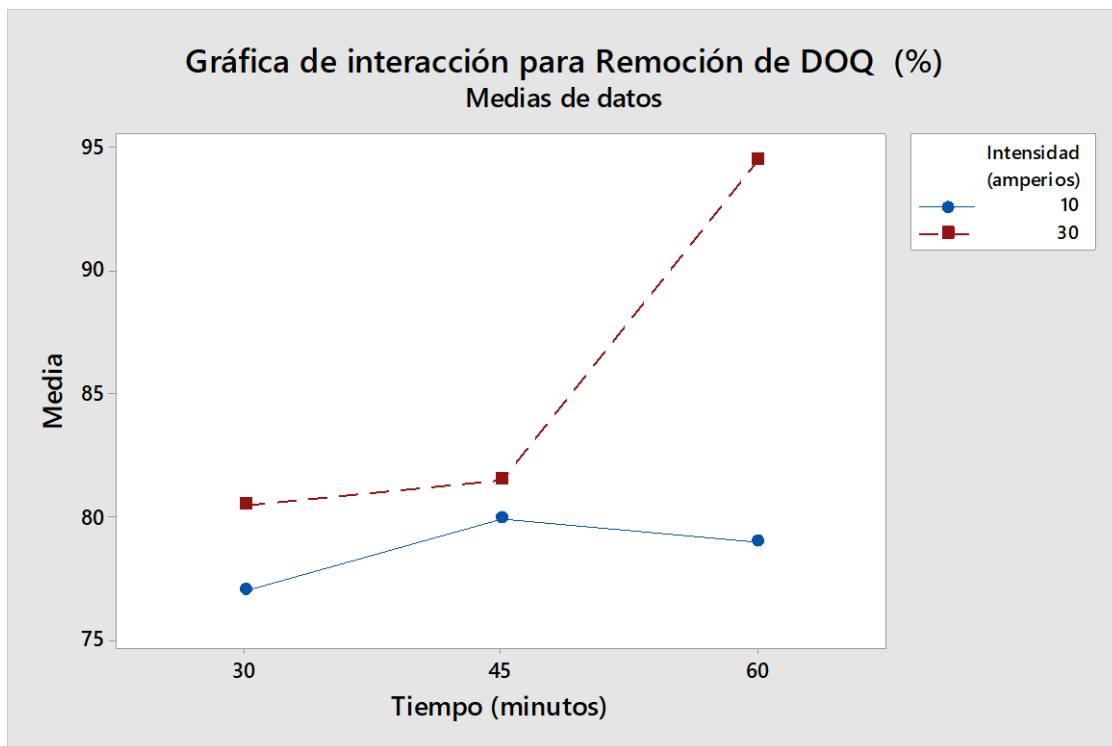


Figura 31. Interacciones de medias de datos de Intensidad \* Tiempo.

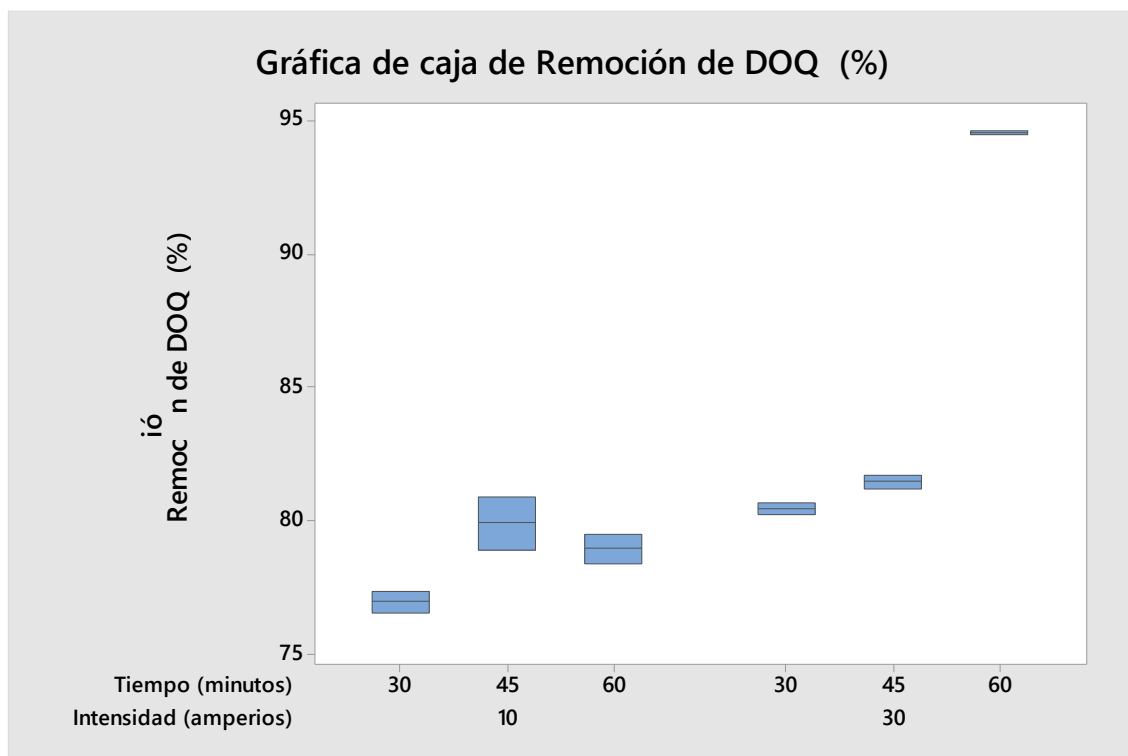
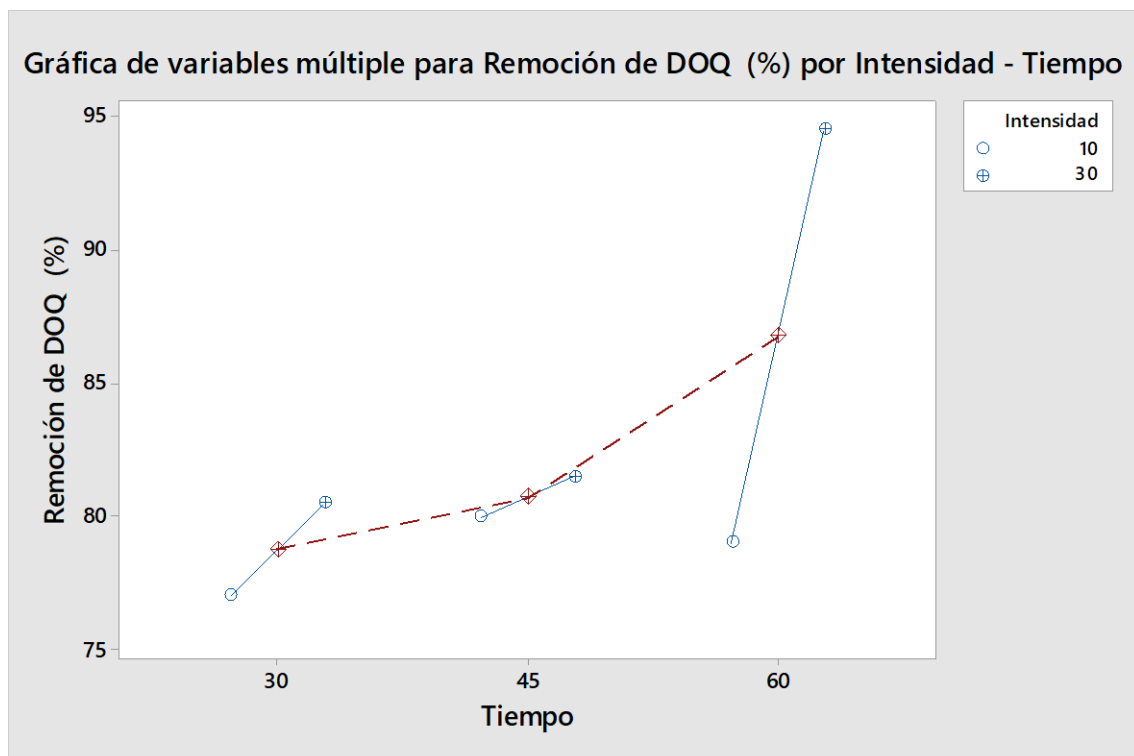


Figura 32. Diagrama de cajas de electrocoagulación.



En la *Figura 32* se puede observar la mediana la cual es la línea que atraviesa los cuadrados, además la distancia entre los cuadrados señala la distancia entre el primer y tercer intercuartil. Además, se observa valores que se superponen en los diferentes tratamientos, lo que significa que existe una similitud en los resultados.



*Figura 33.* Diagrama de variables y media de remoción de DQO para Electrocoagulación.

En la *Figura 33* se puede observar las repeticiones de cada tratamiento y también las medias, además se evidencia el mejor tratamiento.

### 4.3.3. Análisis Comparativo entre Coagulación–Floculación y Electrocoagulación

Una vez realizado un análisis individual de los tratamientos se comparó el mejor tratamiento de ambos diseños experimentales para establecer el más eficiente. Teniendo como resultado que el tratamiento de electrocoagulación con un tiempo de 60 minutos a una intensidad de 30 amperios tuvo un porcentaje de remoción de DQO del 94,52% siendo así el más eficiente.

Mientras para el análisis estadístico comparativo se usó ANOVA de un solo factor, teniendo como variable independiente cada uno de los tratamientos realizados tanto en coagulación–floculación como en electrocoagulación; y, como variable dependiente el % de Remoción de DQO.

Tabla 44.

*Comparación de la eficiencia de DQO entre coagulación-floculación y electrocoagulación.*

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>Eficiencia de DQO (%)</b>	<b>Eficiencia de Turbidez (%)</b>
Coagulación-Floculación	73,41	97,90
Electrocoagulación	94,52	83,04

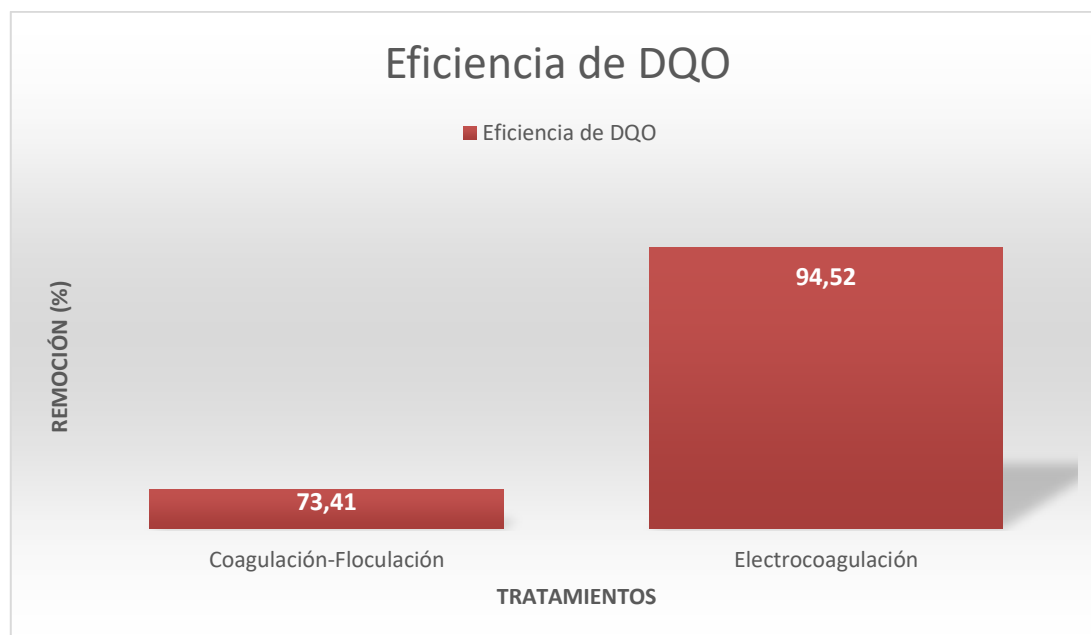


Figura 34. Comparación de Eficiencia de DQO en los tratamientos.

Tabla 45.

*Método del análisis estadístico comparativo*

<b>Hipótesis nula</b>	Todas las medias son iguales
<b>Hipótesis alterna</b>	No todas las medias son iguales
<b>Nivel de significancia</b>	$\alpha = 0,05$

Tomada de (Minitab Inc., 2017):

Nota: Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Tabla 46.

*Información del factor*

Factor	Niveles	Valores
Tratamientos	18	C1; C10; C11; C12; C2; C3; C4; C5; C6; C7; C8; C9 E1; E2; E3; E4; E5; E6

Tomada de (Minitab Inc., 2017)

Tabla 47.

*Análisis de Varianza*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Tratamientos	17	14720,3	865,901	340,94	0,000
Error	18	45,7	2,540		
<b>Total</b>	<b>35</b>	<b>14766,0</b>			

Tomada de (Minitab Inc., 2017):

Nota: GL (grados de libertad), SC Ajust. (Suma ajustada de los cuadrados), MC Ajust. (cuadrados medios ajustados)

Tabla 48.

*Resumen del modelo*

<b>S</b>	<b>R-cuad.</b>	<b>R-cuad.(ajustado)</b>	<b>R-cuad.(pred)</b>
1,59365	99,69%	99,40%	98,76%

Tabla 49.

*Medias y Desviación Estándar del análisis comparativo*

<b>Tratamientos</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>IC de 95%</b>
C1	2	43,48	1,77	(41,11; 45,85)
C10	2	58,03	3,38	(55,66; 60,40)
C11	2	54,920	0,205	(52,553; 57,288)
C12	2	22,64	4,30	(20,27; 25,00)
C2	2	49,674	0,256	(47,307; 52,042)
C3	2	51,45	0,00	(49,08; 53,81)
C4	2	52,894	1,023	(50,527; 55,262)
C5	2	56,331	0,153	(53,964; 58,699)

Tratamientos	N	Media	Desviación Estándar	IC de 95%
C6	2	55,743	0,287	(53,376; 58,111)
C7	2	14,189	0,956	(11,822; 16,557)
C8	2	73,41	2,61	(71,04; 75,78)
C9	2	58,213	0,870	(55,845; 60,580)
E1	2	76,998	0,533	(74,631; 79,366)
E2	2	79,936	1,362	(77,568; 82,303)
E3	2	78,984	0,773	(76,617; 81,352)
E4	2	80,468	0,320	(78,100; 82,835)
E5	2	81,484	0,331	(79,117; 83,852)
E6	2	94,5156	0,0884	(92,1481; 96,8831)

*Desviación Estándar agrupada = 1,59365*

Tomada de (Minitab Inc., 2017)

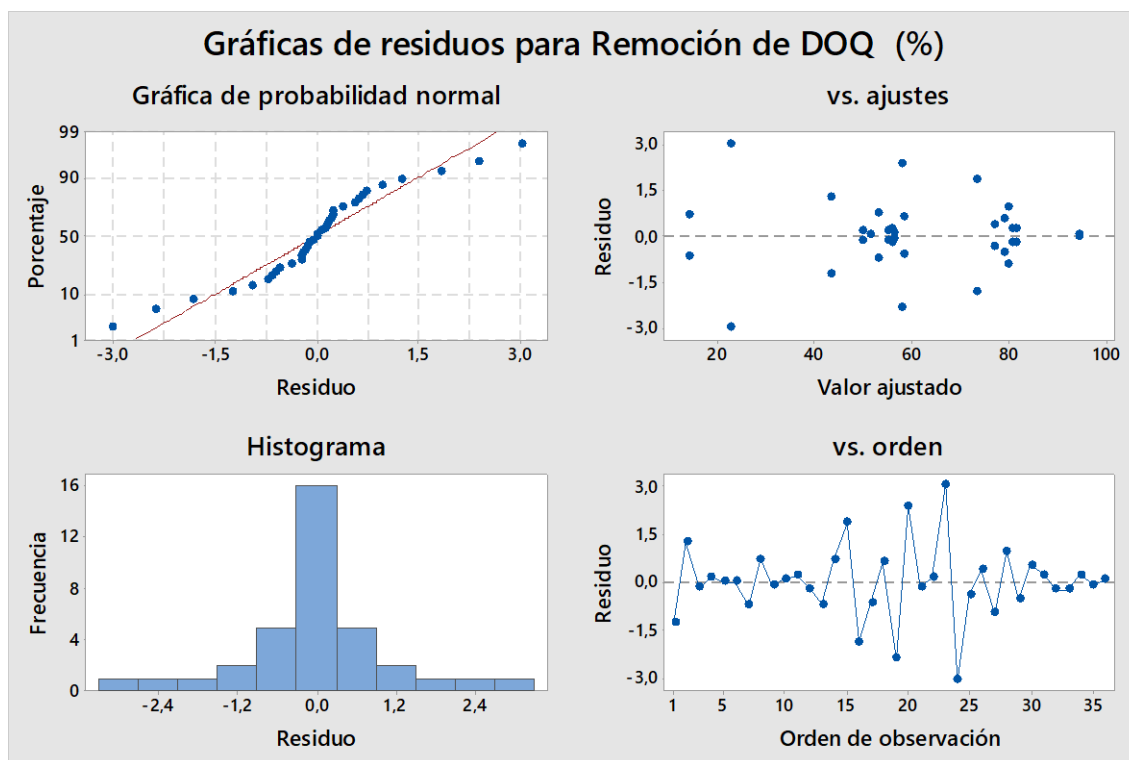


Figura 35. Diagrama de Residuos para Remoción de DQO.

### Comparaciones por parejas de Tukey

Tabla 50.

*Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%*

Tratamientos	N	Media	Agrupación			
E6	2	94,5156	A			
E5	2	81,484	B			
E4	2	80,468	B			
E2	2	79,936	B			
E3	2	78,984	B	C		
E1	2	76,998	B	C		
C8	2	73,41	C			
C9	2	58,213	D			
C10	2	58,03	D			
C5	2	56,331	D	E		
C6	2	55,743	D	E	F	
C11	2	54,920	D	E	F	
C4	2	52,894	D	E	F	
C3	2	51,45	E F			
C2	2	49,674	F G			
C1	2	43,48	G			
C12	2	22,64	H			
C7	2	14,189	I			

Tomada de (Minitab Inc., 2017):

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

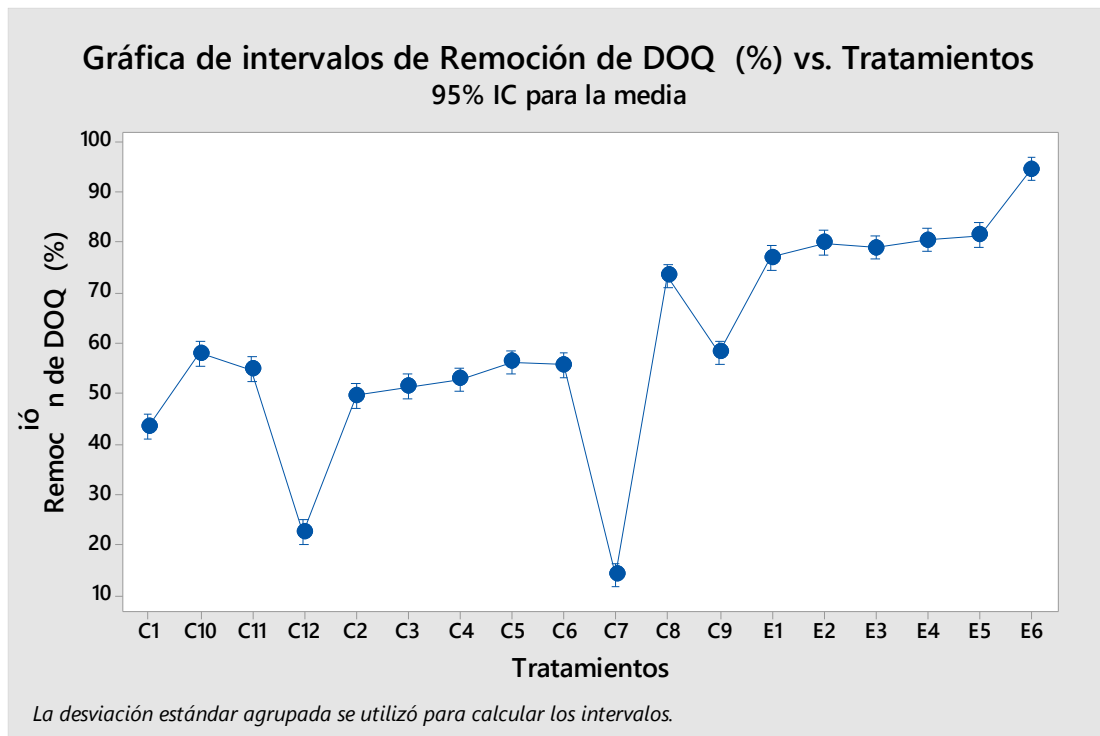


Figura 36. Diagrama de intervalos de remoción de DQO vs Tratamientos.

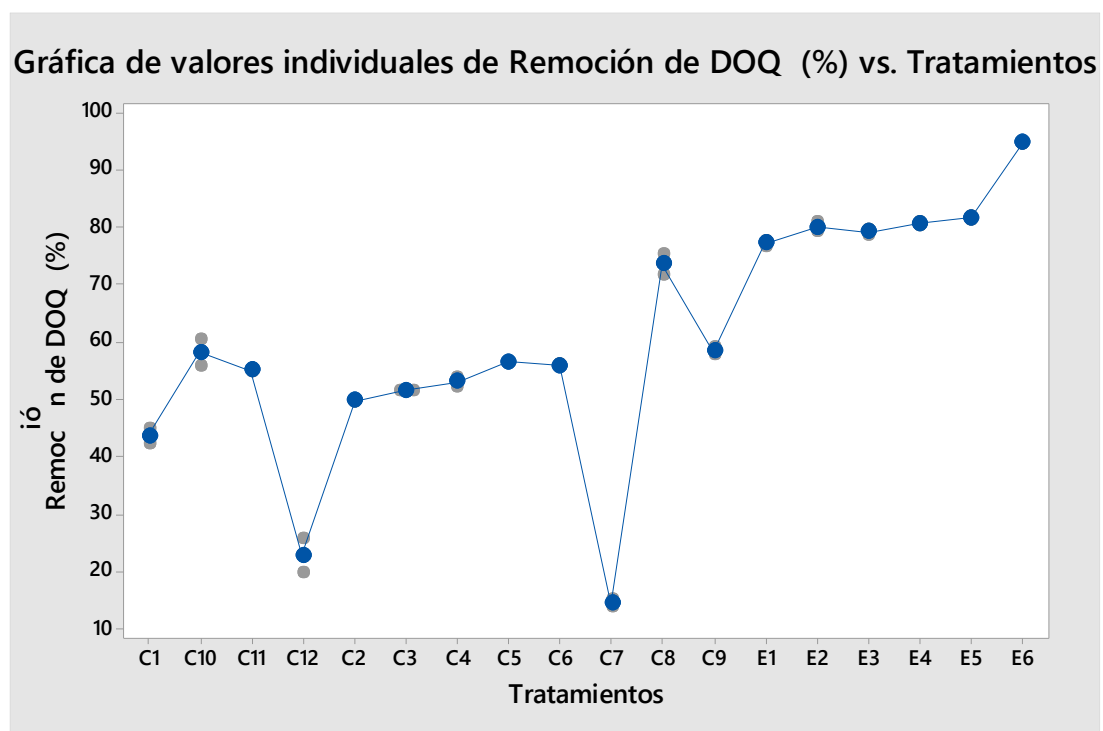
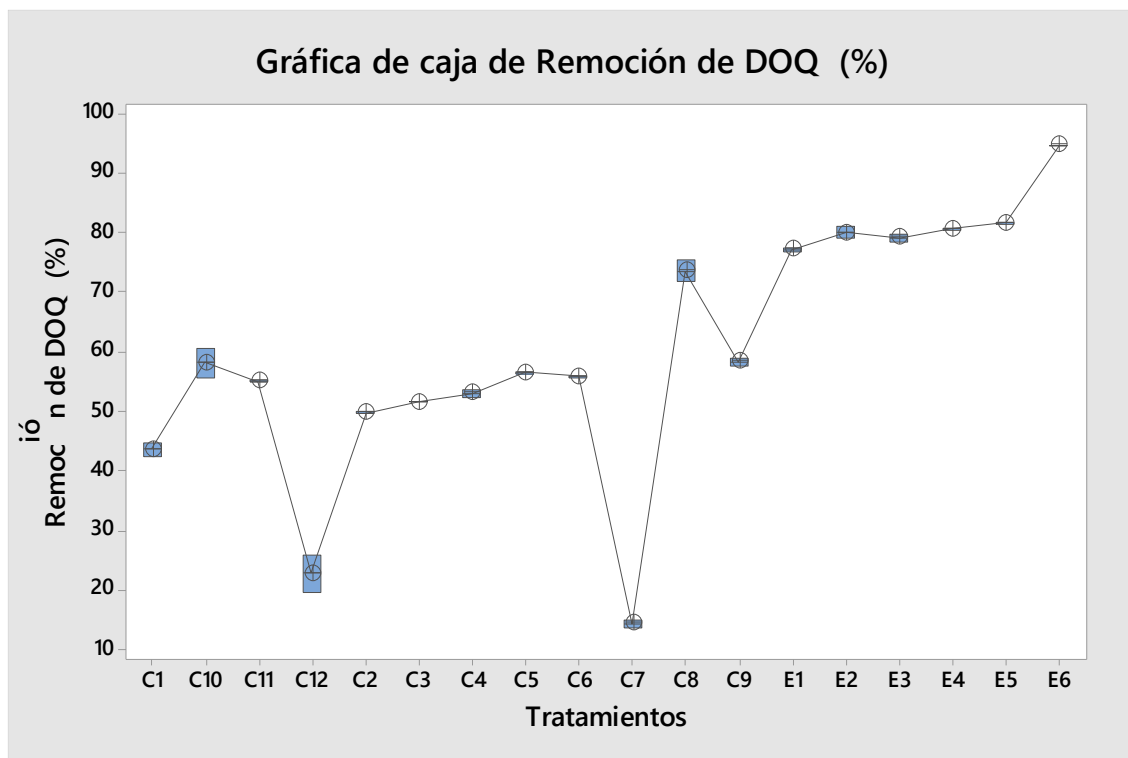


Figura 37. Diagrama de valores individuales.



*Figura 38.* Diagrama de caja de Remoción de DQO.

En la *Figura 38* se puede observar la mediana la cual es la línea que atraviesa los cuadrados, además la distancia entre los cuadrados señala la distancia entre el primer y tercer intercuartil.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

Al realizar la caracterización del agua residual antes y después de la trampa de grasa mediante análisis físico-químico se pudo observar el porcentaje de remoción de la DQO, misma fue de 29,8 %, lo cual no es suficiente para estar dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la tabla 4a del RAHOE 1215, dado que el agua tiene una gran cantidad de sólidos suspendidos lo que hace que se eleve la DQO dando como resultado 481 mg/LO<sub>2</sub> en la cámara



inicial, mientras en la tercera cámara es de 337,5 mg/LO<sub>2</sub>, por lo que se requiere un tratamiento adicional.

Al efectuar las pruebas de coagulación con el test de jarras se pudo determinar que el mejor coagulante fue el sulfato férrico con una dosificación de 35 microlitros (ul); mientras que, con el reactor de electrocoagulación se estableció que el mejor tratamiento fue a una intensidad de 30 amperios durante 60 minutos.

Una vez realizados los tratamientos físicos-químicos de coagulación-floculación y electrocoagulación en el laboratorio, se analizó estadísticamente con un diseño factorial completamente aleatorio con el programa Minitab 18, se observó que existió una diferencia significativa tanto en el tratamiento de coagulación-floculación como en el tratamiento de electrocoagulación. En coagulación-floculación con una significancia del 5%, se concluye que, se produce un tratamiento significativo ya que remueve un 73,41%; mientras que, en electrocoagulación la eficiencia es de 94,52%. Por lo tanto, se concluye que el método de electrocoagulación es más eficiente para la matriz estudiada.

Además, se puede concluir que con ambos tratamientos se reduce y, los resultados se sitúan dentro de los criterios establecidos por la norma. La DQO del agua residual tratada, porque el límite máximo permisible es <120, ya que en coagulación-floculación se reduce de 337,5 mg/LO<sub>2</sub> a 89,7 mg/LO<sub>2</sub>, mientras que en electrocoagulación de disminuye de 337,5 mg/LO<sub>2</sub> a 18,48 mg/LO<sub>2</sub>.

## **5.2. Recomendaciones**

Se recomienda realizar pruebas preliminares, para encontrar tipos de coagulante y dosis adecuadas ya que esto varía según el tipo de agua residual, además de usar un ayudante de coagulante para que la sedimentación sea más eficiente. También se recomienda usar cantidades menores de coagulante ya que dan mejores resultados en el tratamiento de aguas residuales.

Además, se recomienda seguir experimentando con electrocoagulación ya que es una tecnología que falta desarrollar, y realizar un análisis de costos para la implementación a nivel de la estación de servicios, por el costo de la electricidad. En caso de implementarse el proceso de coagulación-floculación, se recomienda instalar un método de mezcla.

## REFERENCIAS

- Acosta, L. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XL(2), 10–17. Recuperado el 16 de diciembre de 2017, de <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>
- Amirtharajah, A., & O'Melia, C. R. (1990). *Coagulation processes: destabilization, mixing and flocculation* (4ta.). Estados Unidos. New York.: McGraw-Hill Inc.
- Andía Cárdenas, Y. (2000, Abril). Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico. Tratamiento de Agua: Coagulación Floculación. Recuperado el 04 de octubre de 2017, de [http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)
- Aznar, A., & Barba, A. (2000). Determinación de los Parámetros Físico-Químicos de Calidad de las Aguas. *Gestión Ambiental*, 2 (23), 12–19. Recuperado el 12 de septiembre de 2017, de <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/ingenieria-ambiental/otros-recursos-1/OR-F-001.pdf>
- Barwal, A., & Chaudhary, R. (2016). Performance of integrated bio-solar process for domestic wastewater treatment: A sustainable approach to scale-up wastewater management. *European Water Resources Association*, 83–90.
- Bratby, J. (1980). *COAGULATION and FLOCCULATION With an emphasis on water and wastewater treatment*. CROYDON, ENGLAND: UPLANDS PRESS LTD. Recuperado el 28 de octubre de 2017, de <https://www.ircwash.org/sites/default/files/253-80CO-1277.pdf>

- CEPAL. (2011). Diagnostico de las Estadísticas Del Agua En Ecuador. Recuperado el 22 de diciembre de 2017, de <http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/download/Diagnostico%20de%20las%20Estadisticas%20del%20Agua%20Producto%20Ilic%202012-2.pdf>
- Cornwell, D. A., & Mackenzie L., D. (2013). *Introduction to Environmental Engineering* (Fifth). Mc Graw Hill Education.
- Crespi, M., & Huertas, J. A. (1986). Determinación simplificada de la demanda química de oxígeno por el método del dicr~ma. *BOL. INTEXTAR*, 89, 89–97. Recuperado el 29 de septiembre de 2017, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/209/6243/Article07.pdf>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochaamba-Bolivia: Nelson Antequera Durán. Recuperado el 10 de octubre de 2017, de <https://books.google.es/books?id=1kO2J5aDljQC>
- Delphos, P. J., & Wesner, G. M. (2005). Mixing, Coagulation, And Flocculation. En Edward E. Baruth, Technical (Ed.), *Water Treatment Plan Design* (Fourth, p. 6.1, 6.2, 6.3). McGraw-Hill, Inc.
- EPA. (2000). [EPA, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos]. Recuperado el 17 de enero de 2017, de <https://espanol.epa.gov/espanol/implementacion-de-la-leyes-sobre-el-agua>
- Ferrera, R., Rojas, G., Poggi, H., Alarcón, A., & Cañizares, R. O. (2006). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 48(2), 179–187.

- Forero, J.-E., Ortiz, O.-P., & R., F. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3, 97–109.
- Harif, T., Khai, M., & Adin, A. (2012). Electrocoagulation versus chemical coagulation: Coagulation/flocculation mechanisms and resulting floc characteristics. *Water Research*, 46, 3177–3188.
- Hogg, R. (2000). Flocculation and dewatering. *International Journal of Mineral Processing*, 58, 223–236.
- Jairo Alberto Romero Rojas. (2005). *Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño* (Primera reimpresión). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Jarvis, P., Jefferson, B., Gregory, J., & Parsons, S. A. (2005). A review of floc strength and breakage. *Water Research*, 39, 3121–3137.
- Lai, C. L., & Lin, S. H. (2004). Treatment of chemical mechanical polishing wastewater by electrocoagulation: system performances and sludge settling characteristics. *Chemosphere*, 54, 235–242.
- Lapeña, M. R. (1989). *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. Marcombo. Recuperado el 18 de noviembre de 2017, de <https://books.google.es/books?id=fQcXUq9WFC8C>
- López, S., Nevels, D., & Kading, T. (2011). Análisis de calidad de agua en las micro-cuencas de los ríos Pacayacu y Sacha en la Amazonía Ecuatoriana. Recuperado 04 de diciembre de 2017, de [http://www.clinicambiental.org/docs/estudios\\_comunitarios/Informe\\_UW\\_ACCECOL\\_040412.pdf](http://www.clinicambiental.org/docs/estudios_comunitarios/Informe_UW_ACCECOL_040412.pdf)
- Macherey - Nagel. (2002). Recuperado el 18 de septiembre de 2017, de <http://www.mn-net.com/tabid/4755/default.aspx>

- Metcalf & Eddy, INC. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización*. (Antonio García Brage, Ed.) (Tercera, Vol. I y II). España: McGraw-Hill.
- Miller, G. T., Jr. (Ed.). (2007). Recursos Acuáticos y Contaminación Del Agua. En *Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, Un enfoque integral* (8th ed., pp. 171–200). Mexico City: Cengage Learning. Recuperado el 14 de octubre de 2017, de [http://go.galegroup.com/bibliotecavirtual.udla.edu.ec/ps/i.do?p=GVR L&sw=w&u=uame\\_cons&v=2.1&it=r&id=GALE%7CCX3003300021&asid=a696f00c163f188632464bfd0ec3a693](http://go.galegroup.com/bibliotecavirtual.udla.edu.ec/ps/i.do?p=GVR L&sw=w&u=uame_cons&v=2.1&it=r&id=GALE%7CCX3003300021&asid=a696f00c163f188632464bfd0ec3a693)
- Minitab Inc. (2017). Tabla Coeficientes para Ajustar modelo lineal general. Recuperado el 30 de octubre de 2017, de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/how-to/fit-general-linear-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/coefficients-table/>
- Montoya, S., & Páez, C. (2012). Documentación de la técnica de Cromatografía de Gases en el Análisis de Hidrocarburos en Aguas Residuales. Recuperado el 13 de diciembre de 2017, de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/2831/66028423M798.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Morales, N. B. P., & Acosta, G. E. N. (2010). Sistema De Electrocoagulación Como Tratamiento De Aguas Residuales Galvánicas., *20-1*, 34–44.
- Morante, G. (2002). Electrocoagulación de aguas residuales. *Revista colombiana de física*, *34*(2), 484–487. Recuperado el 11 de septiembre de 2017, de <https://blog.condorchem.com/pdf/electrocoagulacion-caso-practico.pdf>
- Oyegbile, B., Ay, P., & Narra, S. (2016). Optimization of physicochemical process for pre-treatment of fine suspension by flocculation prior to dewatering.

*Desalination and Water Treatment*, 57(6), 2726–2736.  
<https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1043591>

Peirce, J. J., Weiner, R. F., & Vesilind, P. A. (2003). *Environmental Pollution and Control* (Fourth).

Pérez Garrido, C., León Rodríguez, M., & Delgadillo García, G. R. (2013, mayo). Tratamiento de Aguas, Manual de Laboratorio. Recuperado el 02 de octubre de 2017, de [http://asesorias.cuautitlan2.unam.mx/fondo\\_editorial/comite\\_editorial/manuales/tratamientodeaguas\\_manualprac.pdf](http://asesorias.cuautitlan2.unam.mx/fondo_editorial/comite_editorial/manuales/tratamientodeaguas_manualprac.pdf)

Ramalho, R. S., Beltrán, D. J., & de Lora, F. (1990). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté. Recuperado el 18 de enero de 2017, de <https://books.google.es/books?id=30etGjzPXyWC>

Restrepo, A. P., Arango, Á., & Garcés, L. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + Limpia*, 1(No. 2), 59–75. Recuperado el 7 de septiembre de 2017, de [http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/514/1/pl\\_v1n2\\_58-77\\_electrocoagulacion.pdf](http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/514/1/pl_v1n2_58-77_electrocoagulacion.pdf)

Rodríguez, C. (2007, Diciembre). Demanda Química de Oxígeno por Reflujo Cerrado y Volumetría. Recuperado el 13 de noviembre de 2017, de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>

Salas, G. (2003). Tratamiento Físico-Químico de Aguas Residuales de la Industria Textil. *Peruana de Química e Ingeniería Química*, 5(2), 73–80. Recuperado el 02 de octubre de 2017, de <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/viewFile/5078/4163>

- SA. (2010). Reglamento Ambiental de Actividades Hidrocarburíferas (RAHOE). Recuperado el 20 de octubre de 2017 de <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/RAOHE-DECRETO-EJECUTIVO-1215.pdf>
- Tambo, N. (1991). Basic Concepts and Innovative Turn of Coagulation/Flocculation. *Water Supply* 9, 1–10. Recuperado el 30 de septiembre de 2017, de [https://www.researchgate.net/publication/282415792\\_Basic\\_Concepts\\_and\\_Innovative\\_Turn\\_of\\_CoagulationFlocculation](https://www.researchgate.net/publication/282415792_Basic_Concepts_and_Innovative_Turn_of_CoagulationFlocculation)
- Vargas, M. V., & Romero, L. G. (2006). Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 19(4), 37–41. Recuperado el 18 de enero de 2017, de [http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/37](http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/37)
- Vik, E. A., Carlson, D. A., Eikum, A. S., & Gjessing, E. T. (1984). Electrocoagulation of potable water. *Water Research*, 18, 1355–1360. Recuperado el 29 de octubre de 2017, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043135484900034>



## **ANEXOS**

## Anexo 1

- Fórmula

$$ST = 10^6 * \frac{(A - B)}{C} \left[ \frac{mg}{L} \right]$$

*A = Peso del recipiente con sólido seco [g]*

*B = Peso del recipiente vacío [g]*

*C = Volumen de la muestra [ml]*

- Cálculo

$$ST = 10^6 * \frac{(39,1264 - 39,1182)}{25} \left[ \frac{mg}{L} \right]$$

$$ST = 10^6 \frac{(0,0082)}{25} \left[ \frac{mg}{L} \right]$$

$$ST = 328 \left[ \frac{mg}{L} \right]$$

## Anexo 2

### - Construcción del reactor de electrocoagulación

Para la construcción del reactor se usaron placas de aluminio y hierro, también se usaron tornillos hexagonales, tuercas, terminales eléctricos, cable No. 8, pinzas tipo lagarto, tapones de PVC, arandelas de presión, tubo PVC y cargador de batería de marca Schumacher con el cual se controla la intensidad definida en el diseño experimental, una vez que se contó con los materiales se procedió a soldar con cautín y estaño cada terminal a un extremo del cable, también se soldó las pinzas tipo lagarto con el otro extremo de cable este proceso se lo hizo para cada placa.



*Figura 39.* Soldadura de un extremo del cable con pinza tipo lagarto.



Figura 40. Materiales para electrocoagulación; 1) Tornillos Hexagonales, 2) Tuercas, 3) Terminales eléctricos, 4) Arandelas de presión, 5) Placas de hierro y aluminio, 6) Cable No. 8, 7) Pinzas Tipo Lagartos, 8) Tubo PVC, 9) Tapones de PVC 10) Recipiente de plástico, 11) Cargador de Batería.

