



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación para la remoción de contaminantes en el tratamiento de aguas grises.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

P R E S E N T A N:

HERNÁNDEZ BOISO LILIANA

ROSALES CHAMÚ REBECA MASSIEL

DIRECTOR: M. EN C. ANA LILIA MALDONADO
ARELLANO

ASESOR: M. EN C. JOSE FERNANDO LÓPEZ
SÁNCHEZ

ASESOR: M. EN I. MARÍA ESTELA DE LA
TORRE GÓMEZ TAGLE



CIUDAD DE MÉXICO, AGOSTO 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Contenido

AGRADECIMIENTOS	4
INTRODUCCIÓN	5
RESUMEN	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
OBJETIVOS	9
CAPÍTULO I. AGUAS GRISES	10
1.1. Definición y clasificación	10
1.2. Estadística de la abundancia de lavanderías en México.	15
1.3. Tratamientos de aguas grises	15
1.3.1 Procesos más utilizados en el tratamiento de aguas grises	16
1.3.2 Electrocoagulación en aguas grises	18
1.3.3 Usos y aplicaciones del agua tratada	28
1.4. Normatividad	29
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	30
2.1. Diseño de la investigación	30
2.1.1 Tipo de investigación	30
2.1.2 Variable	30
2.1.3 Muestra	31
2.1.4 Hipótesis	32
2.2. Trabajo de laboratorio.	32
2.2.1 Verificación de las condiciones del sistema:	32
2.2.2 Proceso de tratamiento de las muestras:	33
2.2.3 Cuantificación de la Demanda Química de Oxígeno	36
2.3. Trabajo de gabinete	36
2.3.1 Tratamiento estadístico	36
2.3.2 Exploratorio de datos	36
2.3.3 Prueba de U de Mann Whitney	38
CAPITULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
3.1 Resultados experimentales	39
3.1.1 Resultados del proceso de electrocoagulación.	40
3.1.2 Resultados de DQO	41
3.2. Análisis exploratorio de datos	42

3.3. Resultados análisis de dispersión	43
3.4. Resultados análisis de distribución	44
3.5. Resultados de los diagramas de caja y bigotes	46
CONCLUSIONES.	49
ANEXO A.....	51
ANEXO B.....	56
ANEXO C.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	62

AGRADECIMIENTOS

A Dios quien nos ha permitido llegar hasta este momento y nos ha dado la sabiduría y fortaleza, además de mostrarnos su gran amor y favor en cada paso de este camino.

A nuestros queridos padres que con su ejemplo nos han enseñado a nunca rendirnos. Valoramos mucho su amor, esfuerzo, confianza, paciencia, recursos y consejos otorgados para impulsarnos a cumplir nuestros sueños.

A nuestra directora de Tesis la maestra Ana Lilia Maldonado Arellano por compartir sus conocimientos, por su apoyo, confianza y tiempo invertido en nuestro aprendizaje.

A cada uno de los maestros que intervinieron a lo largo de la carrera y de este proyecto, por equiparnos con las herramientas necesarias para desarrollarnos profesionalmente y forjar nuestro carácter.

A nuestros hermanos, amigos y familiares que nos brindaron su apoyo incondicional, por sus risas que nos alegraron el camino y por aportar sus enseñanzas a nuestras vidas.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales es la aplicación de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos con el propósito de reducir la concentración de contaminantes en el agua y permitir la reutilización de los efluentes tratados en actividades en donde se puede sustituir el uso de agua potable.

En la actualidad, es común que el aseo de ropa se realice en un espacio conocido como "Lavandería" en la que se consume una gran cantidad de agua además de ser una fuente de generación de aguas grises. Estas aguas contienen jabón, detergente, cloro, suavizantes, blanqueadores, desmanchadores, pelusas y fibras de telas que, al no ser tratadas para su descarga en barrancas, ríos, y mares, en vertimiento de los sistemas de alcantarillado o si se deja escurrir de manera superficial, puede representar un peligro ya que causan contaminación, deterioro tanto de los sistemas terrestres como acuáticos, mal olor y riesgos a la salud. (Garduño, 2016)

El planteamiento como una alternativa de remediación sostenible es aplicar un proceso de electrocoagulación, para el tratamiento de aguas residuales por tratarse de un proceso simple y confiable para la remoción de contaminantes, no necesita la adición de productos químicos y por tanto de contaminantes secundarios.

Este trabajo es parte de un estudio exploratorio, para observar el comportamiento y evaluar la eficiencia de un sistema de electrocoagulación elaborado por alumnos de la Carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Se pretende que el sistema sea utilizado en las prácticas de laboratorio, de tal manera que se involucre a los estudiantes en la aplicación de procesos sustentables utilizando energía renovable como la solar, fortaleciendo así al plan de estudios de la carrera.

RESUMEN

La expansión urbana ha ido aumentando significativamente y la demanda por el agua es cada vez mayor para uso doméstico e industrial, por lo que el tratamiento de aguas residuales es uno de los más grandes desafíos sobre todo en zonas que sufren de escasez de agua, al buscar nuevas alternativas que fomenten la reutilización del agua.

El presente trabajo, a través de la experimentación y considerando el parámetro de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), evalúa la eficiencia de remoción de contaminantes de un sistema de electrocoagulación de aguas residuales provenientes de un proceso de lavado de ropa.

La experimentación consistió en hacer un muestreo de agua gris con baja carga orgánica y un pH promedio de 8.8. Primero se tomaron muestras de 4 L para tratarlas en el sistema y remover los contaminantes que se encontraban en ellas. Después de recolectar las muestras ya tratadas, mediante el análisis químico se determinó el valor de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Para evaluar la eficiencia, se tomó la diferencia del valor de la DQO de las muestras antes y después del tratamiento y se expresó en porcentaje con lo cual se logró establecer un 77.83% en la remoción de contaminantes.

Dado que se realizó a la intemperie y la energía requerida es proporcionada por una celda solar (sistema sustentable), se programó llevarla a cabo en el mes de enero para que las condiciones atmosféricas no afectaran notablemente los resultados.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación por aguas grises y negras en los sistemas de alcantarillado, tienen su origen en la acelerada urbanización del siglo XX, donde el crecimiento demográfico y la migración a las ciudades han hecho necesario replantear los enfoques de gestión de los residuos urbanos. (Fondo para la comunicación y la educación ambiental. A.C., 2017)

El riesgo de sufrir escasez de agua es un escenario muy probable, pues las disposiciones para su extracción, uso eficiente, reúso, recarga artificial e intensificación del aprovechamiento de agua superficial, son todavía insuficientes para recuperar el equilibrio entre la reserva y el uso de agua ya que solo un 27.6% de las aguas residuales captadas en los centros urbanos es tratada (UNESCO WWAP, 2009)

En 2016, de un total de 32 millones 900 mil hogares del país, 68% recibieron agua diariamente; 3% cada tercer día, 5% dos veces por semana, 3% de vez en cuando, mientras que 7% no recibieron agua (Agenda 2030, 2017).

El Objetivo para el Desarrollo Sostenible 6: Agua limpia y saneamiento de la Agenda 2030, busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua para la población en general, entre sus metas esta mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, la descarga de productos químicos y materiales peligrosos, disminuyendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar, así como aumentar el reciclado y reutilización en condiciones de seguridad (Agenda 2030, 2018).

Para alcanzar dicho objetivo, no es suficiente solo promover un uso eficiente y sostenible del agua entre la población, sino que también es oportuno impulsar acciones que fomenten el tratamiento y reutilización de aguas grises de lavandería, mediante tecnologías de fácil mantenimiento y operación.

La electrocoagulación es un método que remueve la mayoría de los contaminantes del agua como: sólidos suspendidos, hidrocarburos emulsificados, detergentes, entre otros basándose en la concentración de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Se han obtenido resultados favorables en aguas residuales de diversas industrias, por lo que se considera una alternativa para el tratamiento de aguas grises de lavandería.

OBJETIVOS

Objetivo general

- **Estimar la eficiencia de remoción de contaminantes en el sistema de electrocoagulación, mediante la prueba de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).**

Objetivos específicos

- **Evaluar la muestra de agua gris de lavandería antes y después del proceso de electrocoagulación.**
- **Observar el efecto de las variables involucradas en el proceso de electrocoagulación.**
- **Analizar por métodos estadísticos los resultados de DQO.**

CAPÍTULO I. AGUAS GRISES

1.1. Definición y clasificación

Contaminación del agua.

Por contaminación del agua se entiende una presencia de sustancias químicas o de otra naturaleza en concentraciones superiores a las condiciones naturales. Entre los contaminantes más importantes se encuentran los microbios, los nutrientes, los metales pesados, los químicos orgánicos, aceites y sedimentos; el calor también puede ser un agente contaminante, al elevar la temperatura del agua (UNESCO WWAP, 2009).

Una de las formas cotidianas de contaminar el agua es por medio de la generación de aguas grises, las cuales son todas aquellas aguas que vertemos en nuestra vivienda y que contienen sustancias jabonosas y restos orgánicos procedentes de las actividades de limpieza y aseo personal. Las aguas grises no contienen materia fecal por lo que no pueden catalogarse como aguas negras (Puig, 2021). Básicamente existen dos efluentes de aguas grises en las viviendas:

- a) El lavabo, la regadera y las tinas, que genera de 50 a 60% de las aguas grises de las viviendas. Esta agua puede estar contaminada con cabello, jabones, champús, colorantes de cabellos, pasta de dientes, partículas de comida que se desprenden con el lavado de dientes, enjuague bucal, aceites y células muertas del cuerpo, así como residuos químicos de productos de limpieza.
- b) La lavadora contribuye cerca de 25 a 35 % de las aguas usadas en una vivienda. Por lo regular tiene dos tipos de calidad, la que se usa para lavar y enjuagar en el primer ciclo de lavado y la utilizada en el segundo ciclo solo para enjuagar y exprimir. El agua de descarga de la lavadora puede contener jabón, detergente, cloro, suavizantes, blanqueadores, desmanchadores, mugre, grasas, pelusas y fibras de telas (Bazant, 2009). Además de presentar gran turbidez y alcalinidad debido a la presencia de sales y

carbonatos. También se puede encontrar materia orgánica que se descompone rápidamente.

El suministro de agua es una necesidad esencial para todas las personas. La provisión de suficiente agua para satisfacer las necesidades de todos puede ser difícil de lograr y por esta razón, el agua se puede poner a disposición en etapas. El uso de demasiada agua puede privar de agua a personas de otros lugares y tener un impacto negativo para la salud (Organización Mundial de la Salud, mayo 2009). En la figura 1 se muestra el consumo de agua según su uso de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud.

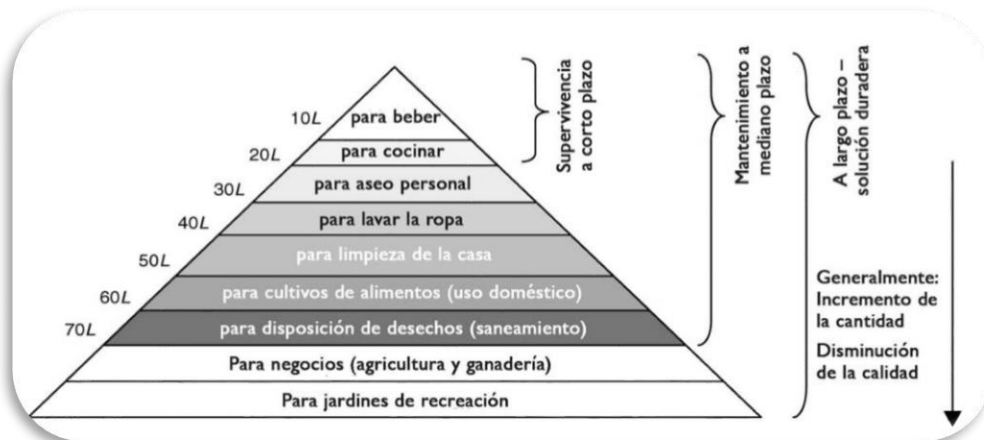


Figura 1 Jerarquía de las necesidades de agua (fuente OMS)

Las características de una muestra de agua gris están determinadas en función de los desechos que estas contienen. Se han reportado valores de pH alcalinos, alcalinidad 60-250 mg/L Na_2CO_3 , sólidos totales 800-1200 mg/dL y DBO_5 400-450 (Yepes, 2018).

Detergentes.

Los detergentes son compuestos orgánicos sintéticos, que disminuyen la tensión superficial de los líquidos en que se hallan disueltos. El cambio en la tensión

superficial se debe a la presencia de una sustancia activa llamada surfactante (Maldonado, 2008).

Los surfactantes están constituidos por moléculas grandes, polares, solubles en agua y aceites. Las propiedades de estas moléculas residen en que cada molécula de surfactante tiene una parte hidrofóbica y una parte hidrofílica. La parte hidrofóbica es un radical hidrocarburo que contiene de 10 a 20 átomos de carbono en una cadena recta o ligeramente ramificada, soluble en grasas y aceites. La parte hidrofílica corresponde a la parte polar de la molécula, puede ser iónico o no iónico y es soluble en agua. (Chambi H., 2018)

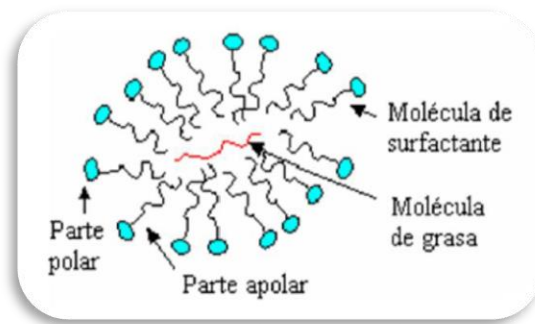


Figura 2 Agrupación micelar de las moléculas del surfactante (Fernández, 2004)

Los detergentes tienen acción solubilizante, humectante, dispersante, emulsionante y de formación de espuma, todas ellas provocadas por el descenso de la tensión superficial del líquido en el que se encuentra, permitiendo a los detergentes penetrar en todas las concavidades y combinarse con los residuos para luego atraerlo hacia la superficie y mantenerlos en suspensión.

Actualmente la mayoría de los detergentes son biodegradables. La biodegradación de estos compuestos depende del tipo de ramificaciones que contenga la estructura del surfactante, mientras más larga y menos ramificada es su cadena hidrocarbonada, mayor es su biodegradabilidad. (Yepes, 2018)

A continuación, en la Tabla 1 se mencionan los diferentes tipos de componentes que se encuentran en las fórmulas de los detergentes y la función que desempeñan.

Tabla 1. Principales sustancias utilizadas en las fórmulas de los detergentes.

SUSTANCIA	FUNCION
Surfactantes	Proveen a los detergentes la capacidad de limpieza.
Agentes suavizadores	Reducen la dureza del agua, promueven la dispersión de la suciedad y evitan que vuelva a depositarse en el tejido, los principales son: tripolifosfato de sodio, ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), carboximetilcelulosa, carbonatos, silicatos y citratos.
Agentes eliminadores de manchas	Degradan las grasas para que puedan ser removidas de los tejidos, entre los más importantes están los blanqueadores y enzimas.
Abrillantadores ópticos	Se encargan de que la ropa se vea más blanca o que los colores queden más vivos.
Reguladores de espuma	Son necesarios para que los surfactantes realicen una limpieza eficiente, los más utilizados son: jabones de ácidos grasos saturados y amidas de ácidos grasos superiores.
Inhibidores de corrosión	Protegen los objetos que se lavan, el silicato de sodio es más usado.
Perfumes	Dan olor a la ropa.
Diluyentes	Aumenta el volumen del detergente, el más utilizado es el sulfato de sodio.

Chambi H., 2018

Daños a la salud y ambiente de las aguas residuales de lavandería.

El poder contaminante de los detergentes se manifiesta en los vegetales acuáticos inhibiendo el proceso de fotosíntesis originando la muerte de la flora y la fauna acuáticas. A los peces les produce lesiones en las branquias, dificultándoles la respiración y provocándoles la muerte. (Fondo para la comunicación y la educación ambiental. A.C., 2017)

Provocan la eutrofización, debido a los altos niveles de fósforo procedentes del tripolifosfato, principal ingrediente de los detergentes. Cuando hay una gran cantidad, de estos compuestos en el agua, se da el crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas, las cuales tienden a cubrir la superficie del líquido e impiden el intercambio de oxígeno y bióxido de carbono, produciendo un desequilibrio ambiental, lo que provoca la muerte de los peces. (Kirk, 1997) Además, pueden aumentar los niveles de cloro y de compuestos organoclorados algunos de carácter tóxico y carcinógeno.

Los surfactantes o agentes tensos activos contenidos en los detergentes, ocasionan la formación de espumas, pueden inducir toxicidad en el agua. (Orozco, 2011). Ocasionalmente ocasionan interferencia en el proceso de mezcla del oxígeno atmosférico con el agua, y disminución del oxígeno disuelto, dificultando el proceso de floculación y disminuyendo la tensión superficial, con lo que se inhibe la autodepuración de los ríos. (Peraza, 2012) (Romero, 2002)

Si la irrigación se hace con aguas que contienen detergentes, se provoca la contaminación de suelos y cultivos afectando el crecimiento de las plantas. Además, se altera la permeabilidad de suelos y en consecuencia facilitan la penetración de microorganismos en las aguas subterráneas. (Maldonado, 2008)

Algunos detergentes contienen enzimas para atacar sustratos orgánicos específicos. La presencia de estas enzimas en las aguas residuales, producen daños a los seres vivos y en los nutrientes que componen su dieta alimenticia. (Maldonado, 2008)

Si el agua gris se quedó estancada, es muy fácil que se llene de larvas de mosquito que además de picarnos pueden transmitir enfermedades como dengue, malaria, paludismo, chikungunya, entre otras.

1.2. Estadística de la abundancia de lavanderías en México.

En la actualidad, la construcción de centros masivos habitacionales con pequeños espacios para ubicar la lavadora y la vida tan ajetreada que se lleva, hace que se disponga de poco tiempo para las tareas domésticas, favoreciendo la expansión y búsqueda de los servicios de lavandería.

De acuerdo con el último Censo Económico realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en nuestro país existen 30,805 establecimientos dedicados al servicio de lavandería y tintorería.

La Ciudad de México es la principal entidad en donde se concentra el mayor número de este tipo de negocios (18%), seguido por el Estado de México con (16%), Jalisco (7.4%), Veracruz (5.4%) y Puebla (4.8%). (Procuraduría Federal del Consumidor, 2018)

Por desgracia el consumo generado de las descargas de agua de las lavanderías aún no está regulado, sin embargo, según un estudio de “Entrepreneur” indica que una lavadora para el hogar gasta entre 180 y 200 litros de agua por ciclo, una semiindustrial utiliza 120, y los equipos ecológicos de alta eficiencia industrial sólo 50. Al usar menos agua, también se reduce a la mitad la cantidad de productos químicos (Rocha, 2010).

1.3. Tratamientos de aguas grises

Las aguas grises no se descomponen inmediatamente después de descargarse, casi no huelen, pero si se guardan o encharcan más de veinticuatro horas, comenzarán a descomponerse y tendrán un olor desagradable. Para evitar esto es necesario darles tratamiento, que permita su reutilización.

La materia en suspensión puede ser desde partículas de varios centímetros y muy densas (normalmente inorgánicas), hasta suspensiones coloidales muy estables y con tamaños de partícula de unos pocos nanómetros (regularmente orgánicos). La eliminación de esta materia en suspensión se suele hacer mediante operaciones unitarias. Sin embargo, para favorecer la separación, se utilizan aditivos químicos.

1.3.1. Procesos más utilizados en el tratamiento de aguas grises

Existen diferentes tecnologías utilizadas en el tratamiento de aguas grises: tratamientos físicos, tratamientos químicos, tratamientos biológicos, o una combinación de estos. Los más comunes se describen a continuación:

- **Filtración lenta.** Es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña y de entre 0.15 y 0.3 mm. Es una operación muy utilizada en el tratamiento de aguas potables, así como en el tratamiento de aguas para reutilización, para eliminar la materia en suspensión.
- **Coagulación-Floculación.** Las suspensiones coloidales suelen ser muy estables y tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico. Mediante la adición de ciertos reactivos químicos se logra desestabilizar la suspensión coloidal (coagulación) y se favorece la floculación para obtener partículas fácilmente sedimentables. Esta operación se utiliza a menudo en el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales. Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide. Habitualmente se utilizan sales con cationes de alta relación carga/masa (Fe^{3+} , Al^{3+}) junto con polielectrolitos orgánicos, cuyo objetivo también debe ser favorecer la floculación.

- Humedales artificiales. Son sistemas acuáticos diseñados para remover la mayor parte de los patógenos y nutrientes contenidos en el agua, replicando los procesos de descomposición que ocurren naturalmente en humedales lacustres o marinos. Su estructura más común es un lecho relleno de grava y arena colocado sobre una superficie impermeable y plantas acuáticas macrófitas cuyas raíces liberan oxígeno evitando que el sedimento se vuelva anóxico (Ortiz, 2014). El sistema una vez que entra en operación presenta pocas posibilidades de control, además de que necesita de hasta tres estaciones de crecimiento de las plantas para alcanzar el máximo rendimiento. (Morales, 2008)
- Redox. En este proceso hay un intercambio de electrones entre el oxidante y el reductor de tal forma que la reacción química tiene lugar entre dos compuestos o iones concretos. Como oxidante se emplean cloro o alguno de sus derivados, así como ozono, agua oxigenada, etc. Y como reductoras sales ferrosas, bisulfato sódico, etc. El proceso de desinfección con cloro u ozono entran en esta categoría (Sainz, 2005).
- Tratamientos biológicos. Consisten en provocar el desarrollo de microorganismos capaces de asimilar la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual, y a través de reacciones bioquímicas de oxidación y de síntesis de nuevos microorganismos, producir su eliminación. De acuerdo al microorganismo que interviene se puede llevar a cabo en presencia de oxígeno y su ausencia, este tipo de procesos se ven afectados por una serie de factores que intervienen de forma decisiva en su mecanismo, como variaciones en la concentración de oxígeno y materia orgánica del agua a tratar, presencia de nutrientes, pH del medio y contenido en sales, compuestos tóxicos o inhibidores del crecimiento bacteriano, etc. (Sainz, 2005)
- La electrocoagulación, es una tecnología conocida desde principios del siglo XX, ha sido eficazmente aplicada en la actualidad para el tratamiento de las aguas residuales de la industria del papel, la minería y la industria de metales pesados. Además, se ha aplicado para tratar agua que contiene alimentos,

grasas, tintes, partículas suspendidas, entre otros. Desde esta perspectiva, la electrocoagulación se convierte en un proceso electroquímico que puede tener resultados exitosos en su aplicación, optimizando los factores que lo conforman, alcanzando el reto de proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico. (Ruiz, 2005)

1.3.2. Electrocoagulación en aguas grises.

La electrocoagulación se puede definir como un proceso en el cual las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso son desestabilizadas por el hierro o por el catión formado por efecto de inducir corriente eléctrica en la celda, a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, (hierro y aluminio más comúnmente), llamadas electrodos.

La corriente eléctrica proporciona un gradiente en el cual las especies iónicas formadas en la superficie de los electrodos viajan libremente hasta ocurrir el proceso de coagulación de materia orgánica, una vez coaguladas las partículas se forman los flóculos ganando peso específico y favoreciendo la sedimentación. Por otro lado debido al campo eléctrico y a las reacciones de evolución de hidrógeno, se genera una mezcla suave y como consecuencia se favorece el choque entre los coloides y por lo tanto la floculación en el interior de la celda electroquímica sin necesidad de agitación mecánica.

Se considera que en el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas: inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la desestabilización de los contaminantes y emulsiones, y finalmente, se produce la formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de éstas en el coagulante.

El agua también se electroliza, produciendo burbujas pequeñas de oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo, iones OH^- y radicales de HO_2^- , que promueven la flotación de los sólidos coagulados y de los flóculos. Los iones OH^- y radicales HO_2^-

de los metales pesados ocasionan precipitaciones y desglosan algunas moléculas de compuestos orgánicos.

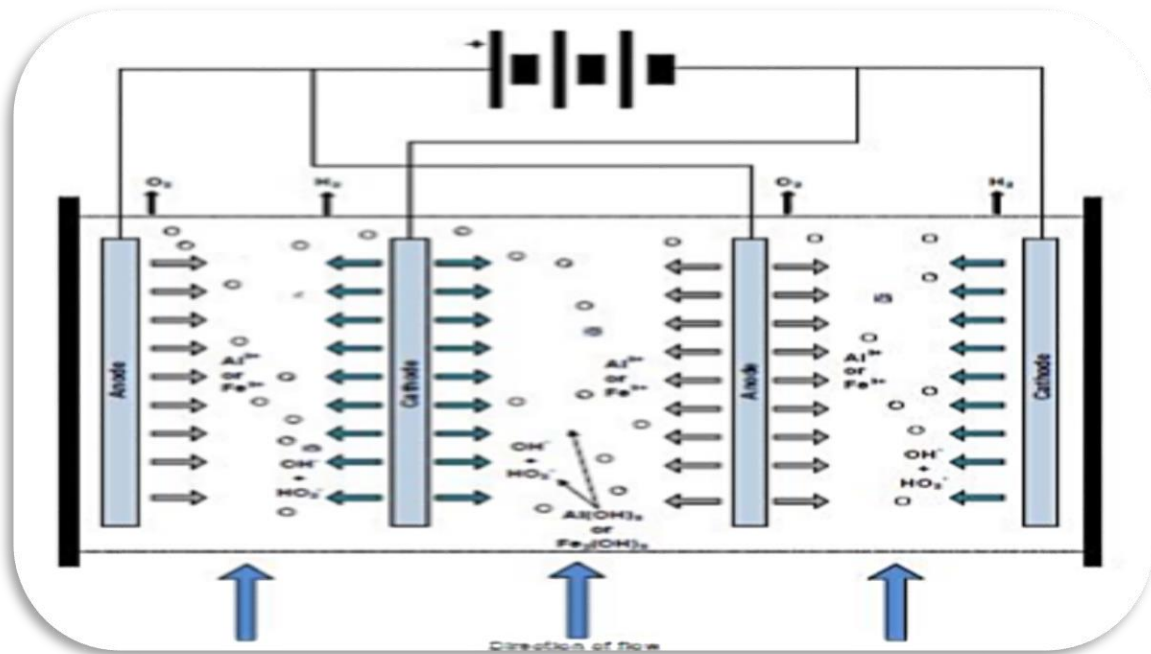


Figura 3 Esquema de una celda de electrocoagulación (Pérez, 2012).

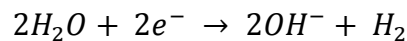
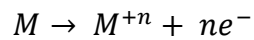
Reacciones en el proceso de electrocoagulación.

Las reacciones más importantes que pueden sufrir las partículas de contaminantes son: hidrólisis, electrólisis, reacciones de ionización y formación de radicales libres. Estas reacciones cambian las propiedades del sistema agua-contaminantes, que conlleva a la eliminación de la carga contaminante del agua.

La cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema.

La producción de iones metálicos se da en el ánodo y son los iones que, por oxidación electrolítica, dan origen a la sustancia química que actúa como coagulante.

La corriente pasa a través del electrodo metálico oxidando el metal (M) a catión (M^{+n}). Simultáneamente el agua es reducida a hidrógeno gaseoso y a un ión hidroxilo (OH^-). Así, la electrocoagulación introduce cationes metálicos *in situ*, electroquímicamente, usando ánodos de sacrificio.



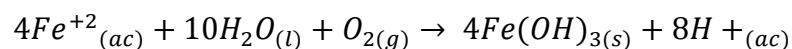
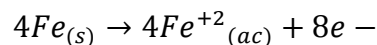
El catión se hidroliza en agua formando un hidróxido con la especie determinada por la solución de pH.

Los cationes fuertemente cargados desestabilizan cualquier partícula coloidal por la formación de complejos polihidroxilos polivalentes. Estos complejos tienen propiedades fuertemente de adsorción, formando agregados con los contaminantes. La evolución del hidrógeno gaseoso ayuda en la mezcla y por lo tanto, la floculación. Una vez que el floculo es generado, el gas electrolítico crea el efecto de flotación, removiendo los contaminantes al floculo o a la carga espumosa a la superficie líquida. (Pérez, 2012)

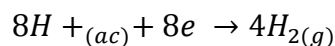
Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación *in situ* de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso $Fe(OH)_2$ o hidróxido férrico $Fe(OH)_3$.

Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico.

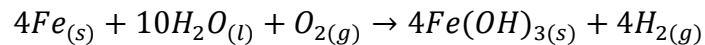
En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo ocurre la reacción:

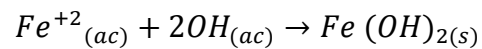
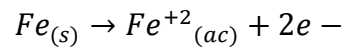


Reacción global:

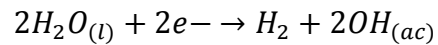


Mecanismo 2: Formación de hidróxido ferroso

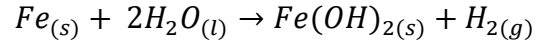
En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:



Reacción Global:



Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas.

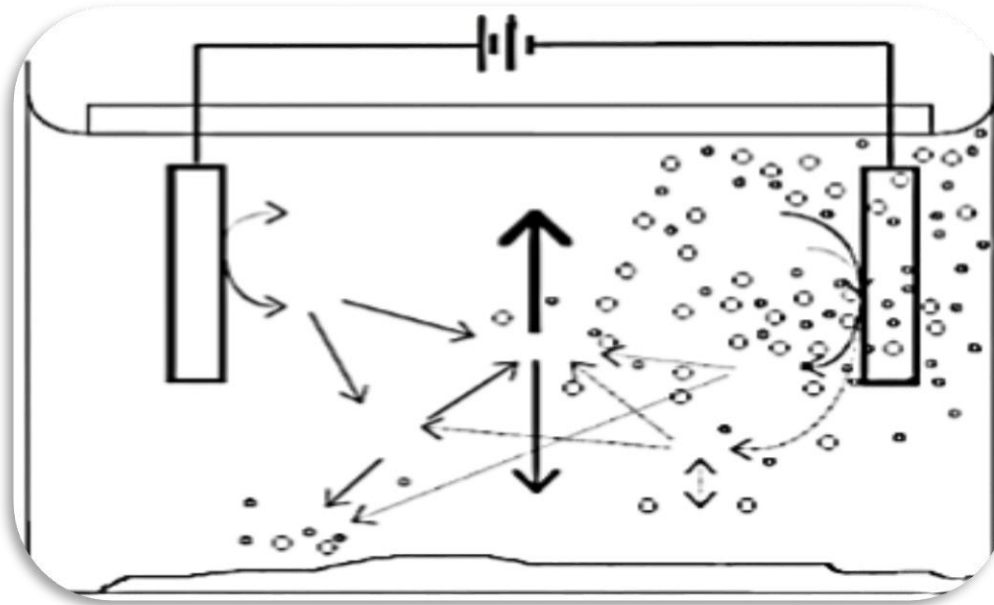


Figura 4 Interacciones dentro de la celda en el proceso de electrocoagulación (Pérez, 2012).

Factores que influyen en el proceso de electrocoagulación

Los principales factores que fluyen en la eficiencia del proceso de electrocoagulación son: pH, geometría de la celda, hidráulica e hidrodinámica del fluido, material de los electrodos, la intensidad de corriente y temperatura.

La densidad de corriente determina la cantidad de iones liberados por los electrodos y por lo tanto la dosificación del hidróxido en la disolución, también determina la densidad de producción de burbujas.

El tiempo de la electrólisis determina la velocidad de producción de los cationes metálicos que facilitan la formación de hidróxidos que actúan como coagulantes.

La selección del material del electrodo depende de la naturaleza y afinidad que tenga el contaminante que se pretende remover con el coagulante producido, es decir, si se quiere remover material suspendido, el coagulante debe propiciar una desestabilización de los coloides para que estos se aglutinen y sean separados por precipitación. Para elementos disueltos se busca que el coagulante los retenga mediante algún mecanismo fisicoquímico.

La utilización de electrodos de Aluminio (Al) tiende a ser minimizada con respecto a los de Hierro (Fe), debido a problemas de disposición de los lodos conteniendo ese metal. Los electrodos de Al son más eficientes para la remoción de aceites y se remueve mejor el arsénico (As) y el cadmio (Cd) de aguas residuales. Con electrodos de Fe se remueve más turbiedad y grasas y no hay una diferencia importante para la remoción de DQO utilizando electrodos de Fe y Al. (Piña-Soberanis, 2011)

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido, considerado como una de las variables importantes, por participar directamente en el equilibrio de la hidrólisis que determina el origen de las diversas especies en solución.

El pH es función del tipo de electrodos que se utiliza y de la naturaleza del agua residual que se trata. En general, las mejores remociones de contaminantes se han obtenido a pH cercano a 7, mientras que a pH bajos los hidróxidos formados permanecen en la disolución, pero a medida que aumenta este se propicia la formación de $[\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}]$ y $[\text{Fe}(\text{OH})_{2(s)}]$, los cuales presentan estructuras amorfas, largas áreas superficiales, cargas positivas y propiedades hidrofóbicas que favorecen la interacción con las partículas orgánicas, beneficiando la floculación de los sistemas coloidales y su posterior sedimentación. (Ojeda, 2012)

El efecto de la temperatura sobre la electrocoagulación no ha sido muy investigado, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se intensifica hasta llegar a 60°C, punto en el que se hace máxima para luego decrecer. Un incremento en la temperatura, aumenta la velocidad de reacción, la cual se duplica por cada 10°C de aumento de temperatura. (Aguilar, 2015)

Reactores para procesos de electrocoagulación.

Los reactores para la electrocoagulación pueden ser reactores tipo batch o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de reactor

depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar. (Restrepo, 2006).

El reactor de electrocoagulación (PFR no ideal, que opera intermitentemente) debe trabajar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene también la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas. (Restrepo, 2006).

El reactor utilizado está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectada a una fuente de energía externa (Arango, 2005). Al no haber elementos móviles se reducen los gastos de mantenimiento del proceso. El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo.

El diseño formado por un par de electrodos no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una adecuada disolución del metal se requiere de electrodos de gran área superficial, es por esta razón que se utilizan celdas con electrodos monopolares en paralelo o conectados en serie.

El sistema para la electrocoagulación requiere de una fuente de corriente directa, un regulador de densidad de corriente y de un multímetro para leer los valores de corriente.

- *Monopolar*. Los electrodos están conectados en paralelo y sometidos al mismo potencial, lo cual genera mayor gasto de energía.
- *En Paralelo*. En la disposición monopolar en paralelo la corriente eléctrica se reparte entre todos los electrodos en relación a la resistencia de las células individuales. (Mollah, 2001). En la figura 4 se aprecia la distribución de los electrodos.

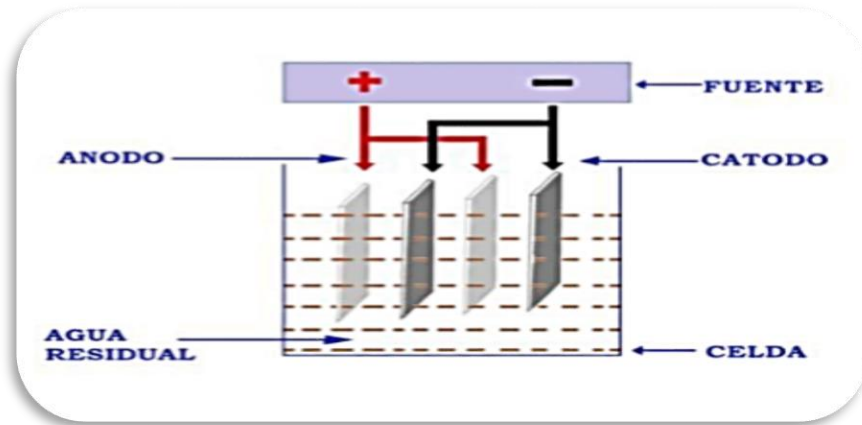


Figura 5 Reactor con electrodos monopolares conectados en Paralelo (Mollah, 2001).

- *En Serie.* En la disposición electrodos monopolares en serie se observa que cada par de electrodos de sacrificio " está conectado internamente uno con el otro, y no tiene interconexiones con los electrodos externo. Esta disposición de electrodos monopolares con celdas en serie es eléctricamente similar a una única célula con muchos electrodos e interconexiones. En disposición en serie de electrodos, se requiere una diferencia de potencial más alto se requiere para una corriente dada porque las células conectadas en serie tienen una mayor resistencia. (Mollah, 2001).

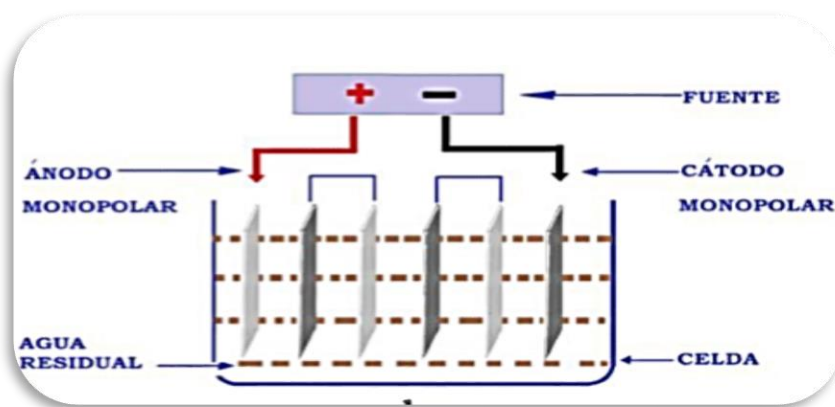


Figura 6 Reactor con electrodos monopolares conectados en serie (Mollah, 2001)

La configuración bipolar trabaja a menor intensidad y mayor voltaje que la monopolar. Las celdas bipolares tienen la ventaja de la sencillez de su disposición, ya que sólo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño. Sin embargo, el elevado potencial entre los electrodos alimentadores también origina que una parte de corriente fluya a través de la disolución causando un bypass de corriente a los electrodos bipolares y produciendo por tanto pérdidas de corriente, lo que debe ser tenido en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de electrodos. (Mollah, 2001).

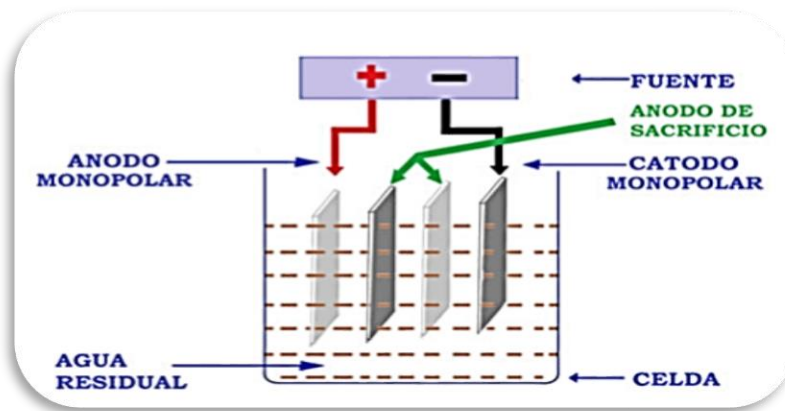


Figura 7 Reactor con electrodos bipolares conectados en paralelo (Mollah, 2001)

Ventajas:

- Los costos de operación son menores que los de procesos convencionales usando polímeros.
- Requiere de equipos simples y fáciles de operar, con la suficiente libertad operacional para manejar los problemas encontrados en su funcionamiento.
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.

- Los flóculos formados por la electrocoagulación son similares a los producidos químicamente, pero más grandes, contienen menos agua ligada, son antiácidos y más estables y pueden ser separados rápidamente por filtración.
- Ausencia de magnesio en los lodos por la no utilización de éste en el proceso.
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.
- Purifica el agua y permite su reciclaje.
- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.
- Produce efluentes con menor cantidad de Sólidos Disueltos Totales SDT comparado con los tratamientos químicos, si esta agua se reúsa, los bajos niveles de SDT contribuye a bajos costos de tratamiento de aguas.
- Remueve las partículas coloidales más pequeñas, ya que el campo eléctrico aplicado las pone en movimiento más rápidamente facilitando la coagulación.
- Las burbujas de gas producidas, pueden llevar el contaminante a la superficie de la solución, donde puede concentrarse fácilmente, ser recuperado y removido.

Desventajas:

- Reposición de los electrodos de sacrificio.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo utilizado.
- No es efectivo en la remoción de DBO soluble, proveniente de solventes y anticongelantes.
- El uso de electricidad puede ser costoso en muchos lugares.
- Una película de óxido impermeable puede formarse en el cátodo que lleva a la pérdida de eficiencia del proceso.

1.3.3. Usos y aplicaciones del agua tratada

De acuerdo con sus usos, el agua se clasifica en:

- **Consuntivo.** Cuando existe consumo de agua, entendido como la diferencia entre el volumen suministrado y el volumen descargado. Esto es, el agua que se consume y, por tanto, se gasta. El uso consuntivo se divide en:
 - **Doméstico-público.** Utilizada en casas, industrias y servicios conectados a redes de agua potable, por ejemplo, de limpieza (vías públicas), recreación (fuentes) y hasta protección (bomberos). La principal fuente de abastecimiento es la subterránea (62 %). Los municipios son los responsables de proporcionar ese servicio, así como el de drenaje, alcantarillado y tratamiento.
 - **Industria autoabastecida.** Incluye a aquellas que toman agua directamente de los ríos, arroyos, lagos o acuíferos del país (con un permiso llamado Título de concesión, otorgado por la Conagua), como las del sector minero, agua y suministro de gas, construcción y manufactureras.
 - **Agrícola.** Se destina principalmente al cultivo, pero incluye además a la acuicultura, el sector pecuario y el aprovechamiento forestal.
 - **Energía eléctrica.** Utilizada para la generación de energía eléctrica, que sí implica un gasto de agua para su producción, como por ejemplo las centrales de vapor duales, carboeléctricas, turbo gas y combustión interna.
- **No consuntivo.** Cuando se usa agua, pero no se consume como en la generación de energía eléctrica, que se utiliza el volumen almacenado en las presas. (Conagua, 2011).

En el mundo, el principal uso del recurso hídrico se presenta también en el sector agrícola, con 72 % de la extracción total. (FAO).

1.4. Normatividad

El proceso que recibirá el agua depende de los contaminantes y en que se utilizará el agua resultante, sin embargo se debe de tomar en cuenta las medidas establecidas por el gobierno para tener un control del uso de aguas residuales, las cuales están contenidas en la Norma Oficial Mexicana NOM 003 SEMARNAT 1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas, es decir un valor o rango asignado a un parámetro, que no debe de ser excedido por el responsable del tratamiento del agua residual, con el objeto de que se reúsen en servicios al público, a fin de proteger el medio ambiente y la salud de la población.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Diseño de la investigación.

Para comprender la investigación es necesario definir y contar con todos los datos que nos permitirán tener la fundamentación necesaria que contribuirá con la hipótesis de este proyecto.

2.1.1 Tipo de investigación.

Con la finalidad de evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes del sistema de electrocoagulación en el agua gris, se seleccionó un estudio de tipo experimental. Así que, una vez reconocido e identificado cada parte del sistema de electrocoagulación, se realizaron 9 experimentos con las mejores condiciones de funcionamiento del equipo. Controlando las variables reportadas que afectan el proceso de electrocoagulación.

2.1.2 Variable

En cada uno de los ensayos realizados se controlaron las mismas variables las cuales son: pH, intensidad de corriente, tiempo y temperatura.

Se reporta que el pH ideal que la muestra debe presentar antes de iniciar el proceso de electrocoagulación se encuentre entre los valores de 7-8. En la muestra trabajada se verificó que el valor estuviera en ese rango. Al finalizar el proceso el pH aumentaba a un valor entre 10 a 11, por lo que fue necesario adicionar H_2SO_4 para ajustar el valor alrededor de 7 y de esta manera obtener un agua que pueda ser reutilizable.

De acuerdo a la literatura la electrocoagulación se ve favorecida con una mayor intensidad de corriente. Debido a que en este trabajo se utilizó como fuente de energía una celda solar, esta variable se controló trabajando en el mismo horario durante la experimentación (de 12:00 a 15:00 hrs) y en los mismos intervalos de tiempo, controlando con esto también la temperatura. Se fijó un tiempo de 15 minutos para cada corrida, ya que en algunos casos en los ensayos realizados cuando se rebasaba ese tiempo se notaba un exceso de hierro en el agua tratada.

A través del parámetro de Demanda Química de Oxígeno (DQO) fundamentada en la norma oficial mexicana NMX-AA-030/2-SCFI-2011 se evaluó la eficiencia de la remoción de contaminantes del sistema de electrocoagulación. Esta es una medida de la carga orgánica removida y es una variable aleatoria continua.

2.1.3 Muestra

Se trabajó con agua residual gris proveniente de un proceso de lavado de ropa, seleccionada a conveniencia. El efluente presentó a simple vista un color grisáceo, olor a detergente, mínima presencia de materia orgánica, turbidez, escasa cantidad de sólidos suspendidos, un pH de 8.8 y se encontraba a una temperatura de 25°C. La figura 8 muestra el aspecto del agua utilizada.



Figura 8 Muestra de agua gris sin tratamiento.

La muestra de agua gris fue obtenida de la zona de Nezahualcóyotl. Cabe señalar que el agua potable de la zona es suministrada de pozos. La cantidad de agua a tratar muestreada fueron 50 litros, de la cual se extrajeron 9 submuestras de 4 litros cada una, para ser llevadas a tratamiento.

Al tomar las submuestras, primero se agitaba el agua residual gris por varios minutos con el propósito de homogeneizarla y obtener muestras representativas, es decir, en condiciones similares.

2.1.4 Hipótesis

Se espera que, en el tratamiento de aguas grises de lavandería mediante electrocoagulación, la remoción de contaminantes medidos con el parámetro de DQO, el valor de la mediana (Md) sea mayor al 70%. Como es una prueba no paramétrica se comparan las medianas por ser una medida posicional.

$$H_0: Md \leq 70\%$$

$$H_a: Md > 70\%$$

2.2. Trabajo de laboratorio.

Para la realización de este proyecto se trabajó con una serie de muestras que pasaron por un proceso de electrocoagulación y filtración, además de uno de control que es la misma muestra sin tratamiento.

Una vez finalizada la experimentación se analizaron y se compararon ambos resultados.

2.2.1 Verificación de las condiciones del sistema:

- El sistema de electrocoagulación se encuentre limpio y que todas las válvulas estén cerradas. En la figura 9 se muestra el sistema de electrocoagulación listo para operar.



Figura 9 Sistema de electrocoagulación

- Revisar que no haya óxido en las placas de hierro y lijarlas de ser necesario antes de comenzar a usarlas. En la figura 10 se muestra como quedan las placas después del proceso de electrocoagulación.



Figura 10 Placas después de un tratamiento por electrocoagulación

- El panel solar se encuentre conectado de la siguiente manera (ver figura 11):

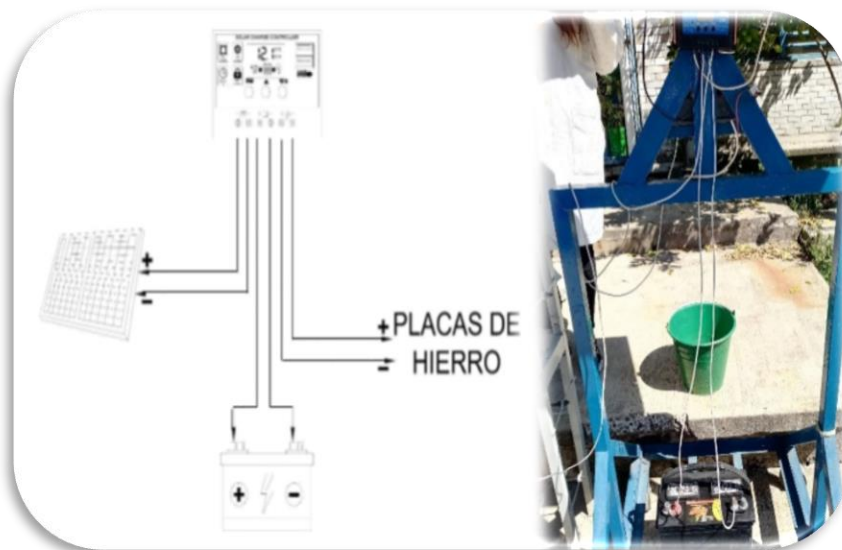


Figura 11 Conexión del sistema panel solar y equipo de electrocoagulación

2.2.2 Proceso de tratamiento de las muestras:

Una vez verificados los puntos anteriores se procede con la siguiente secuencia:

- Se mide el pH inicial de la muestra de agua. Si el valor esta fuera del rango 7-8, se ajusta con una solución de ácido sulfúrico y/o hidróxido de sodio.
Nota: El electrodo se enjuaga con agua destilada después de cada medición.

- Se llena el reactor con 4 litros de la muestra a tratar al sistema hasta la marca indicadora.
- Se coloca la tapa del equipo de electrocoagulación y se insertan las placas de hierro. Debe asegurarse de que ninguna placa tenga contacto entre sí.
- Haciendo uso de los caimanes eléctricos, se conectan 5 placas al cable de carga positiva y 5 placas al cable de carga negativa del panel solar, como se muestra en la figura 12.



Figura 12 Colocación de los caimanes en las placas de hierro (electrodos)

- Se cierra el circuito eléctrico, conectando los cables de corriente a la batería para que comience la electrocoagulación. Se registran el voltaje inicial, la hora y la temperatura.



Figura 13 Conexión del sistema de electrocoagulación

- Después de 15 minutos se desconecta el circuito de la batería. Se desconectan los caimanes de las placas y se retira la tapa junto con las placas de hierro.
- Se recoge la espuma generada y se mide el nuevo pH del agua.
- Se miden pH, si el valor esta fuera del rango 7-8 (casi siempre se obtiene pH alcalino) se deberá ajustar utilizando una solución de ácido sulfúrico, adicionándolos al agua por una esquina del recipiente. Después de mezclar, se mide nuevamente el pH.
- Se dejan transcurrir 15 minutos para que se realice la separación.
- Se abre la válvula progresivamente para permitir que el líquido pase a los filtros.

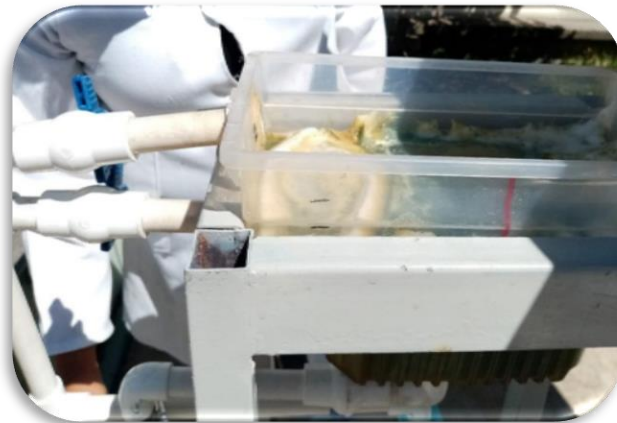


Figura 14 Drenado de la válvula al sistema de filtrado

- Una vez vacío el recipiente colector, se limpia completamente para no dejar residuos.
- Las placas de hierro se lijan, lavan y secan para retirar el óxido formado durante la electrocoagulación.



Figura 15 Placas después del tratamiento de electrocoagulación

2.2.3 Cuantificación de la Demanda Química de Oxígeno

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno que tiene cualquier sustancia, el método para la determinación de la demanda química de oxígeno aplicable a cualquier muestra acuosa incluyendo todo tipo de agua residual está regulada por la norma NMX-AA-030/2-SCFI-2011, que consiste en la oxidación con ácido sulfúrico y dicromato de potasio mediante la digestión en presencia de determinadas sales para evitar interferencias y como catalizadores. La cantidad de dicromato utilizada en la oxidación de la muestra se determina midiendo la absorbancia del Cromo (III) (ver anexo C)

2.3. Trabajo de gabinete

Con la finalidad de comprender los registros obtenidos en el estudio de laboratorio, que servirán de base para el análisis e interpretación de los resultados, el estudio de gabinete identificará los problemas de funcionamiento del sistema, para poder replicar y determinar los aspectos de mejora.

2.3.1 Tratamiento estadístico

Se obtuvieron diversas medidas estadísticas que permiten dar una aproximación de la tendencia del comportamiento de la variable medida, es decir la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Se utilizaron las medidas de tendencia central y variabilidad de respuesta. Con base en la cantidad y calidad de los datos se propuso una prueba estadística no paramétrica U de Mann-Whitney para definir en términos de significancia los resultados obtenidos.

2.3.2 Exploratorio de datos

Mediante un análisis exploratorio se realizó una depuración de la base de datos de los resultados de DQO con y sin tratamiento. Este procedimiento está constituido por cuatro fases:

1. **Región:** Se refiere a la zona en donde se concentra la mayoría de los datos obtenidos de la DQO tanto para la muestra sin y con tratamiento. Esta se interpreta a partir la obtención de las medidas de tendencia central.
 - *Mediana.* Para determinar el valor que parte al 50% la distribución de datos
 - *Moda.* Para determinar el valor que más se repite.
 - *Media.* Para obtener el valor promedio.
2. **Dispersión:** Permite conocer la variabilidad de respuesta de la DQO a partir de las medidas obtenidas en cada muestra.
 - *Desviación estándar (S).* Para determinar la dispersión de los datos con respecto a la media.
 - *Varianza (S^2).* Para expresar la variabilidad de respuesta en términos cuadráticos.
 - *Coeficiente de variación (CV).* Esta medida permite expresar la variabilidad de respuesta de una variable en términos de porcentaje.
 - *Rango.* Para determinar la diferencia entre el valor máximo y el mínimo.
3. **Distribución de los datos.** Para determinar que asimetría presenta el conjunto de datos. Asimetría negativa (a), simétrica (b) o asimetría positiva (c)

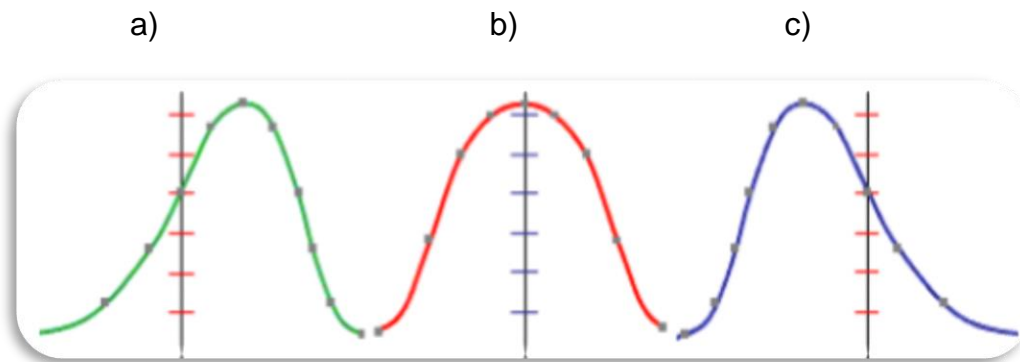


Figura 16 Distribución de datos

4. Diagrama de caja y bigote. A partir de la representación de cinco datos se puede identificar la presencia de valores atípicos o extremos.

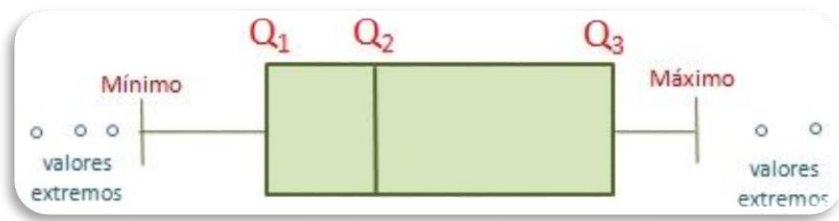


Figura 17 Diagrama de caja y bigote

2.3.3 Prueba de U de Mann Whitney

Pertenece a las pruebas no paramétricas que contrasta dos muestras independientes, dando a conocer si existen o no diferencias significativas entre ambas. Esta prueba permite probar si dos grupos independientes han sido tomados de la misma muestra.

Se utiliza para comparar dos grupos de rangos (medianas) y determinar que la diferencia sea estadísticamente significativa.

Se calcula mediante la siguiente fórmula

$$U = n_1 n_2 + \frac{n_x(n_x + 1)}{2} - \sum R_x$$

Donde:

$n_1 n_2$ = número de casos de cada grupo

n_x = número de casos para cada grupo

$\sum R_x$ = suma de los rangos de cada grupo



CAPITULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados experimentales

En esta sección se presentan los datos cuantitativos del proceso de electrocoagulación, valores de pH inicial, temperatura en °C, voltaje inicial y final en (Volts), pH final del tratamiento y pH ajustado con el fin de analizar su influencia. Para determinar la eficiencia del sistema en la remoción de contaminantes en el agua gris se presentan los resultados de DQO

Los datos cualitativos de este experimento son las características físicas observadas en la muestra con y sin tratamiento

Tabla 2 Características cualitativas de la muestra.

Característica	Sin tratamiento	Con tratamiento
Turbidez	Se observa una coloración grisácea y pierde su transparencia debido a las partículas en suspensión.	Se observa que el agua es incolora.
Olor	Se percibe un fuerte olor a jabón	No se percibe aroma
Color		

3.1.1 Resultados del proceso de electrocoagulación.

En la tabla 3 se presentan los resultados de las variables involucradas en el proceso para cada uno de los ensayos realizados, a fin de analizar el efecto de estas.

Tabla 3. Datos obtenidos en el electrocoagulador.

Número de muestra	pH sin tratamiento	T (°C) sin tratamiento	Voltaje inicial (V)	Voltaje final (V)	pH final del tratamiento	pH ajustado
1 S	8.86	25.0	12.4	13.9	10.70	7.33
2 S	8.89	25.0	12.6	13.1	11.19	7.45
3 S	8.87	25.0	12.2	12.4	10.89	7.26
4 S	8.80	25.0	12.1	13.4	10.55	7.25
5 S	8.79	25.0	12.7	13.1	10.37	7.40
6 S	8.77	25.0	12.5	12.9	11.18	7.14
7 S	8.74	25.0	12.4	14.1	11.10	7.43
8 N	8.74	18.4	11.7	11.3	10.18	7.32
9 N	8.74	18.3	11.7	11.5	11.41	7.57

Nota 1 los datos obtenidos de la tabla se tomaron en el mes de enero del 2020 * S= soleado *N= nublado*

La experimentación se realizó a finales del mes de enero del 2020, durante tres días seguidos en un horario de 12 a 16 horas aproximadamente, las condiciones de radiación solar fueron adecuadas.

En la Tabla 3, se aprecia que el pH de la muestra antes del tratamiento presenta un patrón en sus valores que va de 8.74 a 8.89. Como se mencionó anteriormente la

energía que alimentaba al sistema de tratamiento provenía de una celda solar (con más de 10 años de servicio) que carece de regulador de voltaje y depende de la radiación solar en el momento de la experimentación, razón por la cual existe una variación entre el voltaje inicial y final que va de un rango de 11.3 a 14.1. La temperatura de las muestras corresponde a la temperatura ambiente, ya que la experimentación se desarrolló en un espacio abierto, estando expuesto a las condiciones ambientales. Se observa que las muestras 8 y 9 son las más bajas debido a que en ese día la temperatura ambiente bajo, se nublo y se presentaron ráfagas de viento, sin embargo, con estas condiciones el proceso no se vio afectado significativamente.

Se puede observar que al finalizar el proceso de electrocoagulación se obtienen valores de pH alcalinos, por lo que se procedió a ajustar la muestra tratada a un pH entre 7 y 8 para tener la posibilidad de reutilizar el agua obtenida.

3.1.2 Resultados de DQO

Los resultados mostrados en la tabla 4 son los datos experimentales obtenidos de la DQO en la muestra sin y con tratamiento, calculados con la curva de calibración detallada en el anexo B. Se observa que el sistema de tratamiento utilizado minimiza la carga de contaminantes en la muestra de agua gris. Se puede notar que la muestra 7 registra el mismo valor inicial de DQO que la muestra 3 y 6 (1110.4791 mg/L) sin embargo, después del proceso de electrocoagulación la muestra 7 registra mayor remoción de contaminantes, esto se debe a que esta muestra fue la que alcanzó mayor voltaje (14.1 V). También podemos ver que en la muestra 5 se reporta el valor de DQO más alto (1326.8624 mg/L) y después de tratarla registra uno de los valores mas bajos de DQO, esto es debido a que durante el proceso de electrocoagulación no hubo mucha variación de voltaje.

En las dos ultimas muestras 8-9 a pesar de que registran los voltajes mas bajos de toda la experimentación, y el voltaje inicial es mayor al voltaje final, hay buena remoción de contaminantes debido a que el voltaje se mantuvo constante.

Tabla 4. Resultados experimentales de DQO para la muestra.

Muestra	DQO (mg/L) sin tratamiento	DQO (mg/L) con tratamiento
1	1203.2148	246.1206
2	1079.5672	238.3926
3	1110.4791	261.5765
4	1017.7434	246.1206
5	1326.8624	230.6646
6	1110.4791	246.1206
7	1110.4791	215.2087
8	1125.9351	253.8485
9	1048.6553	253.8485

3.2. Análisis exploratorio de datos

Con los datos DQO (mg/L) de la tabla 4, se estimaron las medidas de tendencia central presentadas en la tabla 5, con las cuales es posible observar la distribución de los datos con respecto al valor de la mediana e inferir sobre el comportamiento que tienen las muestras.

Tabla 5. Resultados estadísticos obtenidos para la muestra con y sin tratamiento.

<i>Medidas de tendencia central DQO (mg/L)</i>		
	Sin tratamiento	Con tratamiento
Media	1125.9351	243.3224
Mediana	1110.4791	246.1206
Moda	1110.4791	246.1206

Se consideró para la depuración de la base de datos de DQO sin y con tratamiento, la zona donde se concentra la mayoría de los datos, se realiza el análisis no paramétrico utilizando la mediana porque es un valor posicional que parte al 50% una distribución de datos, mientras que la media tiene la desventaja que se ve afectada por valores atípicos y extremos

En la tabla 4 el valor de la media sin tratamiento es 1125.9350 mg/L se encuentra ligeramente 15 unidades por arriba de la mediana 1110.4791 mg/L; y el valor de la moda es igual al valor de la mediana. Con respecto a los datos para la muestra con tratamiento el valor de la media 243.3223 mg/L se encuentra ligeramente 3 unidades por de abajo de la mediana 246.1206 mg/L; y el valor de la moda es igual al valor de la mediana. Lo anterior denota que no hay dispersión de datos por lo que el valor de la DQO puede ser reportado por cualquiera de las medidas de tendencia central.

3.3. Resultados análisis de dispersión

Tabla 6. Análisis de dispersión de la muestra con y sin tratamiento.

Datos: DQO (mg/L)	Sin tratamiento	Con tratamiento
Desviación estándar(S)	91.4386	13.7618
Varianza (S ²)	8361.0236	189.3872
Rango	309.1190	46.3678
Mínimo	1017.7434	215.2087
Máximo	1326.8624	261.5765
Número de muestras	9	9
Coeficiente de variación (CV)	8.12%	5.65%

Los datos de la tabla 5 presentan que para la muestra con y sin tratamiento la desviación estándar y la varianza indican una mayor heterogeneidad en los resultados de la DQO, sin embargo, los coeficientes de variación indican que la variabilidad de respuesta es baja con un valor de 8.12% para la muestra sin tratamiento y 5.65% con tratamiento. También se observa que existe menor

variabilidad de respuesta en las muestras tratadas con relación a las que no tienen tratamiento como era de esperarse debido a las características físicas de las muestras.

3.4. Resultados análisis de distribución

Mediante los valores de asimetría calculados se observó la concentración de los datos con respecto de la mediana.

Tabla 7. Distribución de datos de DQO (mg/L)

<i>Análisis de distribución</i>	
Coeficiente de asimetría sin tratamiento	1.416
Coeficiente de asimetría con tratamiento	-1.0133

Para el caso de la tabla 7 notamos un valor positivo para la muestra sin tratamiento, por lo que podemos deducir que se trata de una asimetría positiva, mientras que para el caso de la muestra con tratamiento nos indica que la distribución es negativa. Sin embargo, se puede apreciar en las gráficas que ambas son simétricas lo que indica que el conjunto de datos tiende a expresar una distribución normal.

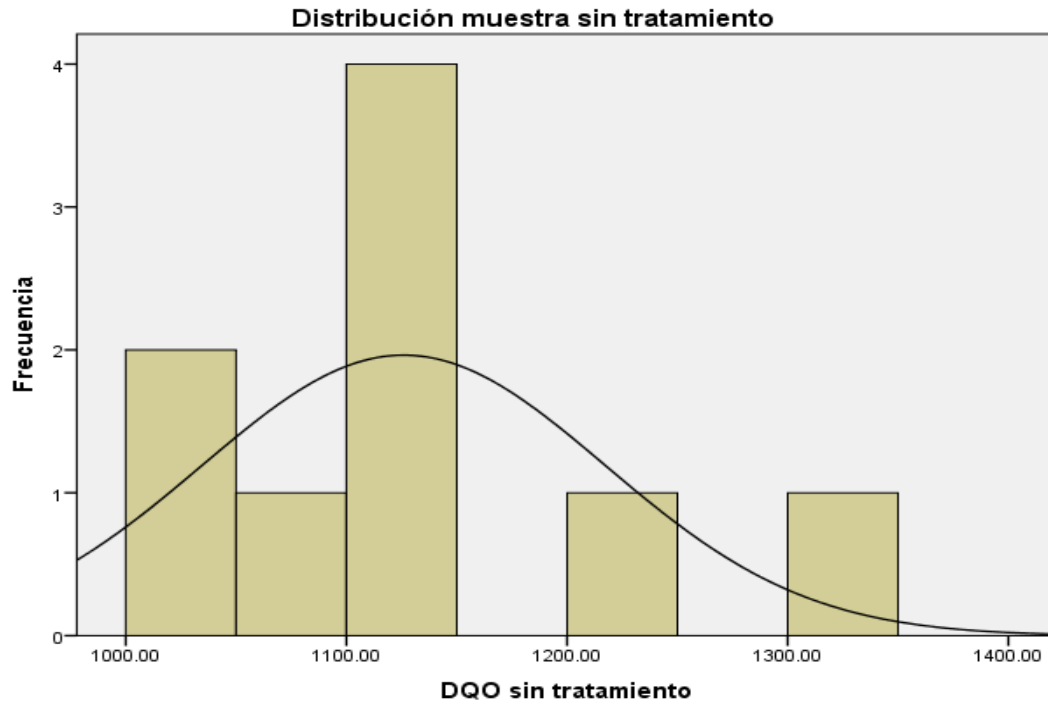


Figura 18 Distribución muestra sin tratamiento

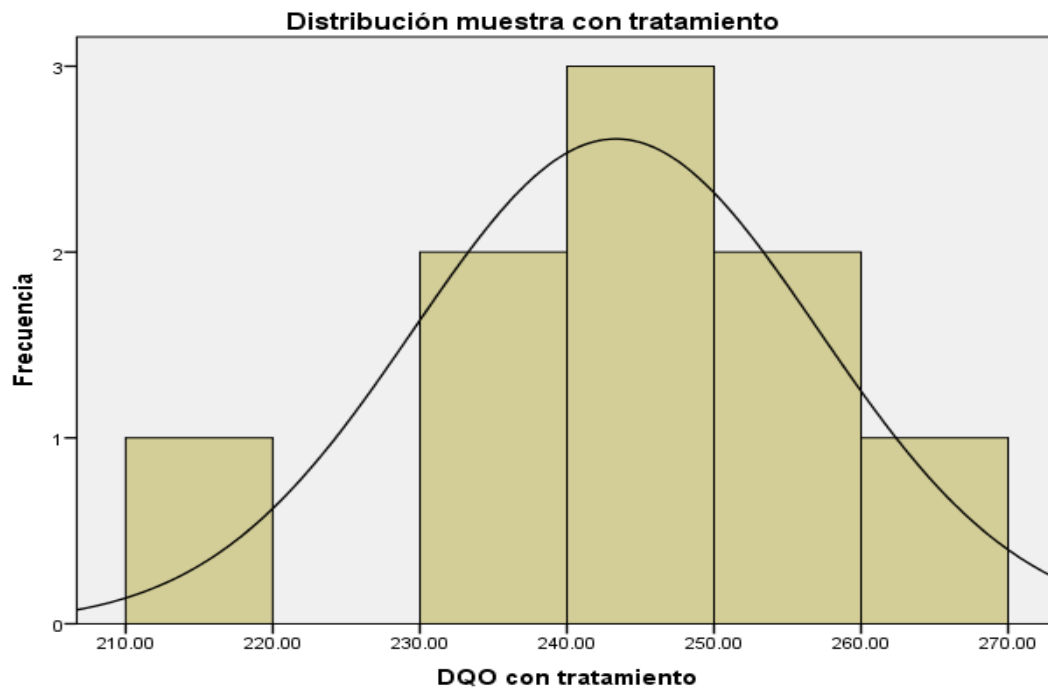


Figura 19 Distribución muestra con tratamiento

3.5. Resultados de los diagramas de caja y bigotes

Para identificar los valores atípicos y extremos para cada grupo de datos, se utilizó la herramienta gráfica de Caja y bigote.

Tabla 7. Percentiles diagramas de caja y bigote

<i>Análisis caja y bigote</i>			
percentiles	25	50	75
Sin tratamiento	1064.1113	1110.4791	1164.5750
Con tratamiento	234.5286	246.1206	252.8485

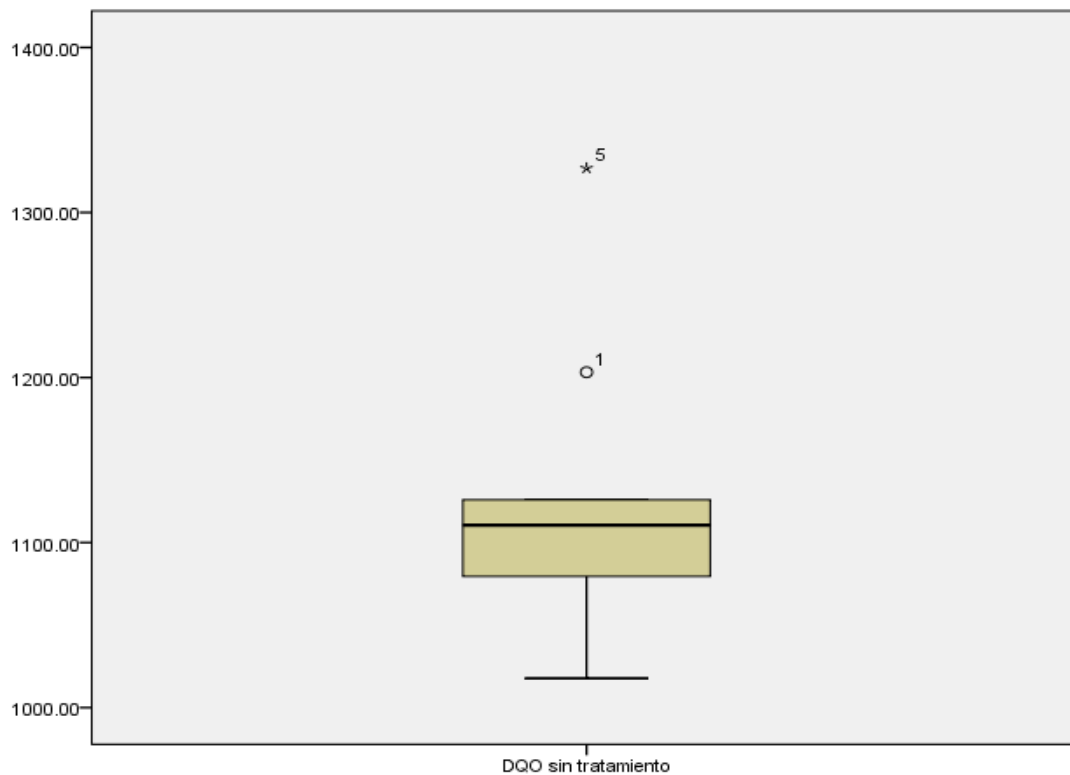


Figura 20 Diagrama de caja y bigote muestras sin tratamiento

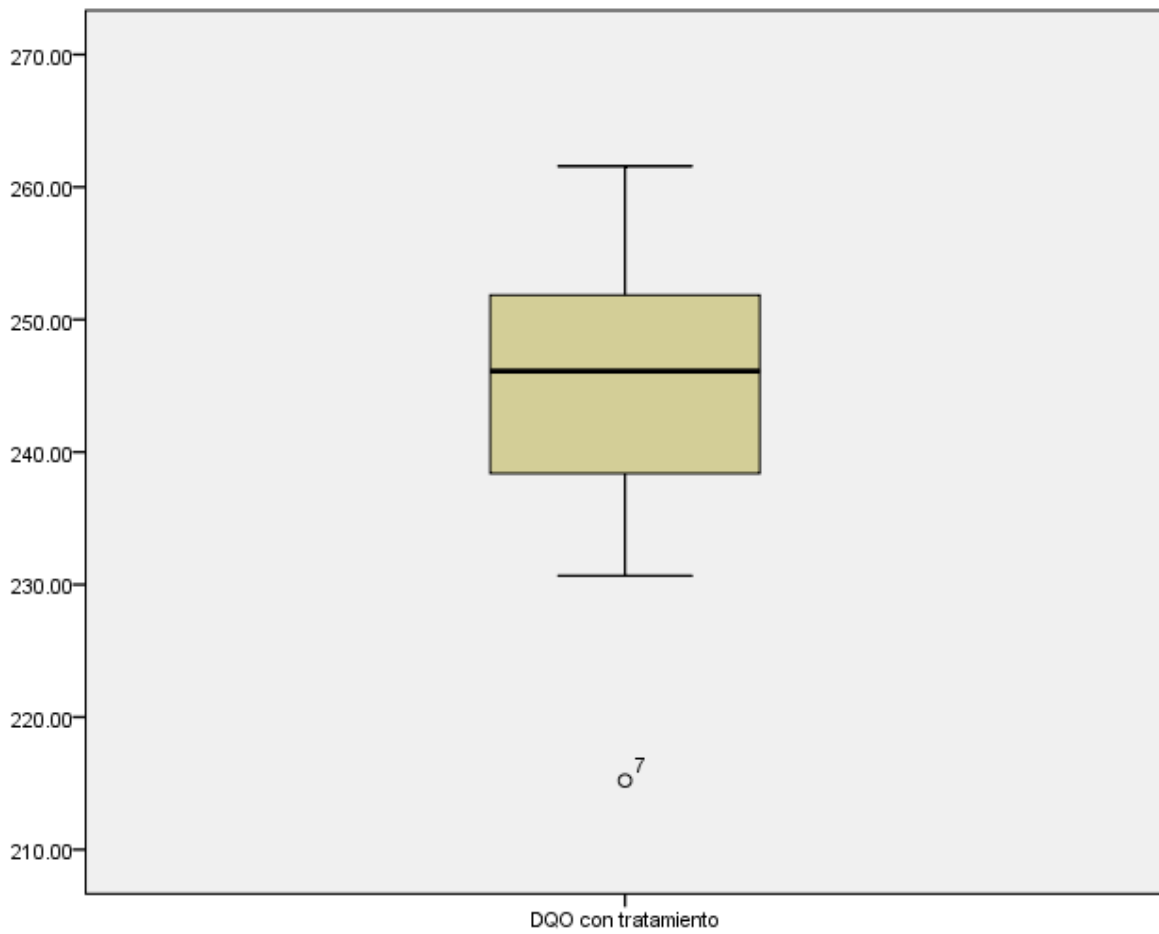
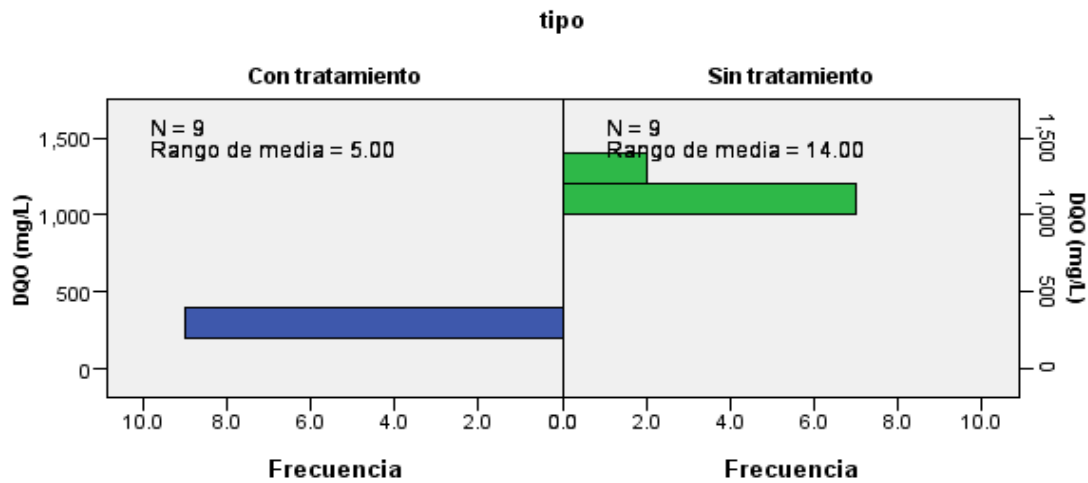


Figura21 Diagrama de caja y bigote muestras con tratamiento

Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes



Resumen de contrastes de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Significancia	Decisión
1	La distribución de DQO (mg/L) es la misma con o sin tratamiento.	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	0.00004114¹	Rechace la hipótesis nula.
El nivel de significancia es 0.05				
¹ Se muestra la significación exacta para esta prueba.				

En la prueba U de Mann Whitney se puede apreciar que para los datos sin tratamiento se encuentran dos grupos diferenciados siendo esta mínima, mientras que para la muestra con tratamiento se aprecia un solo grupo lo que me indica que hay homogeneidad de la muestra.

De acuerdo al valor de significancia menor a 0.05 se tiene evidencia para rechazar la hipótesis nula (H_0), por lo que se concluye que la técnica de electrocoagulación para la remoción de contaminantes en aguas grises es efectiva dado que el sistema elimina más del 70% de la carga orgánica presente.

CONCLUSIONES.

Conforme a la literatura revisada, la remoción de contaminantes en el agua mediante electrocoagulación, es más eficiente en aguas residuales industriales, cómo las de la industria metalúrgica con una gran cantidad de metales pesados, la industria mecánica con altos contenidos de grasa y aceite, la industria alimentaria con altos niveles de DBO y DQO, entre otras. No obstante, puede ser utilizada en el tratamiento de aguas grises con resultados satisfactorios.

En la experimentación realizada se logró remover los contaminantes del agua gris. Como se muestra en la tabla 2, se puede apreciar un cambio de color gris de la muestra sin tratamiento a un agua cristalina sin coloración. También se constató la eliminación del olor después del tratamiento, a pesar de que no se utilizó carbón activado o algún otro tipo de sustancia para la remoción de aromas. Tomando en cuenta estos aspectos, se puede inferir que el sistema de electrocoagulación es conveniente en el tratamiento de aguas grises con baja carga orgánica y el agua tratada puede ser reutilizada (por ejemplo: en el lavado de automóviles, patios y para la descarga del inodoro), siempre y cuando cumpla con los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM 003 SEMARNAT 1997.

Como se mencionó anteriormente el parámetro utilizado para valorar el sistema de electrocoagulación fue la DQO. A la muestra sin tratamiento se le media el valor de DQO y después al pasar las submuestras por el sistema se les volvía a medir la DQO para tener una diferencia, y de esta forma conocer la cantidad de carga orgánica removida por el sistema de electrocoagulación con lo cual se valoró su eficiencia. La carga orgánica removida por el sistema fue de 77.83% evaluada y calculada con los valores de la mediana de DQO de las muestras sin tratamiento (1110.4791 mg/L) y con tratamiento (246.1206 mg/L). Con respecto a la hipótesis estadística se acepta la hipótesis alterna y se puede concluir que con un 95% de confianza el sistema remueve más del 70% (casi 80%) de contaminantes y es eficiente para el tratamiento de aguas grises con baja carga orgánica.

Cabe considerar por otra parte que el uso de tecnologías renovables como es la energía solar en este caso, hace más conveniente el sistema pues aparte de remover los contaminantes del agua y promover su reutilización contribuye con el cuidado del medio ambiente al no emitir compuestos y gases de efecto invernadero producidos por la energía eléctrica.

Por último, cabe mencionar que las variables involucradas en el proceso de electrocoagulación registradas en la tabla 2 (pH, temperatura de la muestra y voltaje), no afectan el resultado del tratamiento de agua gris en los rangos reportados.

ANEXO A

Descripción del equipo

La figura 22 muestra el esquema del sistema de electrocoagulación utilizado en este trabajo, identificando cada una de sus partes.

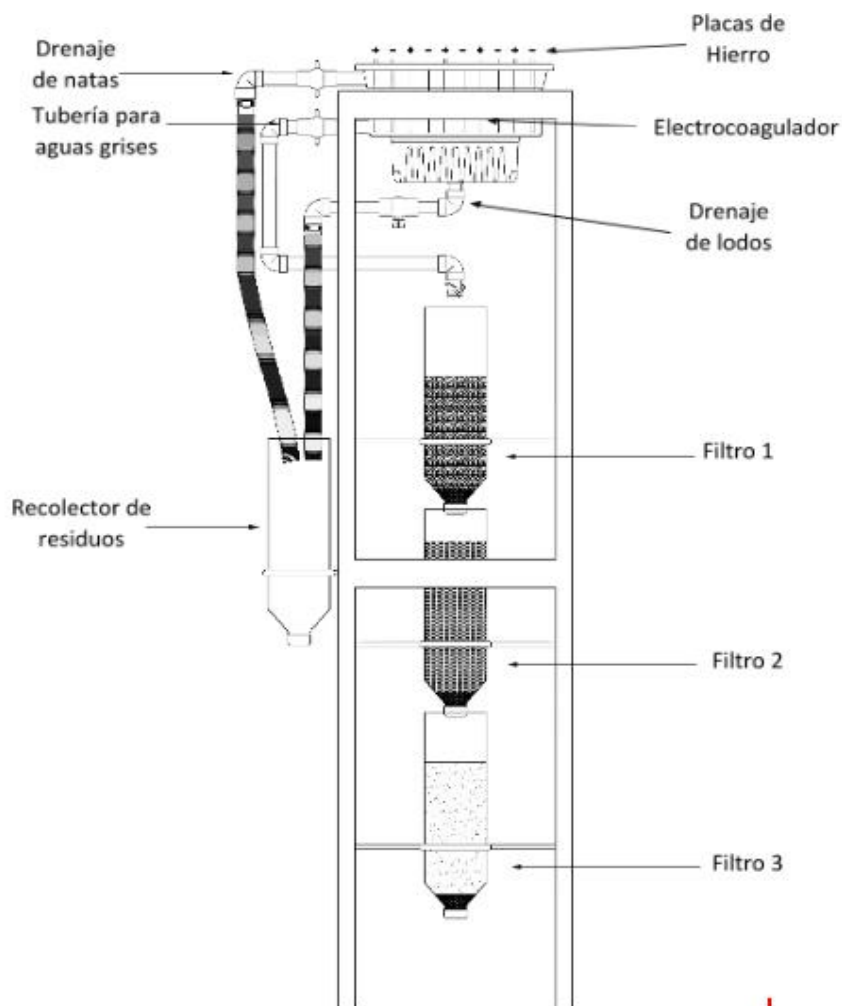


Figura 22 Esquema del sistema de electrocoagulación

La celda de electrocoagulación opera como un reactor tipo batch que opera intermitentemente con una capacidad de 6 L. Se elaboró con dos recipientes rectangulares de plástico transparente para que se pueda apreciar la zona de reacción, la zona de sedimentación y la zona de flotación.



Figura 23 Celda de electrocoagulación

Las dimensiones del primero son 30 cm de largo, 17.5 cm de ancho y 11 cm de alto, en este se instaló una tapa donde se colocaron 10 placas de hierro las cuales funcionan como electrodos. Cada placa mide 10x15 cm y tiene un espesor de 3mm se alinearon con una separación de 2.5 cm entre ellas.

Las placas están conectadas en forma paralela. El segundo recipiente mide 20 cm de largo, 11.5 cm de ancho y 7 cm de alto.



Figura 24 Electrodo de hierro previo al proceso (placa limpia)

Este equipo está conectado a un filtro lento de arena, que consta de tres recipientes de plástico circulares de 8 cm de diámetro y 30 cm de altura. En el primer filtro el lecho de grava mide 22 cm, en el segundo el lecho de arena 24 cm y en el último el lecho de arena fina tiene una altura de 25 cm.



Figura 25 Filtros del sistema

Para energizar el sistema se utilizó una celda solar que proporcione un rango de voltaje entre 11 y 14 V.



Figura 26 Celda solar

Durante la electrocoagulación el volumen de espuma se incrementa, la cual constituye parte de los sólidos que se separan, los otros sólidos precipitan. Cuando finaliza el tiempo prefijado, se abre el circuito, se separa la espuma, se ajusta el pH mediante la adición de H_2SO_4 y se deja sedimentar. El líquido se descarga al filtro. La espuma y los lodos se secan en la estufa a $40^\circ C$ durante 72 h, una vez secos los sólidos se pesan y se envasan se tratan como residuos peligrosos.

Debido a que la fuente de energía es solar las pruebas se pueden realizar durante el mes de enero comenzando a las 12:00 horas y finalizando a las 16:00 horas.

A continuación, se presentan algunas ilustraciones que muestran este proceso.



Figura 27 Zona de reacción:-: medición de pH antes del tratamiento



Figura 28 Electroodos de reacción: formación de espumas durante el proceso de electrocoagulación



Figura 29 Natas formadas durante el proceso de electrocoagulación



Figura 30 Proceso de filtración después del tratamiento por electrocoagulación

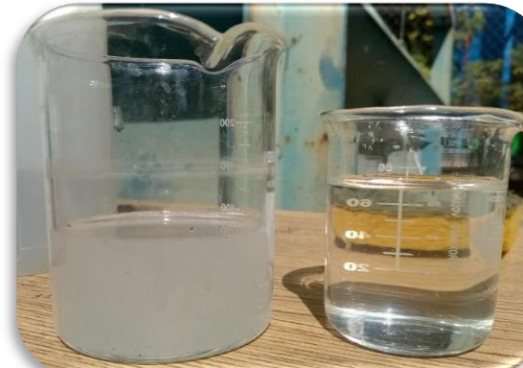


Figura 31 Comparación entre la muestra sin tratamiento (A) y la muestra tratada (B)



Figura 32 Muestras obtenidas después del tratamiento por electrocoagulación - filtración .

ANEXO B

Curva de calibración.

Para determinar la concentración de una muestra problema, de construyen gráficas de curvas de calibración utilizando muestras estándares de concentración conocida. De esta forma al obtener la transmitancia de la muestra problema, su concentración se obtendrá por la interpolación de la transmitancia en la curva de calibración.

Tabla 8 Datos obtenidos para curva de calibración

DQO (mg/L)	Transmitancia
0	91
50	85
70	82
200	77

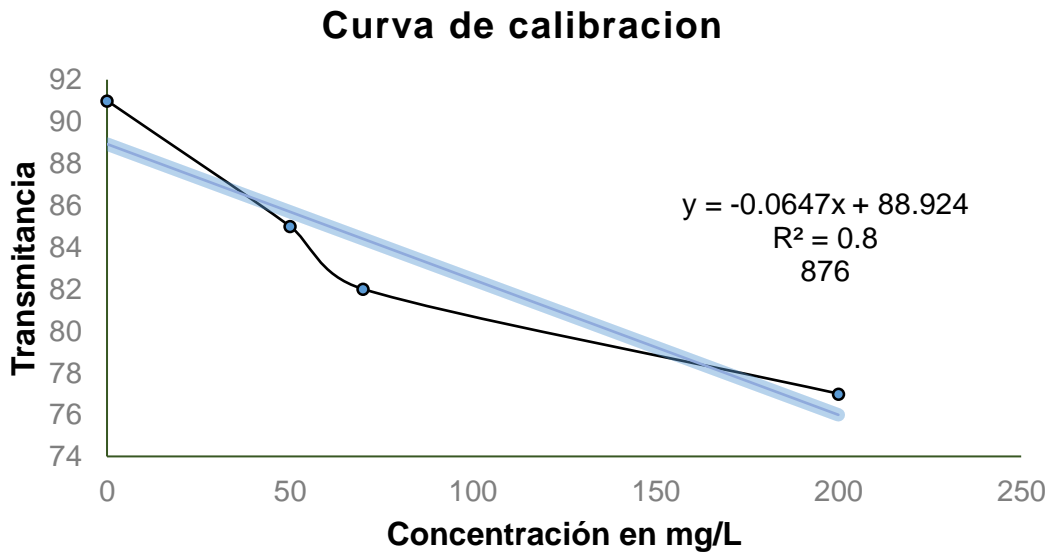


Figura 33 Curva de calibración

Tabla 9 Resultados experimentales de DQO para la muestra sin tratamiento

Volumen muestra (ml)	Transmitancia	DQO (mg/L)
*2	50	1203.2148
*2	54	1079.5672
*2	53	1110.4791
*2	56	1017.7434
*2	46	1326.8624
*2	53	1110.4791
*2	53	1110.4791
*2	52.5	1125.9351
*2	55	1048.6553

Nota 2* dilución 50 en 100

Tabla 10 Resultados experimentales de DQO para la muestra con tratamiento

Volumen muestra (ml)	Transmitancia	DQO (mg/L)
2	73	246.1206
2	73.5	238.3926
2	72	261.5765
2	73.0	246.1206
2	74.0	230.6646
2	73.0	246.1206
2	75.0	215.2087
2	72.5	253.8485
2	72.5	253.8485

ANEXO C

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno que tiene cualquier sustancia, tanto orgánica como inorgánica consume para ser oxidada. Se usa a menudo para medir los contaminantes en las aguas naturales y residuales y para evaluar la carga de desechos tales como aguas residuales, municipales e industriales. Es por tanto una medida representativa de la contaminación orgánica de un efluente siendo un parámetro a controlar dentro de las distintas normativas de vertidos. Se expresa en mg/LO₂. (Chiriboga, 2016).

El método utilizado para la determinación de DQO es por oxidación con dicromato potásico (K₂Cr₂O₇) en medio ácido y a 180° C de temperatura, durante dos horas y en presencia de determinadas sales para evitar interferencias y como catalizadores.

De acuerdo a la NMX-AA-030/2-SCFI-2011 se especifica un método para la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO-TS) usando el método de tubo sellado. La prueba es empírica y aplicable a cualquier muestra acuosa, que incluye todo tipo de agua residual y de desecho industrial.

Demanda Química de Oxígeno (DQO-TS): La concentración de masa de oxígeno es equivalente a la cantidad de dicromato consumida por la materia disuelta y suspendida, cuando una muestra de agua es tratada con este oxidante bajo condiciones definidas.

Las muestras se oxidan mediante digestión con ácido sulfúrico y dicromato de potasio en presencia de sulfato de plata y sulfato de mercurio (II). La plata actúa como catalizador para oxidar la materia orgánica más resistente. El mercurio reduce la interferencia causada por la presencia de iones cloruro.

La cantidad de dicromato utilizada en la oxidación de la muestra se determina midiendo la absorbancia del Cromo (III) formado a una longitud de onda de (600 ± 20) nm para un intervalo hasta de 1 000 mg/L. Las mediciones de la absorbancia se efectúan en el tubo de digestión, que hace las veces de celda, y son convertidas a un valor de DQO-TS.



Figura 34 Muestras en el digestor

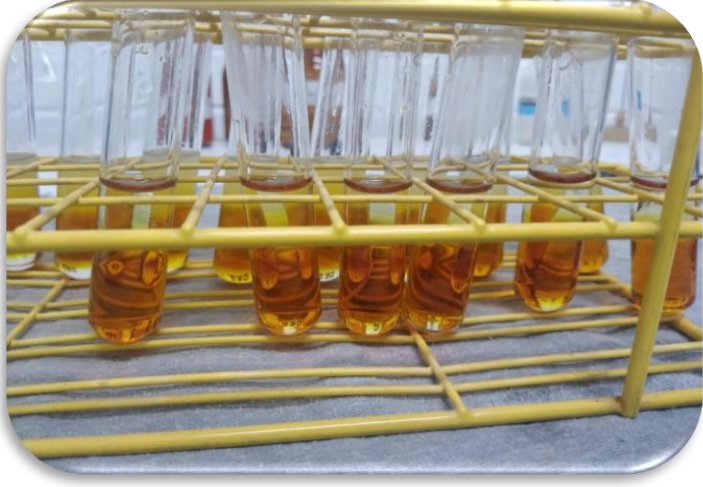


Figura 35 Muestras oxidadas por dicromato de potasio



Figura 36 Enfriamiento de las muestras



Figura 37 Medición de la absorbancia del Cromo (III)

BIBLIOGRAFÍA

Agenda 2030. (11 de Septiembre de 2017). *Objetivo de Desarrollo Sostenible 6: Agua limpia y saneamiento*. R(Gobierno de Mexico , 2019) recuperado el 28 de Agosto de 2019, de Gobierno de México:
<https://www.gob.mx/agenda2030/articulos/6-agua-limpia-y-saneamiento>

Agenda 2030. (14 de Noviembre de 2018). *Estrategia Nacional para la puesta en marcha de la Agenda*. Recuperado el 2019 de Agosto de 2019, de Gobierno de México:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/412433/Estrategia_Nacional_Implementacion_Agenda_2030.pdf

Agenda2030. (28 de Agosto de 2019). *Estrategia Nacional para la puesta en marcha de la Agenda 2030* . Obtenido de Gobierno de México:
<https://www.gob.mx/agenda2030/documentos/estrategia-nacional-para-la-puesta-en-marcha-de-la-agenda-2030?idiom=es>

Aguilar, E. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geografica. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/299324201.pdf>

Agua.org. (30 de Agosto de 2019). www.agua.org.mx. Obtenido de www.agua.org.mx:
https://www.agua.org.mx/wp_content/uploads/filespdf/doc_pdf_8641.pdf

Allen, L. (Abril de 2015). *Manual de Diseño para manejo de aguas grises*. Recuperado el 25 de Agosto de 2019, de Grey Water Action:
<https://greywateraction.org/wp-content/uploads/2014/11/finalGWmanual-esp-5-29-15.pdf>

Ana Julia Garriga Trillo, P. p. (2010). *Introducción al análisis de datos*. Madrid: UNED.

Austin, G. (1998). *Manual de procesos químicos en la Industria*. México: McGraw Hill.

- Bazant, J. (2009). *Hacia un desarrollo urbano sustentable. Problemas y criterios de solución*. México: Limusa.
- Chambi H., Z. (2018). *Concytec*. Recuperado el 03 de Septiembre de 2019, de Concytec:
http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/8347/Chambi_Hancco_Zulma.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chririboga, C. (2016). *Repositorio Dspace*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2019, de Repositorio Dspace:
http://repositorio.ute.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/13917/66145_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Feria, D. J. (2014). Tratamiento de Aguas residuales de origen químico mediante Electrocoagulación. *AVANCES Investigacion en Ingeniería*, 65-69.
- Fernandez, A. (2004). *Surfactantes. Generalidades y materias primas*. Venezuela: Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- Fondo para la comunicación y la educación ambiental. A.C. (03 de abril de 2017). *Agua.org.mx*. Obtenido de Agua.org.mx: <https://agua.org.mx/contaminacion-del-agua/>
- Garduño, L. R. (2016). *Manual de uso, operacion, mantenimiento y construccion. Estacion de Lavado con manejo de aguas grises por Infiltración Superficial*. México: Sarar Transformación, S.C.
- HOLT, P. K. (2004). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *elsevier*, 355-367.
- Kirk, O. (1997). *Enciclopedia de Tecnología Química*. México.
- Maldonado, P. S. (2008). *Estudio de la remoción de los detergentes aniónicos tipo sulfato con carbón activado*. Ecuador, Quito.
- Mollah, M. Y. (2000). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *elsevier*, 29-41.
- Morales, M. G. (2008). *Tendencias de la investigación en Ingeniería Ambiental*. Colombia: Universidad de Medellín.

- Ojeda, e. a. (2012). *Estudio comparativo del uso de electrodos de hierro y aluminio en el proceso de electrocoagulación de la vinaza*. CENIC Ciencias Químicas.
- Organización Mundial de la Salud. (mayo 2009). *Cantidad mínima de agua necesaria para uso doméstico*. Organización Panamericana de la Salud
- Orozco, C. P. (2011). *Contaminación Ambiental. Una visión desde la Química*. España: Ediciones Paraninfo.
- Ortiz, e. a. (2014). *La Ecotecnología en México*. México: Unidad de ecotecnologías del Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la UNAM, Campus Morelia.
- Piña-Soberanis, e. a. (2011). *Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación*. México: Revista Mexicana de Ingeniería Química. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000200010
- Pérez, A. E. (2012). *Revisión bibliográfica del método de electrocoagulación en el tratamiento fisicoquímico de aguas residuales*. México: Tesis de Licenciatura de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Peraza, R. D. (2012). Determinación de la concentración letal media (CL50) de cuatro detergentes domésticos biodegradables en *Laeonereis culveri* (Webster 1879) (Polychaeta: Annelida). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.
- Procuraduría Federal del Consumidor. (03 de Julio de 2018). *Lavar la ropa, fuera o dentro de casa: una decisión que puede deslavar el bolsillo*. Obtenido de Gobierno de Mexico : <https://www.gob.mx/profec/documentos/lavar-la-ropa-fuera-o-dentro-de-casa-una-decision-que-puede-deslavar-el-bolsillo?state=published>
- Rocha, N. C. (2010). Abre tu lavandería. *Entrepreneur*.
- Romero, J. (2002). *Purificación del agua*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Ruiz, Á. A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 49-56.
- Sainz, S. J. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. España: Fundación EOI.
- UNESCO WWAP. (13 de enero de 2009). *World Water Assessment Programme*. Obtenido de unesco.org: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/wwdr3-2009>
- Yepes, C. (2018). *Universidad Militar Nueva Granada*. Recuperado el 16 de Agosto de 2019, de Universidad Militar Nueva Granada: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/20647/YepesPolaniaCarlaYepes2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y>