

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

ESCUELA DE POSGRADO

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA**



**“REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL DE
CONSERVACIÓN DE LA ACEITUNA MEDIANTE
ELECTROCOAGULACIÓN COMPLEMENTADO CON RADIACIÓN
ULTRAVIOLETA”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

ROXANA LESLIE AVILES LOZANO

ANDY JOEL PORTILLA SUAREZ

Callao, 2021

PERÚ

Three handwritten signatures in black ink are stacked vertically on the right side of the page. The top signature is a stylized 'A', the middle one is 'Roxana', and the bottom one is 'Andy Joel'.

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

La presente tesis fue sustentada por la señora bachiller AVILÉS LOZANO ROXANA LESLIE y el señor bachiller PORTILLA SUÁREZ ANDY JOEL ante el JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

Dr. Carrasco Venegas Luis Américo PRESIDENTE

Dr. Rodríguez Taranco Oscar Juan SECRETARIO

Mg. Díaz Bravo Pablo Belizario VOCAL

Mg. Ángeles Queirolo Carlos Ernesto VOCAL

Mg. Montero Arteaga Wimpper Daniel ASESOR

Tal como está asentado en el Acta N° 019, de fecha 19 de diciembre del año 2021, para obtener el Grado Académico de Maestro en Ingeniería Química de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado con Resolución de Consejo Universitario N° 245-2018-CU de fecha 30 de octubre de 2018

DEDICATORIA:

Con profundo respeto y cariño a todas las personas con habilidades especiales, Dios compensa sus limitaciones con dones y capacidades sorprendentes. A mi Simonetta y Lucciano, son ustedes unos hijos ejemplares.

“Roxana L. Aviles Lozano”

Con todo mi amor para Fabrizio, la razón de mi esfuerzo y el motivo para seguir creciendo.

“Andy J. Portilla Suárez”

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, dar gracias a Dios, que con su inmenso amor permite que estemos con vida, en estas circunstancias de pandemia, para lograr nuestras metas y una de ellas es la presente tesis. Agradecemos a los docentes de la maestría en ingeniería Química de la UNAC, por su excelente nivel académico; a nuestros colegas, y amigos que siempre nos apoyaron y alentaron.

ÍNDICE

ÍNDICE	1
TABLAS DE CONTENIDO	4
RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	11
1.2. Formulación del problema.....	12
1.2.1 Problema general	12
1.2.2 Problemas específicos.....	12
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general	12
1.3.2. Objetivos específicos.....	12
1.4 Limitantes de la investigación	13
1.4.1 Teórica.....	13
1.4.2 Temporal	13
1.4.3 Espacial.....	13
II. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Antecedentes	14
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	14
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	17
2.2. Bases Teóricas.....	19
2.2.1 El agua	19
2.2.2 Aguas residuales.....	26
2.2.3 Carga orgánica.	30
2.2.4 Límites máximos admisibles (LMA/LMP).....	30

2.2.5 Electrocoagulación	31
2.2.6. Radiación ultravioleta (UV):	31
2.2.7 Contenido Físico Químico de la Aceituna	32
2.3. Conceptual	34
2.3.1 Caracterización del agua residual de almacenamiento de aceitunas para venta al público	34
2.3.2 Demanda química de oxígeno (DQO)	36
2.3.3 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5).....	36
2.3.4 Proceso de la electrocoagulación.....	37
2.4 Definición de términos básicos.....	47
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	51
3.1 Hipótesis	51
3.1.1 Hipótesis general.....	51
3.1.2 Hipótesis específicas	51
3.2 Definición conceptual de variables	51
3.2.1. Operacionalización de variables	52
IV. METODOLOGÍA	57
4.1. Tipo y diseño de investigación	57
4.2. Método de investigación.....	57
4.3. Población y muestra.....	59
4.4. Lugares de estudio y periodo desarrollado.....	59
4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de la información	60
4.6. Análisis y procesamiento de datos.....	61
V. RESULTADOS	65
5.1 Resultados descriptivos.	65
5.2. Resultados inferenciales.	78
5.3. Otro tipo de resultados de acuerdo a la naturaleza del problema y la Hipótesis.....	82

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	84
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.	84
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	85
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes.....	86
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
ANEXOS	92

TABLAS DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de Aguas según su Dureza	24
Tabla 2: Límites Máximos Permisibles para los Efluentes de PTAR	31
Tabla 3: Oferta Exportable de las Aceitunas Peruanas	35
Tabla 4: Operacionalización de Variables	52
Tabla 5: Diseño de Experimentos	57
Tabla 6: Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	61
Tabla 7: Diseño Factorial de Múltiples Niveles.....	62
Tabla 8: Tabla de Diseño	62
Tabla 9: Análisis de Varianza.....	63
Tabla 10: Resumen del modelo	63
Tabla 11: Coeficientes codificados.....	63
Tabla 12: Resultados a 4V, 2 cm de distancia y 120 min de electrocoagulación ..	65
Tabla 13: Resultados a 4V, 4 cm de distancia y 120 min de electrocoagulación ..	65
Tabla 14: Resultados a 6V, 2 cm de distancia y 120 min de electrocoagulación ..	66
Tabla 15: Resultados a 6V, 4 cm de distancia y 120 min de electrocoagulación ..	66
Tabla 16: Resultados a 8V, 2 cm de distancia y 120 min de electrocoagulación ..	67
Tabla 17: Resultados a 8V, 4 cm de distancia y 120 min de electrocoagulación: ..	67
Tabla 18: Resultados a 4V, 2 cm de distancia y 180 min de electrocoagulación ..	68
Tabla 19: Resultados a 4V, 4 cm de distancia y 180 min de electrocoagulación ..	68
Tabla 20: Resultados a 6V, 2 cm de distancia y 180 min de electrocoagulación ..	69
Tabla 21: Resultados a 6V, 4 cm de distancia y 180 min de electrocoagulación ..	69

Tabla 22: Resultados a 8V, 2 cm de distancia y 180 min de electrocoagulación ..	70
Tabla 23: Resultados a 8V, 4 cm de distancia y 180 min de electrocoagulación ..	70
Tabla 24: % de remoción por experimento respecto a la DQO	71
Tabla 25: Porcentaje de remoción de turbidez por experimento	73
Tabla 26: Consumo de electrodos por experimento	76
Tabla 27: Valores de pH según los experimentos	77
Tabla 28: Parámetros del agua de conservación de aceituna, valores de entrada	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Drenaje de Aguas Residuales Procedentes del Alcantarillado.....	27
Figura 2: Abastecimiento de Aceitunas en el Mercado de La Parada	36
Figura 3: Reactores con Electrodo Monopolares.....	42
Figura 4: Reactor Tipo Filtro Prensa	43
Figura 5: Reactor de Electrodo Cilíndrico Rotativo.....	44
Figura 6: Reactor de Lecho Fluidizado.....	44
Figura 7: Turbidez de Aguas de Aceituna	49
Figura 8: Secuencia del Método de Investigación	58
Figura 9: Equipo de Electrocoagulación Combinado con Radiación Ultravioleta .	59
Figura 10: % de remoción por experimento respecto a la DQO	72
Figura 11: Porcentaje de remoción de carga orgánica por experimento	73
Figura 12: Comportamiento de la remoción de la turbidez NTU, con respecto al tiempo	74
Figura 13: Porcentaje de remoción de turbidez por experimento	75
Figura 14: Consumo del ánodo por experimento	77
Figura 15: Variación del pH por experimento	78
Figura 16: Análisis de Diseño factorial (DQO-% Remoción) al 95% de confianza	79
Figura 17: Efecto de los parámetros en el % Remoción DQO	80
Figura 18: Interacción de parámetros para DQO	81
Figura 19: Efecto de los parámetros en el % Remoción NTU	82

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se estudió la capacidad de remoción de la carga orgánica expresada como DQO y turbidez de las aguas residuales de conservación de la aceituna, utilizando un sistema de electrocoagulación (EC) complementado con radiación ultravioleta (UV).

El proceso de electrocoagulación se trabajó en una celda electroquímica con capacidad de 2L, utilizando electrodos de aluminio (ánodo) y acero (cátodo), haciendo recircular la muestra pasando por una fuente de radiación UV a flujo constante de 1L/min. Se caracterizaron los valores del agua residual de conservación de la aceituna, encontrando valores iniciales de DQO de 75 179,3 (mg O₂/L), DBO 35 325,0 (mg BOD₅/L), turbidez de 45 NTU y conductividad de 79 700 μ S/cm; el estudio estuvo constituido por 12 experimentos, considerando los parámetros: voltaje (03 niveles), tiempo (02 niveles) y distancia (02 niveles), encontrándose los valores máximos de remoción de la carga orgánica.

Los resultados obtenidos indican que la máxima remoción de la DQO y turbidez son de 65.94% y 95.38% respectivamente, operando el equipo a un tiempo de recirculación de 180 minutos con 8 voltios y 2 cm de distancia entre electrodos. La solución tratada al final alcanzó un pH 8.5.

Adicionalmente se determinó el consumo de los electrodos, registrando un menor consumo a 120 minutos, con 4 Voltios y 4 cm de distancia entre electrodos, el pH en todos los experimentos aumenta a valores de 7.5 a 8.5.

El uso del método de EC combinado con UV es adecuado para la remoción de carga orgánica de este tipo de aguas residuales; pero se sugiere realizar un tratamiento previo con la finalidad de reducir la conductividad.

Palabras Clave: *Electrocoagulación complementado con Radiación UV, remoción de carga orgánica, Agua residual de conservación de aceituna.*

RESUMO

No presente trabalho de investigação, estudou-se a capacidade de remoção da carga orgânica expressa em DQO e a turbidez das águas residuais de conservação de azeitonas, utilizando um sistema de eletrocoagulação (EC) suplementado com radiação ultravioleta (UV).

O processo de eletrocoagulação foi realizado em uma célula eletroquímica com capacidade de 2L, utilizando eletrodos de alumínio (ânodo) e aço (catodo), recirculando a amostra passando por uma fonte de radiação UV a um fluxo constante de 1L/min. Os valores da água residual para conservação da azeitona foram caracterizados, encontrando valores iniciais de DQO de 75 179,3 (mg O₂/L), DBO 35 325,0 (mg DBO₅/L), turbidez de 45 NTU e condutividade de 79 700µS/cm; o estudo consistiu em 12 experimentos, considerando os parâmetros: tensão (03 níveis), tempo (02 níveis) e distância (02 níveis), encontrando os valores máximos de remoção de carga orgânica.

Os resultados obtidos indicam que a remoção máxima de DQO e turbidez são 65,94% e 95,38%, respectivamente, operando o equipamento em um tempo de recirculação de 180 minutos com 8 volts e distância de 2 cm entre eletrodos. A solução final tratada atingiu um pH de 8,5.

Adicionalmente, foi determinado o consumo dos eletrodos, registrando um consumo menor aos 120 minutos, com 4 Volts e 4 cm de distância entre eletrodos, o pH em todos os experimentos aumenta para valores de 7,5 a 8,5.

O uso do método EC combinado com UV é adequado para a remoção de carga orgânica deste tipo de efluente; mas sugere-se realizar um tratamento prévio para reduzir a condutividade.

Palavras-chave: Eletrocoagulação suplementada com radiação UV, remoção de carga orgânica, água residual da conservação da azeitona.

INTRODUCCIÓN

La industria de la aceituna produce cantidades considerables de aguas residuales tanto durante su procesamiento como en la etapa final para su expendio a los consumidores, estas aguas contienen altos niveles de sustancias orgánicas e inorgánicas, son de color marrón oscuro y tienen un olor parecido al del aceite de oliva, la composición fisicoquímica difiere según el método de procesamiento y la variedad de aceitunas. Los procesos avanzados de oxidación y los tratamientos combinados electroquímicos y biológicos han sido propuestos para los tratamientos de aguas residuales de procesamiento de aceitunas (Benekos et al., 2019).

Sin embargo, respecto al tratamiento del agua residual de conservación de las aceitunas para su expendio no hay información, y este es un caso especial que se presenta en los mercados en el Perú, donde se estila la venta a granel de aceitunas y el agua residual de las botijas de almacenamiento se eliminan directamente a la alcantarilla (Niazmand et al., 2019).

La electrocoagulación, es una técnica que se utiliza para el tratamiento de aguas residuales, agua procesada industrialmente y tratamiento médico, es una tecnología basada en mecanismos complejos para la reducción de contaminantes en aguas, en el proceso se establece una corriente continua cuando los electrodos metálicos se sumergen en la solución (Kuokkanen et al., 2013).

La electrocoagulación (EC), es una alternativa para poder resolver el problema de carga orgánica presente en el agua de conservación de la aceituna que se expenden en mercados, este tratamiento consiste en pasar agua a través de electrodos metálicos, generalmente aluminio o hierro. Cuando se conecta a una fuente de energía externa, la generación de cationes metálicos tiene lugar en el ánodo, mientras que los aniones hidroxilo y el gas hidrogeno se liberan del cátodo; estos aniones y cationes interactúan y se combinan para formar óxidos e hidróxidos metálicos que funcionan como coagulantes en el proceso de EC. Las reacciones anódicas también pueden ocurrir durante la EC, lo que lleva a la formación de

oxidantes fuertes como el cloro nativo y libre y el hipoclorito. Aunque la EC es una tecnología común en el tratamiento de aguas residuales, aún hay pocas investigaciones (Bocos et al., 2016).

El objetivo principal de este trabajo de investigación consiste en evaluar el porcentaje de remoción de carga orgánica de las aguas residuales de conservación de la aceituna mediante electrocoagulación complementada con radiación ultravioleta, utilizando electrodos de aluminio y bajo diferentes condiciones experimentales a escala de laboratorio.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

Los efluentes de los mercados del Perú contienen diversos contaminantes que son vertidos directamente en el alcantarillado, entre ellos se encuentran las aguas residuales provenientes de la conservación de la aceituna, debido a que existe en el país la costumbre de vender aceitunas a granel, tal es el caso del mercado mayorista de “La Parada”, ubicado en el distrito La Victoria, región Lima, el cual es el principal distribuidor de aceitunas provenientes del sur del país, que distribuye semanalmente entre 20 a 30 toneladas de aceituna a granel, generando volúmenes de agua residual de conservación entre 5 a 10m³ (informe de los comerciantes de la parada), similar situación se presenta en los grandes mercados mayoristas a nivel Lima e interior del país.

Estas aguas vertidas directamente a la alcantarilla y que luego terminan en el mar, contribuyen a la generación de condiciones eutróficas con la consecuente alteración de la biomasa acuática, reducción de la biodiversidad, así como efectos crónicos y agudos en determinadas etapa del desarrollo de las especies acuáticas debido al alto contenido de materia orgánica poco biodegradable, así como un elevado porcentaje de sólidos en suspensión y grasas, una elevada demanda química de oxígeno, pH ácido, elevada conductividad, debido a su alto contenido salino; además se trata de aguas fuertemente coloreadas por los polifenoles que forman parte de la composición de los frutos (Condorchem Envitech, 2021).

Una solución para remediar este problema es utilizar tecnología amigable ambientalmente como la electrocoagulación complementada con radiación ultra violeta, la cual es de poca o nula aplicación en el país; esta tecnología tiene como ventaja no usar coagulantes como el sulfato de aluminio, ni polímeros sintéticos, los cuales encarecen los costos del tratamiento haciéndolos no sostenibles. En este sentido la presente investigación pretende utilizar la electrocoagulación utilizando ánodos de aluminio, complementada con radiación ultravioleta, como

una tecnología de tratamiento de agua residual proveniente de la conservación de las aceitunas que son expandidas a granel al público en los mercados, buscando reducir los impactos ambientales obteniendo una mejor calidad de agua para ser vertida en la alcantarilla y así cumplir la normativa ambiental vigente o para ser reutilizada.

1.2. Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿En qué medida el método de EC complementado con la radiación UV, logra una mayor remoción de la carga orgánica presente en aguas residuales del proceso de conservación de la aceituna?

1.2.2 Problemas específicos

- 1) ¿De qué manera influye el contenido de la carga orgánica en los valores, DQO y la turbidez en las aguas residuales de la conservación de la aceituna??
- 2) ¿Cuáles son los parámetros más adecuados de operación del equipo de electrocoagulación que permita el máximo porcentaje de remoción de la carga orgánica?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la remoción de carga orgánica presente en las aguas residuales de conservación de la aceituna mediante electrocoagulación complementado con radiación UV

1.3.2. Objetivos específicos

- 1) Determinar las características físicas químicas en el agua residual de conservación de la aceituna.

- 2) Establecer parámetros adecuados de operación del equipo de electrocoagulación que permita el mayor porcentaje de remoción de carga orgánica.

1.4 Limitantes de la investigación

1.4.1 Teórica

El agua residual de almacenamiento donde reposan las aceitunas, que se expenden al público en general, tiene alto contenido de carga orgánica, lo que le confiere características fisicoquímicas como turbidez, DQO, DBO y pH por encima de los valores permisibles máximos. Existen artículos académicos como el de Benekos et al., 2019 donde demuestran que un sistema combinado de electrocoagulación con radiación ultravioleta en determinados parámetros, logran una mayor remoción de la carga orgánica de esta agua residual.

1.4.2 Temporal

La presente investigación se desarrolló en forma progresiva porque inicialmente se caracterizó y se determinó los mejores parámetros para la electrocoagulación con radiación ultravioleta, por lo que es de tipo longitudinal.

1.4.3 Espacial

La investigación tiene carácter tecnológico sustantivo y experimental, propone alternativas de solución tecnológica en el tratamiento de aguas residuales de la conservación de la aceituna que contiene elevada carga orgánica.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes internacionales

Sameh et al., (2020) en su trabajo de investigación, “Tratamiento eficiente y sostenible de aguas residuales de curtiembre, mediante un proceso fotolítico secuencial de electrocoagulación-UV”, realizaron el tratamiento de aguas residuales provenientes de cueros curtidos en Túnez, las cuales contenían altos niveles de demanda química de oxígeno (DQO). Analizó la reducción de DQO, mediante el uso por separado de la electrocoagulación (CE), la fotólisis UV y ambos métodos operando como un solo sistema.

Demostró que la combinación de ambos métodos es eficaz en la reducción de DQO, reduciendo un 94,1% de DQO, mientras que los tratamientos de Electrocoagulación y Radiación Ultravioleta, por separado produjeron respectivamente 85,7 y 55,9%.

Niazmand et al., (2019) realizaron una investigación de electrocoagulación, tomando muestras de agua de aceituna de la planta de Mahrad Chashni Co. Mashhad, Irán. Los procedimientos combinados de electrocoagulación y de filtración en el tratamiento de efluentes de desamargado de aceituna muestran como resultado que el Aluminio es el electrodo más útil en la reducción de DQO, TDS y turbidez. Así mismo encontraron que la eficiencia del método estaba muy influenciada por el pH inicial, la densidad de corriente y tiempo de electrolisis. El pH natural fue apropiado para realizar un tratamiento, no necesitaron productos químicos para el acondicionamiento de la muestra y el procedimiento logró una reducción rápida (en 60 min) y eficaz de los contaminantes DBO (78.51%), TPC (90.44%) y reducción de la turbidez (97.93%) a una densidad de corriente de 15.0 mA.cm⁻².

Benekos et al., (2019) realizaron experimentos usando la electrocoagulación (EC) como un método alternativo y rentable para el tratamiento o postratamiento de las aguas residuales del procesamiento de aceitunas de mesa (ARPA). Usaron reactores de laboratorio y a escala piloto utilizando electrodos de aluminio y hierro. Probaron diferentes concentraciones iniciales de demanda química de oxígeno (DQO) (3000, 5000 y 9000 mg L⁻¹) y densidades de corriente (41,7, 83,3 y 166,7 mA cm⁻²) en experimentos a escala de laboratorio para determinar la DQO máxima y la eliminación del color de ARPA no tratados. También se realizaron experimentos a escala piloto utilizando ARPA pretratado biológicamente (DQO 1000 mg L⁻¹ con densidades de corriente de 3,87 y 5,65 mA cm⁻²) para garantizar un proceso de postratamiento eficaz. Descubrieron que los electrodos de aluminio a diferencia de los de hierro, son más eficientes para reducir la DQO y el color, tanto en experimentos de laboratorio como a escala piloto. En experimentos a escala de laboratorio, registraron la máxima reducción de la DQO y la eliminación de color (aproximadamente 50% y 100%, respectivamente) para la concentración inicial más baja de DQO de 3000 mg L⁻¹ a 166,7 mA cm⁻². En experimentos a escala piloto, la reducción de la DQO máxima y la remoción de color observadas fueron 42,5% y 85,3%, respectivamente, con una densidad de corriente de 5,65 mA*cm⁻². Por otro lado registraron un menor consumo de energía y electrodos al trabajar con electrodos de aluminio y obtuvieron resultados óptimos con los valores de DQO inicial y densidad de corriente más bajos.

Cotillas et al., (2014) lograron la recuperación de aguas residuales urbanas tratadas mediante la aplicación de irradiación UV a un proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio (fotoelectrocoagulación). Los resultados muestran que es posible realizar la eliminación simultánea del contenido microbiológico y la turbidez en las aguas residuales mediante la aplicación de bajas densidades de corriente.

Durante el proceso de fotoelectrocoagulación, señalan que se forman especies coagulantes por la electrodisolución del aluminio que actúa como ánodo, lo cual provoca la eliminación de la turbidez en las aguas residuales. Señalan que la naturaleza de dichas especies coagulantes depende principalmente del pH y la concentración de metal en la disolución, Bajo las condiciones señaladas los autores muestran que el pH se mantuvo constante en torno a 8, valor que favorece la formación de hidróxidos de aluminio insolubles y en consecuencia la floculación de barrido como principal mecanismo de coagulación.

Por otro lado, durante el proceso también han observado la presencia de especies desinfectantes en las aguas residuales, específicamente desinfectantes como cloro libre y en forma combinada. Esta situación ocurre debido a que las aguas residuales urbanas presentan una importante concentración de cloruros en su composición y estas especies son susceptibles de oxidarse en la superficie del ánodo favoreciendo la generación de hipoclorito; este hipoclorito electrogenerado, además puede reaccionar con el amonio que se encuentra presente en las aguas residuales para formar cloraminas. Ambas especies (hipoclorito y cloraminas) tienen una gran capacidad desinfectante siendo las principales responsables de la eliminación de E. coli.

Finalmente, los autores señalan que la aplicación de radiación UV durante el proceso favorece la eliminación de microorganismos debido a la interacción de la luz sobre la membrana celular de E. coli; por otro lado, la aplicación de luz ultravioleta durante la electrocoagulación promueve la formación de radicales libres de las especies oxidantes previamente formadas, reforzando la capacidad desinfectante. Como resultado del proceso los autores señalan que los radicales no solo aumentan el rendimiento del proceso en términos de eliminación de E. coli, sino que también favorecen la disolución química del

electrodo de sacrificio (ánodo) y, por lo tanto, hay un aumento en el rendimiento de eliminación de turbidez.

Arango, (2016) hace una revisión de la electrocoagulación, presentando su evolución histórica, su potencial de aplicación en el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales, sus ventajas y desventajas. Realiza una discusión de los retos y oportunidades de esta tecnología. Finalmente, plantea los mecanismos de reacción, el diseño y operación de los reactores. Desde esta perspectiva, la electrocoagulación se vislumbra como 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.

2.1.2 Antecedentes nacionales.

Aquino, (2021) estudió la capacidad de remoción de la carga orgánica del efluente de la planta piloto de leche - UNALM, mediante la aplicación de un sistema combinado de electrocoagulación y filtro biológico. Para el proceso de electrocoagulación trabajó en régimen batch con un volumen de 4L de muestra compuesta de lactosuero y efluente lácteo en una relación de 1:6 respectivamente; evaluó la influencia del pH, tiempo de reacción y densidad de corriente, determinando los valores óptimos para obtener la mayor eficiencia de remoción de la carga orgánica expresados como porcentajes de remoción de DQO y turbidez, para lo cual monitoreó los factores señalados en cada ensayo. Posteriormente construyó un filtro biológico implementado con microorganismos nativos del efluente lácteo, el filtro fue alimentado con el efluente tratado por electrocoagulación en condiciones óptimas. La etapa de electrocoagulación la realizó con electrodos de aluminio y hierro, determinando que la mayor remoción de DQO del efluente lácteo se produjo a pH 6.8, densidad de corriente de 44.39 A/m² y tiempo de reacción de 45 minutos. Respecto a la parte microbiológica, aisló e identificó los microorganismos presentes en el efluente de la planta piloto de leche-UNALM,

siendo éstas cepas bacterianas correspondientes a *Bacillus* spp, *Acinetobacter* spp, *Lactobacillus* spp y *Streptococcus* spp.

El autor concluye que el sistema combinado de electrocoagulación - filtro biológico con recirculación logró una eficiencia de remoción para la DQO del 89,7 % y para la DBO5 del 89,8 %, presentando un pH final de 7,37.

Apaza, (2019) En su investigación sobre la “Eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de materia orgánica de las aguas del río Torococha” Estudió la eficiencia del sistema de electrocoagulación en la remoción de la materia orgánica de las aguas del río Torococha cuyas soportan una fuerte contaminación con aguas residuales domésticas, lo que eleva su concentración en cuanto a materia orgánica. Se empleó el sistema de electrocoagulación en régimen batch para la remoción de dicha carga, trabajó con electrodos de aluminio y hierro, con un volumen de 4 L de muestra. Los resultados fueron expresados en porcentajes de remoción de turbidez, además en cada ensayo se monitoreo el valor de pH, temperatura, conductividad eléctrica, TDS y salinidad.

Los resultados obtenidos muestran que la mejor combinación para tratar las aguas del río Torococha fue a densidad de corriente de 58.25 A/m^2 y tiempo de tratamiento de 30 minutos, obteniéndose una remoción de turbidez máxima de 98.58 %. El río Torococha actualmente soporta una fuerte contaminación principalmente con aguas residuales domesticas; la electrocoagulación podría ser una alternativa de tratamiento a dichas aguas.

Ramirez, (2019) En su tesis “Remoción de materia orgánica de aguas residuales de la industria láctea por el método de electrocoagulación, utilizando energía eólica” utilizó volumen de agua residual de la industria láctea “Guevara S.R.L.” tratada de 1,8 L, para ello se empleó electrodos de aluminio (ánodo) y fierro (cátodo) con una separación de 1 cm y un área superficial de contacto entre los electrodos y la muestra de $0,08253 \text{ m}^2$. determinó un tiempo de tratamiento óptimo de 25 minutos, con una densidad

de corriente de 84,81 A/m², obteniendo a estas condiciones los mejores porcentajes de remoción los cual fueron: 97,48% de DBO5, 97,81% de DQO y 99,11% de aceites y grasas.

Aguilar, (2015) En este estudio el autor planteó construir un reactor de electrocoagulación para evaluar la eficiencia en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) de aguas residuales provenientes de la industria de pintura; así como determinar las mejores condiciones de intensidad de corriente y tiempo de tratamiento. En base a los resultados obtenidos al realizar el tratamiento del efluente con electrocoagulación determinó una eficiencia promedio del 87 % en la remoción de la DQO. Estos valores óptimos de operación se obtuvieron con una intensidad de corriente $I = 5$ amperios, con el pH natural del efluente de 7,12 y un tiempo de tratamiento de 15 minutos, con lo cual se cumple la normativa ambiental vigente en el país. Otro aspecto importante observado en este estudio fue la calidad del lodo producido en el tratamiento, de aspecto mucho más compacto que un lodo físico químico o biológico.

Gamero, (2011) utilizó ánodos de aluminio en el proceso de electrocoagulación para la remoción de microorganismos patógenos de las aguas de ríos y lagunas, para la optimización del proceso estudio los factores de pH, concentración de aluminio, densidad de corriente y tiempo de electrólisis. La eficiencia de la remoción de microorganismos patógenos fue evaluada utilizando cultivos de 3 tipos de bacterias (i) Escherichia coli; (ii) Pseudomona aureginosa y (iii) Staphylococcus aureus, obteniendo la relación Aluminio-Bacteria para futuros trabajos de investigación.

2.2. Bases Teóricas.

2.2.1 El agua

Es el cuerpo formado por la combinación de un volumen de oxígeno y dos de hidrógeno, líquido inodoro e insípido; en pequeña cantidad incoloro y

verdoso en grandes masas, que refracta la luz, disuelve muchas sustancias, se solidifica por el frío, se evapora por el calor y, más o menos puro, forma la lluvia, las fuentes, los ríos y los mares. El agua existe en nuestro mundo en tres formas, sólido, líquido y gaseoso. Un elemento tan importante para la vida merece un nombre para cada presentación: el sólido es el "hielo"; el líquido es "agua", así, nada más; y el gas es "vapor", aunque las tres formas son químicamente la misma cosa (Guerrero, 1991).

Propiedades del agua

El agua natural es una solución de diversos compuestos que se van adhiriendo al agua de acuerdo a los procesos del ciclo hidrológico y que le dan un carácter diferente a las aguas naturales de acuerdo a la composición de los suelos, a su ubicación y a los procesos físicos y químicos que se realizan durante su paso. El agua posee entonces unas características variables que la hacen diferentes de acuerdo al sitio y al proceso de donde provenga, estas características se pueden medir y clasificar de acuerdo a:

Características físicas

Se pueden medir en una muestra de agua los siguientes parámetros físicos: turbiedad, color, temperatura, sólidos y la conductividad específica.

Turbiedad

Se aplica a las aguas que tienen materia suspendida y coloidal que interfiere con el paso de la luz a través del agua. Es una medida de la reducción de la intensidad de la luz que pasa a través del agua. El tamaño de la partícula incide en la turbiedad, por la dificultad para sedimentar que presentan las partículas muy pequeñas especialmente los coloides.

Color

Es en importancia, el segundo parámetro físico-químico del agua, y aunque está ligado a la turbiedad puede presentarse como una característica independiente.

Color verdadero o color real: es debido a sustancias en solución. Se mide después de retirar la turbiedad por centrifugación, o sea después de retirar las sustancias suspendidas.

Color aparente: incluye la turbiedad, o sea que se mide el color debido a sustancias en solución y en suspensión.

Temperatura

Una corriente puede cambiar su temperatura por efectos climáticos naturales o por la introducción de desechos industriales. Es importante porque actúa sobre procesos como la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos la formación de depósitos, y por los cambios de viscosidad en los procesos de tratamiento, como desinfección por cloro, filtración, floculación, sedimentación y ablandamiento.

Sólidos

Como materia sólida se clasifica toda la materia, excepto el agua, contenida en los materiales líquidos es necesario medir la cantidad de materia sólida contenida en una gran cantidad de sustancias líquidas y semilíquidas que van desde aguas potables hasta aguas residuales, residuos industriales y lodos producidos en los procesos de tratamiento.

- Sólidos totales: los que permanecen como residuo después de haber secado a 103° C. Incluye el material disuelto y el suspendido.

$$ST = SS + SD$$

- Sólidos suspendidos: residuo no filtrable o material no disuelto.

- Sólidos disueltos: son el residuo filtrable.

- Sólidos volátiles: es lo que se pierde después de una calcinación a 600°C. Se interpretan en términos de materia orgánica.

- Sólidos fijos: Es el residuo después de la calcinación representan la materia inorgánica presente en la muestra estudiada.

Conductividad específica

La conductividad específica del agua es la medida de la habilidad para transportar una corriente eléctrica, varía con el tipo y cantidad de iones que contenga. Depende de la temperatura. Una solución 0.01 N de KCl tiene una conductividad específica de 1411.8 microohm/cm a 25°C. Es una medida de los sólidos disueltos contenidos en el agua, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad, y por ello el valor de la conductividad es muy usado en el análisis de aguas para obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos (Marín y Osés, 2013).

Características químicas:

Entre los muchos parámetros químicos que se pueden determinar en las aguas los principales son: pH, dureza, cloruros, alcalinidad, oxígeno disuelto y sustancias que puedan estar contenidas en las aguas.

pH: Es una forma de expresar la concentración de iones Hidrógeno [H⁺] o más exactamente de su actividad. Se usa universalmente para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o alcalinas de una solución.

Concentraciones excesivas de H⁺ afectan el agua en algunos de sus usos y por esta razón es una medida de polución en potencia. El pH es el que controla el grado de disociación de muchas sustancias. No debe confundirse con la acidez o la alcalinidad. La presencia de carbonatos, fosfatos y de iones similares dan al agua un poder bufferizante y entonces la adición al agua de un ácido o de una base en tales condiciones no causa mayor efecto en el pH (Marín y Osés, 2013). El pH es importante en el proceso de potabilización del agua sobre todo en:

- La coagulación. Hay un valor de pH para el cual el proceso es más eficiente.
- La desinfección. La reacción del hipoclorito adiciona iones H⁺, disminuyendo el pH.
- La suavización o ablandamiento se controla con pH.
- Es vital en los procesos aerobios y anaerobios.
- Se debe controlar en las marchas analíticas.
- Es importante en los procesos de estabilización: es corrosiva si disuelve metales y es incrustante si precipita metales.

Alcalinidad. Se define como el poder de una solución para neutralizar los iones H⁺ y se debe primordialmente a las sales de los ácidos débiles, tales como carbonatos, bicarbonatos, boratos, silicatos y fosfatos, y unos pocos ácidos orgánicos que son muy resistentes a la oxidación biológica y llegan a formar sales que contribuyen a la alcalinidad total. La alcalinidad debida a hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos es tan alta que hace despreciable la contribución de otros materiales. Los bicarbonatos representan las mayores formas de alcalinidad porque se forman en cantidades considerables por la acidez del CO₂ sobre los materiales ácidos del suelo:



La alcalinidad se encuentra asociada al pH, la dureza y los sólidos disueltos que si pueden producir efectos deletéreos. La alcalinidad se controla en los procesos de coagulación, ablandamiento, estabilización, procesos biológicos y en el tratamiento de residuos industriales ácidos o básicos (Marín y Osés, 2013).

Dureza. Es la concentración total de iones de calcio y magnesio expresada como su equivalente en carbonato de calcio (CaCO_3). La dureza del agua se clasifica como se aprecia en la figura 1, en:

Tabla 1

Clasificación de Aguas según su Dureza.

Ppm de CaCO_3	Denominación
0-15	Muy suaves
16-75	suaves
76-150	Medias
150-300	Duras
Mayor a 300	Muy duras

Fuente: Blanco Prieto 1986

Alteraciones químicas del agua

pH. Las aguas naturales pueden tener pH ácidos por el CO_2 disuelto desde la atmósfera o proveniente de los seres vivos; por ácido sulfúrico procedente de algunos minerales, por ácidos húmicos disueltos del mantillo del suelo. La principal sustancia básica en el agua natural es el carbonato cálcico que puede reaccionar con el CO_2 formando un sistema tampón carbonato/bicarbonato. Las aguas contaminadas con vertidos mineros o industriales pueden tener un pH muy ácido. El pH tiene una gran influencia en los procesos químicos que tienen lugar en el agua, actuación de los floculantes, tratamientos de depuración, etc. (Echarri, 2007).

Oxígeno disuelto. Las aguas superficiales limpias suelen estar saturadas de oxígeno, lo que es fundamental para la vida, si el nivel de oxígeno disuelto es bajo indica contaminación con materia orgánica, septicización, mala calidad del agua e incapacidad para mantener determinadas formas de vida (Echarri, 2007).

Materia orgánica biodegradable: Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5). La DBO5 es la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aerobia de la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Se mide a los cinco días. Su valor da idea de la calidad del agua desde el punto de vista de la materia orgánica presente y permite prever cuanto oxígeno será necesario para la depuración de esas aguas e ir comprobando cual está siendo la eficacia del tratamiento depurador en una planta (Echarri, 2007).

Materiales oxidables: Demanda química de oxígeno (DQO). Es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico (normalmente Dicromato potásico en medio ácido). Se determina en tres horas y, en la mayoría de los casos, guarda una buena relación con la DBO por lo que es de gran utilidad al no necesitar los cinco días de la DBO. Sin embargo la DQO no diferencia entre materia biodegradable y el resto y no suministra información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales (Echarri, 2007).

Compuestos Orgánicos. Los aceites y grasas procedentes de restos de alimentos o de procesos industriales (automóviles, lubricantes, etc.) son difíciles de metabolizar por las bacterias y flotan formando películas en el agua que dañan a los seres vivos. Los fenoles pueden estar en el agua como resultado de contaminación industrial y cuando reaccionan con el cloro que se añade como desinfectante forman clorofenoles que son un serio problema porque dan al agua muy mal olor y sabor (Echarri, 2007).

Alteraciones biológicas del agua. Según Echarri, (2007) las alteraciones biológicas del agua están dadas por:

- Bacterias coliformes que indican desechos fecales
- Virus que indican desechos fecales y restos orgánicos.

2.2.2 Aguas residuales.

Se denomina aguas residuales a aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua. Son residuales pues, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente tienen como se aprecian en la figura 2. Algunos autores hacen una diferencia entre aguas servidas y aguas residuales en el sentido que las primeras solo provendrían del uso doméstico y las segundas corresponderían a la mezcla de aguas domésticas e industriales.

El Reglamento de la ley N° 29338 - Ley de recursos hídricos, 2010, p. 40, en el artículo 131°, define a las aguas residuales como “aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado”.

Marín & Osés, (2013) indican que las aguas residuales presentan contaminantes orgánicos e inorgánicos. La acumulación de estos elementos es variables, ya que depende de los puntos de ingreso al alcantarillado.

Figura 1

Drenaje de Aguas Residuales Procedentes del Alcantarillado



Fuente: Faucheux (2017)

Características de las aguas residuales:

Las aguas residuales se identifican por su composición física, química y biológica y la interrelación que hay entre ellas.

Las aguas residuales, son un líquido de color gris con sólidos flotantes de gran tamaño y sólido de tamaño más pequeño en suspensión lo cual le da un aspecto turbio y cuyo olor no es francamente ofensivo (Marín & Osés, 2013).

Tipos de aguas residuales:

Hay distintos tipos de aguas residuales, que se pueden clasificar en función al lugar donde fueron desechadas.

Se abordan en este trabajo tres tipos de aguas residuales: domésticas, industriales y municipales, debido a que estas fuentes generan grandes cantidades de aguas residuales, que en su mayoría son desechadas en zonas que pululan la contaminación ambiental (Martín et al., 2006).

Domésticas

Las aguas residuales de origen doméstico son residuos líquidos que proceden principalmente de los metabolismos humanos y las labores domésticas, son aquellos desechos líquidos procedentes de las viviendas y de servicios municipales (Martín, et al., 2006).

Industriales

Este tipo de aguas residuales provienen de actividades comerciales o industriales. Estas aguas son residuos líquidos que se generan en los diversos procesos de las industrias o comercios. Al caracterizar este tipo de aguas, presentan diversos componentes que dependen de la actividad que realicen. Por lo general estos componentes son difíciles de eliminar con procesos sencillos, debido a su complejidad. En base a los elementos que estas aguas presentan se define el tratamiento adecuado para su remoción. La ventaja que presenta este tipo de aguas es su fácil captación, lo que impide que se mezcle con otro tipo de aguas (Martín et al., 2006).

Municipales

En el artículo 132° del Reglamento de la Ley N° 29338 - Ley de Recursos Hídricos, 2010, p. 40, se denomina aguas municipales a aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado.

Características físicas

Color, La coloración de las aguas residuales determina cualitativamente el tiempo de las mismas. Generalmente varía del beige claro al negro. Si el agua es reciente, suele presentar coloración beige clara; oscureciéndose a medida que pasa el tiempo, pasando a ser de color gris o negro, debido a la implantación de condiciones de anaerobiosis, por descomposición bacteriana de la materia orgánica (Martín et al., 2006).

Olor Se debe principalmente a la presencia de determinadas sustancias producidas por la descomposición anaerobia de la materia orgánica: Ácido sulfhídrico, mercaptanos y otras sustancias volátiles. Si las aguas residuales son recientes, no presentan olores desagradables ni intensos. A medida que pasa el tiempo, aumenta el olor por desprendimiento de gases como el sulfhídrico o compuestos amoniacales por descomposición anaerobia (Martín et al., 2006).

Temperatura, en los efluentes urbanos oscila entre 15° y 20°C, lo que facilita el desarrollo de los microorganismos existentes.

Sólidos, de forma genérica, los sólidos son todos aquellos elementos o compuestos presentes en el agua residual que no son agua. Entre 47 los efectos negativos sobre los medios hídricos, caben destacar entre otros, disminución en la fotosíntesis por el aumento de la turbidez del agua, deposiciones sobre los vegetales y branquias de los peces, pudiendo provocar asfixia por colmatación de las mismas (Martín et al., 2006).

Características biológicas.

Vienen dadas por una gran variedad de organismos vivos de alta capacidad metabólica, y gran potencial de descomposición y degradación de la materia orgánica e inorgánica. El componente orgánico de las aguas residuales es un medio de cultivo que permite el desarrollo de los microorganismos que cierran los ciclos biogeoquímicos de elementos como el carbono, el nitrógeno, el fósforo o el azufre. Los organismos que principalmente se encuentran en las aguas residuales urbanas son: algas, mohos, bacterias, virus, flagelados, ciliados, rotíferos, larvas, etc. (Martín, et al., 2006).

Características químicas

Están definidas por sus componentes orgánicos, inorgánicos y gaseosos. (Martín et al., 2006).

Contaminantes de importancia en aguas residuales:

El agua residual contiene muchos contaminantes, para su determinación existen métodos de análisis cuantitativos que permiten determinar composición química del agua residual, y los análisis cualitativos para conocer las características físicas y biológicas.

Sólidos en Suspensión: Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.

Materia orgánica biodegradable: Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno).

2.2.3 Carga orgánica.

Cantidad de materia orgánica, generalmente medida como DBO5, aplicada a un proceso de tratamiento dado; expresada como peso por unidad de tiempo por unidad de superficie o por unidad de peso.

2.2.4 Límites máximos admisibles (LMA/LMP).

El Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, 2010) define los LMP como “La medida de la concentración el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el MINAM y los organismos que conforman el Sistema de Gestión Ambiental”. La tabla 2 muestra los valores máximos permisibles para los efluentes de una planta de tratamiento de aguas (PTAR)

Tabla 2**Límites Máximos Permisibles para los Efluentes de PTAR**

PARAMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
<i>Aceites y grasas</i>	<i>mg/L</i>	<i>20</i>
<i>Coliformes termotolerantes</i>	<i>NMP/100 mL</i>	<i>10,000</i>
<i>Demanda bioquímica de oxígeno</i>	<i>mg/L</i>	<i>100</i>
<i>Demanda química de oxígeno</i>	<i>mg/L</i>	<i>200</i>
<i>Ph</i>	<i>Unidad</i>	<i>6.5-8.5</i>
<i>Sólidos totales en suspensión</i>	<i>mL/L</i>	<i>150</i>
<i>Temperatura</i>	<i>°C</i>	<i>≤35</i>

Fuente: Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, 2010)

2.2.5 Electrocoagulación:

Es un proceso electroquímico muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales, por medio del cual se desestabilizan las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, en los que el hierro y el aluminio son los más utilizados (Arango, 2005). En el proceso de electrocoagulación hay generación de coagulantes in situ por la disolución de iones de aluminio o de hierro de los electrodos de aluminio o hierro respectivamente. La generación de iones metálicos tienen lugar en el ánodo y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso las cuales ayudan a la flotación de las partículas floculadas, las mismas que serán retiradas posteriormente (Arango, 2005).

2.2.6. Radiación ultravioleta (UV):

La luz ultravioleta (UV) presenta un método de desinfección alternativo al uso del cloro y el ozono en muchas aplicaciones de tratamiento tanto

de agua potable como de aguas residuales. La radiación UV brinda una desinfección efectiva sin generar subproductos de desinfección problemáticos. Wright Cairns, (1998) en su trabajo presentan información sobre el mecanismo de aplicación de radiación UV para la desinfección de agua potable, discuten las ventajas y desventajas de la técnica en comparación con la desinfección química, indica información práctica acerca del diseño de sistemas UV, su operación y mantenimiento, así como los costos de capital, operación y mantenimiento para una gama de estrategias de desinfección.

2.2.7 Contenido Físico Químico de la Aceituna

La aceituna es el fruto del olivo (*Olea europea L.*), es de forma ovoide, de un tamaño medio de 1 a 4 cm de longitud y de 0.6 a 2 cm de diámetro. Al inicio son de color verde, y a medida que maduran se tornan negros, por la síntesis de antocianina (Guevara, 2015). Se consideran los siguientes componentes:

El agua: En la pulpa, el agua, se encuentra principalmente acumulada en las vacuolas, existiendo un pequeño porcentaje en el citoplasma y en el resto de los componentes celulares. El agua representa el 70 a 75 % del peso de la pulpa (Mamani et al., 2008).

Sustancias grasas: Las sustancias grasas representan del 7 al 30% del peso de la fruta, de los cuales el 96 a 98 % se encuentran presentes en la pulpa y el resto repartido entre las partes restantes, como la almendra del fruto, bajo la forma de lipoproteínas. Existen también sustancias grasas típicas como los triglicéridos y la cutina, polímeros compuestos de unidades aromáticas que se encuentran en las células de la epidermis y que le confieren la propiedad de ser semipermeable al agua (Mamani et al., 2008)

Glucósidos: Entre los glucósidos es la fructuosa la que predomina, existiendo algo de sacarosa y de manitol. Para las aceitunas de mesa el

contenido de azúcar tiene gran importancia en los procesos de fermentación (Mamani et al., 2008).

Carbohidratos: Estos representan un gran porcentaje dentro de las aceitunas, generalmente monosacáridos y polisacáridos como: almidón, lignina, celulosa, sustancias pépticas, etc. Los polisacáridos (celulosa, hemicelulosa y las gomas) encierran una pequeña cantidad de proteínas y de pectina que entran en la constitución de la membrana celular. La pulpa de la aceituna contiene de 3 a 6 % de polisacáridos (Mamani et al., 2008).

Pectinas: Constituye la armadura de la lámina media pectocelulósica de la célula. Como en todas las células vegetales determina la solidez con la que las células adyacentes se adhieren unas a otras. El segmento péptico puede ser destruido por las enzimas de los fermentos putrefactivos, tales como levaduras y hongos filmógenos, ya que debido a su acción diastásica (pectinolítica) de algunas especies, producen el ablandamiento del fruto (Mamani et al., 2008).

Proteínas: La pulpa de la aceituna tiene alrededor del 1.5 % de proteínas bajo la forma esencial de ácidos amínicos. Estas proteínas están contenidas en el protoplasma y membrana citoplasmática de la célula la mayor proporción de ellas se encuentran en el mesocarpio y la semilla. Junto con las sustancias pectinas ocasionan dificultades en el proceso de extracción del aceite, ya que evitan la separación del aceite del agua vegetal dando lugar a la formación de emulsiones en algunos casos. (Mamani et al., 2008).

Ácidos orgánicos: Están presentes en pequeñas cantidades y diseminados en la pulpa, asegurando así un pH homogéneo (del orden de 4.5 a 5). Los más importantes son el ácido cítrico, málico, oxálico. Los ácidos grasos en estado libre representan del 30 al 40 % de los ácidos totales, del 60 al 70 % están presentes en forma de sal (Mamani et al., 2008).

Taninos: Representa del 1.5 al 2 % del peso de la pulpa. Los taninos son los responsables de la parte de la astringencia y acidez elevada de las aceitunas frescas (Mamani et al., 2008).

Sustancias colorantes: Se dividen en dos grupos: sustancias colorantes liposolubles, tales como la clorofila alfa y beta y los carotenoides; sustancias hidrosolubles, como la antocianina.

2.3. Conceptual

2.3.1 Caracterización del agua residual de almacenamiento de aceitunas para venta al público.

Sin duda alguna, la oferta exportable, como la demanda de consumo de aceitunas en el Perú, muestra un incremento en el tiempo tal como se aprecia en la tabla 3, lo que nos hace pensar que sucede con toda el agua de almacenamiento de las aceitunas para su expendio en los mercados del país, estas aguas son tratadas con procedimientos conocidos para su descarga en las alcantarillas o se drenan al sistema colector conforme se reciben las aceitunas.

En la figura 2 se muestra la forma como se abastece la aceituna a los comerciantes del mercado de La Parada (La Victoria) Lima Perú.

En el mercado de La Parada se tomó muestras aleatorias de agua de conservación de las aceitunas y se llevó a analizar, para determinar los parámetros iniciales a fin de caracterizarlos y determinar con cuanta carga orgánica está ingresando al proceso de tratamiento.

Tabla 3**Oferta Exportable de las Aceitunas Peruanas**

Año	BALANCE DEMANDA OFERTA		OFERTA REGIONAL	
	Oferta Exportable Perú TM	Oferta Exportable Total Región Tacna	Oferta Aceituna Negra	Oferta aceituna verde en TM
2007	9832	4227,76	2748,044	961,8154
2008	16532	7108,76	4620,694	1617,2429
2009	14558	6259,94	4068,961	1424,13635
2010	19255	8279,65	5381,7725	1883,62038
2011	12258	5270,94	3426,111	1199,13885
2012	12485	5368,55	3489,5575	1221,34513
2013	12717	5468,31	3554,4015	1244,0453
2014	12953	5569,79	3620,3635	1267,12723
2015	13193	5672,99	3687,4435	1290,6052
2016	13437	5777,91	3755,6415	1314,4745
2017	13687	5885,41	3825,6415	1338,9307
2018	13941	5994,63	3896,5095	1363,7783
2019	14199	6105,57	3968,6205	1389,0171
2020	14462	6218,66	4042,129	1414,7451
2021	14731	6334,33	4117,3145	1441,0608

Fuente : (Faucheux, 2017)

Figura 2

Abastecimiento de Aceitunas en el Mercado de La Parada



Fuente : (Faucheux, 2017)

2.3.2 Demanda química de oxígeno (DQO)

Equivale a la medida necesaria de oxígeno para poder oxidar los compuestos orgánicos e inorgánicos capaces de combinarse con el oxígeno. La unidad de medida es el mg/l o en ppm (Castells, 2012). La cuantificación de este parámetro se realiza mediante el método de dicromato de potasio en medio ácido y en combinación de sulfatos de plata y de mercurio, siendo valorado también con sulfato de amonio para alcanzar la medición de niveles bajos a 700 mg/l (Hidalgo J, 2010).

Así mismo para Nogués et al., (2010, p.222) la DQO representa un indicador del contenido total de materia orgánica.

2.3.3 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5).

Indica la cantidad oxígeno requerido por los microorganismos de descomposición para transformar o biodegradar en 5 días los residuos

orgánicos presentes en el agua en compuestos estables. La unidad de medida es el mg/l o se expresa también en ppm (Castells, 2012).

De igual modo Hidalgo, (2011) señala que el método de análisis normalmente se realiza en 5 días y a una temperatura de 20° C, es por ello que toma la denominación de DBO₅.

Para Nogués et al., (2010) es un método basado en la medida del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos aerobios para transformar la materia orgánica carbonada biodegradable presente en un cuerpo de agua. El método más empleado en la determinación de DBO₅, es el de las diluciones el cual corresponde al método 5210 del Standar Methods de la asociación americana. La DBO₅ por sus características biodegradables brinda la siguiente complementariedad:

Carácter biodegradable de las aguas: Al conocer los valores de DBO₅ y DQO de un efluente residual se puede hallar el coeficiente de biodegradabilidad expresado como DBO₅/DQO. Cuando el coeficiente es menor que 0,2 mg/l, representa que estas aguas no son biodegradables, si el coeficiente está en un rango de 0,2 a 0,4, significa que el tipo de agua residual necesita ser estudiada para un respectivo tratamiento y si el coeficiente es mayor que 0,4, se puede interpretar que las aguas tienen características biodegradables.

2.3.4 Proceso de la electrocoagulación

Los procesos fisicoquímicos son usados para remover contaminantes de los diferentes tipos de las aguas residuales. La electrocoagulación como su nombre mismo lo dice, es un proceso de coagulación, solo que no emplea agentes coagulantes externos, ya que al proporcionar corriente eléctrica al sistema, ésta produce la disolución del ánodo, liberando un agente coagulante, el cual encapsula a las partículas contaminantes ya desestabilizados, formando macro agregados, las cuales son más fáciles de remover. Es por ello que es una tecnología muy eficiente para el tratamiento

de residuos líquidos, puesto que elimina altos porcentajes de contaminantes. Esta tecnología electroquímica es una técnica conocida desde 1906, en Estados Unidos, con el paso del tiempo fue evolucionando, y empleada en muchas aplicaciones, una de ellas es la eliminación de contaminantes de aguas residuales, siendo este proceso muy eficiente ya que se remueven altos porcentajes de contaminantes, además de ser rentable, puesto que no emplea coagulantes químicos externos. Para este sistema se han probado una variedad de materiales y forma para los electrodos, siendo los más recomendables las placas de hierro y aluminio (Holt et al., 2005). En la presente investigación se utilizará placas de aluminio como ánodos ya que las investigaciones demostraron que son más eficientes y económicas (Arango-Ruiz, 2014)

Debido a que investigaciones recientes muestran que se logra mejorar el color de las aguas tratadas luego de la electrocoagulación usando radiación UV (Sameh, et al., 2020), en el presente trabajo se complementará a la celda de electrocoagulación una lámpara de radiación ultra violeta.

Los factores que afectan la Electrocoagulación son diversos, algunos tienen mayor relevancia para el proceso que otros. A continuación, definimos los términos básicos que se tendrán en cuenta en la presente investigación.

Mientras la electrólisis ocurre en el volumen de agua, una serie de procesos físicos y químicos se describen a continuación: El ánodo y el cátodo sufren reacciones anódicas y catódicas respectivamente, mientras que los electrodos como el hierro o aluminio son utilizados como electrodos de sacrificio o electrodos consumibles que aportaran iones al sistema para la reacción de todas las partes. Los iones descargados neutralizan las cargas de los contaminantes desestabilizando los sistemas de suspensión dando inicio a la coagulación. Los metales utilizados como electrodos al tener contacto con la solución contaminante liberan iones que reaccionan químicamente con las cargas de los contaminantes tratan el agua residual

por precipitación o agregando materiales coloidales que bien pueden flotar o precipitarse. Los contaminantes que presenta el agua residual se desplazan a través del campo eléctrico aplicado, tienden a sufrir reacciones de electrólisis o de hidrólisis o formar radicales libres que alteran las propiedades físicas y químicas del agua, resultando en un estado reactivo y excitado lo cual es causa de la liberación, destrucción o insolubilidad de los contaminantes. La combinación de electrodos de distinta naturaleza aumenta la eficiencia de remoción de los iones indeseables. La influencia de remoción también dependerá del ajuste de los parámetros como pH, conductividad y potencial de óxido-reducción de acuerdo al tipo de agua residual tratada.

Reacciones involucradas en la electrocoagulación.

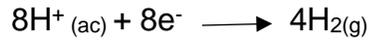
Los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son hierro y aluminio, por esta razón se tratará de manera especial las reacciones que se desarrollan manteniendo electrodos de estos dos metales en la celda. La bibliografía referenciada trata ampliamente estas reacciones, no sólo para hierro y aluminio sino también aquellas reacciones que ocurren cuando los electrodos son de otros metales o materiales. El proceso de electrocoagulación es afectado por diferentes factores, entre los más importantes se encuentran, la naturaleza y concentración de los contaminantes, el pH del agua residual y la conductividad, estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante. 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 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ o hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Bayramoglu et al., 2004).

Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico

En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo ocurre la reacción:

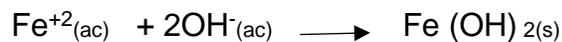


Reacción Global :



Mecanismo 2: Formación del 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 (Larue, Olivier et al, 2003). Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes (Kobya, et al 2004):

En el ánodo:



En el cátodo:



El $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinosa que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes, que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes (Bayramoglu et al., 2004).

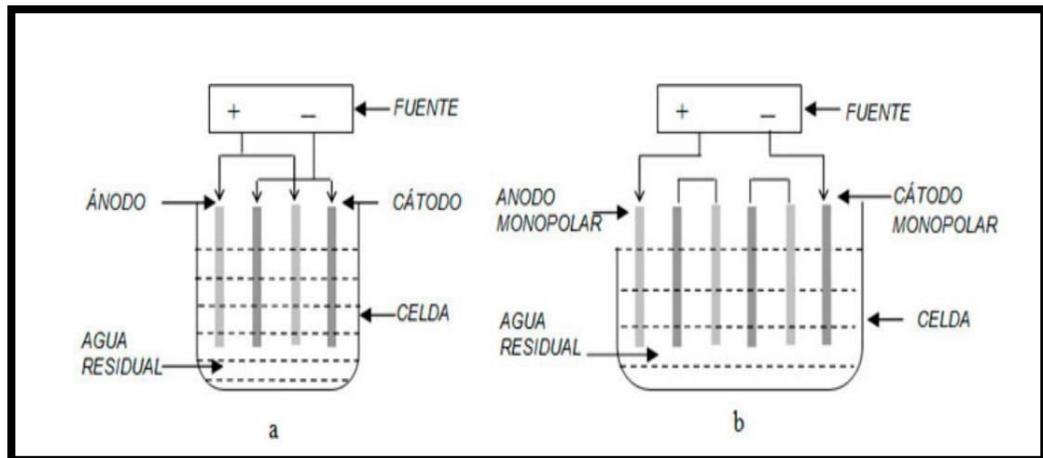
Diseño y Operación del reactor de electrocoagulación

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo (Koby, 2016), 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. Analizando el reactor tipo batch, encontramos que éste debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo, tiene la desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo. Pero tiene la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas, Una segunda clasificación de los reactores está dada en función de la flotación, una vez que el contaminante ha sufrido el proceso de coagulación existen dos formas de separarlo del medio acuoso a saber: flotación y sedimentación así pues los reactores pueden diseñarse como reactores con sólo coagulación o con coagulación y flotación. Son llamados reactores de sólo coagulación aquellos que no aprovechan la electrocoagulación para generar burbujas que separen los agregados (flóculos) del contaminante por flotación; mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar la flotación de los agregados del contaminante reciben el nombre de reactores de coagulación y flotación. La separación por sedimentación es la más común. La densidad de corriente empleada en el reactor determina la cantidad de burbujas generadas (Rajeshwar et al., 1997). Los procesos que utilizan sólo coagulación pueden combinarse con otras tecnologías, para

lograr la separación del contaminante (Pérez, 2016). Estas tecnologías pueden ser: flotación por aire disuelto, electroflotación, filtración y clarificación (Wiblbrett, 2000). Estas combinaciones de técnicas de separación con el proceso de electrocoagulación se pueden llevar a cabo integrando ambas tecnologías en el diseño del reactor o se pueden presentar en unidades separadas. Es importante señalar que la combinación de estas tecnologías y su diseño depende en gran medida de las propiedades y características que tenga el agua residual a tratar y sus contaminantes, adicionalmente a lo anterior, es importante considerar el uso del efluente. Se ha observado que cuando en el reactor se usan dos placas, una como ánodo y otra como cátodo, no se presenta una buena disolución de iones metálicos, para mejorar esta disolución se debe aumentar el área superficial de los electrodos, lo cual se logra aumentando el número de placas, disponiéndolas en serie en forma paralela monopolar o bipolar (Jiang et al., 2002; Mollah et al.2004) como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Reactores con Electroodos Monopolares

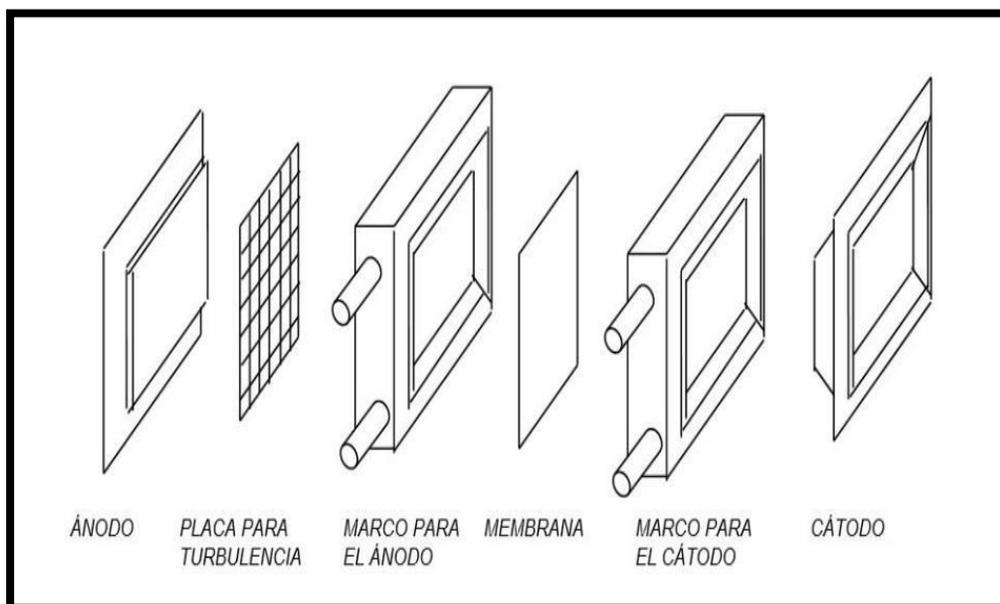


Fuente: (Arango-2016)

Nota: a) Reactor con electrodos monopolar conectados en paralelo,
b) Reactor con electrodos monopolar conectados en serie.

Existen otros tipos de reactores para la electrocoagulación, uno de ellos es el tipo filtro prensa, este está constituido por un par de marcos, uno de ellos soporta el ánodo y el otro el cátodo en forma de placas, de manera que su acople forma una cámara como se muestra en la Figura 4. El agua a ser tratada entra por la parte lateral a la cámara y es inducida a flujo turbulento para incrementar la eficiencia del proceso. Este sistema hace que su operación y mantenimiento sea relativamente simple (Chen, Guohua, 2004).

Figura 4
Reactor Tipo Filtro Prensa

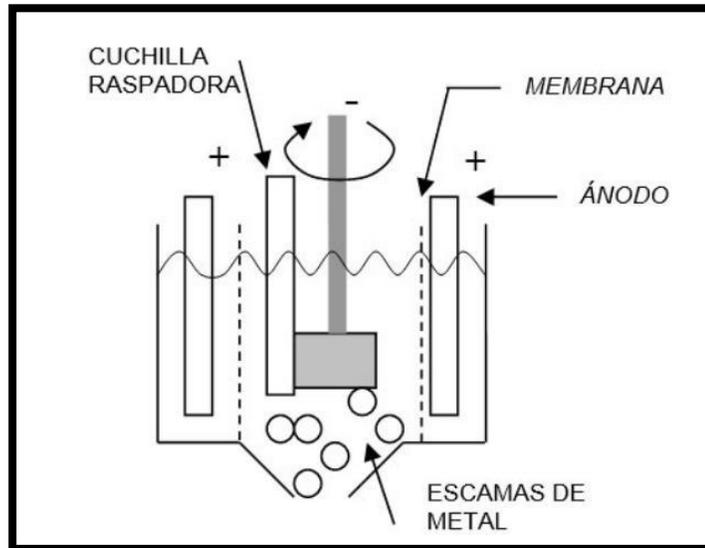


Fuente: Arango (2016)

Para la remoción de metales se usa el reactor de electrodo cilíndrico rotativo en el cual el cátodo gira en el centro de la celda y el ánodo se encuentra fijo como se muestra en la Figura 5, esta disposición permite aumentar la transferencia de masa en los electrodos y remover partículas de metal del cátodo. Finalmente, también es usado para la remoción de metales el reactor de lecho fluidizado mostrado en la Figura 6, este permite aumentar el área específica superficial mejorando la eficiencia del proceso (Chen, 2004).

Figura 5

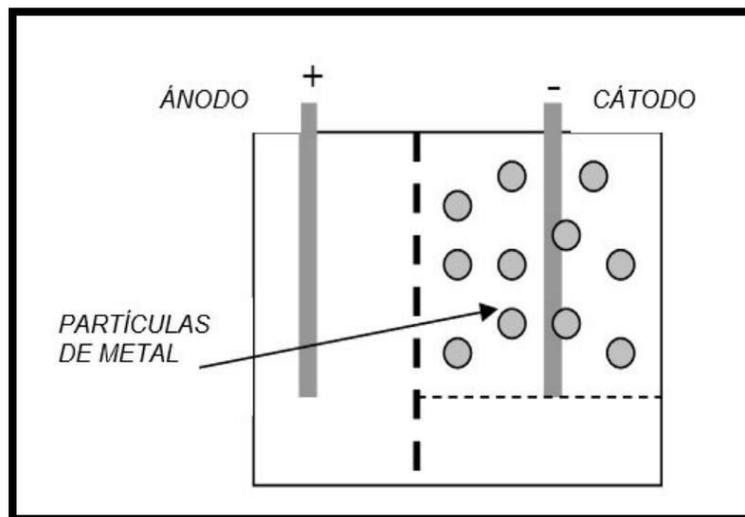
Reactor de Electrodo Cilíndrico Rotativo



Fuente: (Arango, 2016)

Figura 6

Reactor de Lecho Fluidizado



Fuente (Arango, 2016)

Factores que afectan la electrocoagulación:

Densidad de corriente. - Es el resultado entre la intensidad de corriente que atraviesa por un conductor y la sección recta de dicho conductor. La cantidad de corriente suministrada al sistema de electrocoagulación permite que los electrodos utilizados desprendan mayor cantidad de iones en el medio acuoso. Al aplicar corrientes muy altas al proceso electroquímico, la energía eléctrica se convierte en energía calorífica que calienta el agua. Una densidad de corriente alta disminuye la eficiencia de la electrocoagulación. Es por ello que al elegir la densidad de corriente óptima debe tenerse en cuenta las demás variables de operación como pH, y temperatura.

Conductividad. - Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o CaCl₂ genera un aumento en la conductividad del agua residual. Presencia de NaCl: La adición de sal al cuerpo de agua residual, aumenta la conductividad. Los iones de cloruro tienden a disminuir los problemas de reacción química de iones como HCO₃⁻ y SO₄⁻² ya que la presencia de iones bicarbonatos o sulfatos permiten la precipitación de Ca⁺² y Mg⁺², los cuales producen una pared resistente sobre los electrodos, que interrumpe la circulación correcta de la corriente en el sistema electroquímico. Sin embargo, las condiciones óptimas de NaCl en la electrocoagulación no deben ser muy altas, sino que debe ser añadida de acuerdo con el nivel de conductividad que posee la muestra residual. La conductividad también se va a ser afectada por la distancia entre los electrodos, lo cual dependerá de las condiciones de experimentación.

pH.- El pH en la electrocoagulación está relacionado directamente en la eficiencia de la corriente y al nivel que éste se encuentre en el medio acuoso permitirá la disolución del hidróxido del metal. La eficiencia de la electrocoagulación depende del tipo de contaminante, sin embargo, se ha identificado que existen buenos niveles de remoción, utilizando pH, cercanos

a 7. En aguas ácidas el pH, suele incrementarse, pero disminuir en aguas básicas. En aguas ácidas el pH aumenta debido a la reacción del hidrógeno en el cátodo dada por $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ (Arango, 2005).

Temperatura.- La temperatura en la electrocoagulación aumenta hasta llegar aproximadamente a los 60°, de acuerdo a la cantidad de corriente aplicada y luego desciende. Cuando la temperatura es alta, existe mayor destrucción de la película de óxido de aluminio, lo cual desprende mayor cantidad de iones que interactúan con los contaminantes.

Voltaje.- El rango mínimo del voltaje aplicado dará el beneficio de reducir el costo de operación, el aumento de voltaje permite la efectividad en la remoción de los contaminantes y sobre todo en metales pesados, pero se relaciona directamente con el estado de pH.

Tiempo.- Cuando aumenta el tiempo de electrólisis, la concentración de hierro o aluminio, los iones y sus flóculos de hidróxido aumentan, también aumenta la tasa de generación de burbujas. Los contaminantes en el lixiviado eliminado por el efecto de la coagulación y la flotación generan un alto consumo de energía eléctrica si el tiempo se amplía a más de 90 min.

Mecanismos y reacciones. - Durante el proceso de electrocoagulación se desarrolla una gama de reacciones físicas y químicas, que posibilita la eliminación de los agentes contaminantes. La ley de Faraday rige el proceso de electrocoagulación. En las placas llamadas electrodos se generan iones positivos y negativos. El ánodo se disuelve al inducir corriente eléctrica generando iones metálicos. Los iones producidos cumplen la función de desestabilizar las partículas contaminantes presentes en el agua por medio de hidrólisis, electrólisis y formación de radicales libres. Cuando estas cargas se han estabilizado, se da inicio al proceso de coagulación. Los contaminantes ya estabilizados se pueden eliminar por precipitación o flotación, esto va a depender de la densidad que estas partículas tengan. El proceso de electrocoagulación da lugar a tres etapas: en la primera etapa se

genera el coagulante al disolverse el ánodo, en la segunda etapa se desestabilizan las partículas contaminantes y por último se forma macroagregados producto de la coagulación que flotarán o precipitarán (Mollah, et al 2001).

Reacciones involucradas.- Los electrodos comúnmente empleados en este proceso son de materiales de hierro y aluminio. A continuación se detallan las reacciones químicas que ocurren en la celda de electrocoagulación, específicamente cuando el aluminio actúa como ánodo, ya que las investigaciones demostraron que son más eficientes y económicas.

Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^- reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, y otras poliméricas tales como $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ y $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $Al(OH)_3(s)$ como se muestra en la reacción de ánodo. El $Al(OH)_3(s)$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinosa que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes, que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes (Arango, 2014).

2.4 Definición de términos básicos.

Proceso de electrocoagulación. - En el transcurso de este proceso se desarrollan diversas reacciones, generando una desestabilización de las partículas contaminantes, que al unirse con los iones metálicos, producto del desgaste del ánodo, se estabilizan formando macromoléculas que precipitan o flotan, de acuerdo a su densidad. Permitiendo así la remoción de los contaminantes.

Corriente eléctrica. - Es un flujo de carga que se mueven ordenadamente dentro del interior de un conductor. Para medir la corriente eléctrica se emplea la ley de ohm:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta q}{\Delta t} \right) = \frac{dq}{dt} \longleftrightarrow I = \frac{q}{t}$$

Unidad: Ampere: 1A = 1C/s

I: Intensidad de corriente: ampere (A)

q :Carga eléctrica: Coulomb (C)

t : Tiempo : Segundos (s)

Densidad de Corriente.- Se define como:

$$J = \frac{I}{A}$$

Unidades: A/m²

Donde:

J: Densidad de corriente.

I: Intensidad de corriente (A)

A: Superficie Transversal (m²)

Carga Orgánica. - contenido de materia orgánica en el agua residual de conservación de la aceituna, expresados como demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y turbidez.

Demanda química de oxígeno (DQO). - Indicador del contenido total de materia orgánica en el agua residual de conservación de la aceituna, antes y después del tratamiento, medidos en mgO₂/L de agua residual.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).- Cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos de descomposición para biodegradar en 5 días los residuos orgánicos presentes en el agua residual de conservación de las aceitunas antes y después del tratamiento, medidos en mgO₂/L de agua residual.

Turbidez.- Medida de la turbiedad, debido a los sólidos en suspensión, del agua residual de conservación de la aceituna antes y después del

tratamiento, medidos en unidades de turbidez nefelométricas (NTU). Ver figura 7.

Figura 7:

Turbidez de Aguas de Aceituna



Fuente: (Severiche et al., 2013)

La turbiedad de las aguas se debe a la presencia de material suspendido y coloidal (Severiche, Castillo , & Acevedo, 2013).

Voltaje.- Diferencia de potencial eléctrico aplicado a los electrodos en la celda de electrocoagulación, medido en Voltios.

Tiempo de electrocoagulación.- Tiempo que permanecerá el agua residual en tratamiento de electrocoagulación y radiación UV, medido en minutos.

Flujo de recirculación.- Caudal de operación durante el proceso para un tiempo definido de electrocoagulación, medido en L/min.

Potencial Eléctrico aplicado.- Es el voltaje aplicado al sistema combinado de electrocoagulación y radiación ultravioleta.

Porcentaje de remoción.- Contenido de carga orgánica después del tratamiento de electrocoagulación complementado con radiación ultravioleta con respecto a la carga orgánica inicial, expresado en porcentaje.

Amperaje: Cantidad de flujo de electrones o de corriente en un circuito eléctrico (Withman, 2000).

Celda Eléctrica: Es un circuito eléctrico constituido por dos electrodos y una solución de electrolitos. Contando con un cátodo y un ánodo. En la cual se producen reacciones químicas como resultado de un potencial aplicado (Gennaro, 2000).

Densidad de Corriente: Se define como una magnitud vectorial representada como J , es la corriente por unidad de área que atraviesa la superficie cuya normal coincide con la dirección de J .

Ánodo: Es el electrodo hacia el cual fluye la corriente de electrones liberados por el cátodo.

Cátodo: Es un electrodo que produce la liberación masiva de electrones por efecto del calor.

Iones: Partícula cargada eléctricamente obtenida a partir de un átomo o grupo de átomos enlazados químicamente al añadir o eliminar electrones (Gammon, 2009).

Coagulación: La coagulación es la desestabilización eléctrica de algunas partículas media te la adición de sustancia químicas que son los coagulantes.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

El método de la EC complementado con radiación UV, logra una mayor remoción de la carga orgánica presente en aguas residuales del proceso de conservación de la aceituna.

3.1.2 Hipótesis específicas

- 1) El contenido de la carga orgánica determina las características del agua residual de conservación de las aceitunas.
- 2) Los parámetros adecuados de la EC en combinación con la radiación UV logran una mayor remoción de la carga orgánica presentes en las aguas residuales de conservación de la aceituna.

3.2 Definición conceptual de variables

Y = Porcentaje de remoción de carga orgánica:

Contenido de carga orgánica después del tratamiento de electrocoagulación complementado con radiación ultravioleta con respecto a la carga orgánica inicial, expresado en porcentaje.

Variables correlacionadas

X₁ = Contenido de carga orgánica inicial: carga orgánica del agua residual de conservación de la aceituna a la entrada del electro coagulador.

X₂ = parámetros de operación del equipo de electrocoagulación: tiempo de electrocoagulación, potencial eléctrico aplicado y distancia entre los electrodos.

Modelo: $Y = f(X_1, X_2)$

Porcentaje de remoción de la carga orgánica = f (contenido de carga orgánica inicial, parámetros de operación del equipo de electrocoagulación).

3.2.1. Operacionalización de variables

Tabla 4

Operacionalización de Variables

Variable Dependiente	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Método
Porcentaje de remoción carga orgánica.	contenido de carga orgánica después del tratamiento de electrocoagulación complementado con radiación ultravioleta con respecto a la carga orgánica inicial, expresado en porcentaje	DQO	-mg/L	- Estándar
		DBO ₅	-mg/L	- Estándar
		Turbidez	-NTU	- Estándar
Variables Independientes	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Método
Contenido de carga orgánica inicial.	Carga orgánica del agua residual de conservación de la aceituna a la entrada del electro coagulador.	- DQO	- mg/L	- Estándar
		- DBO ₅	- mg/L	- Estándar
		- SST	- mg/L	- Estándar
		- Conductividad	- $\mu\text{S cm}^{-1}$	-Conductimetría
		- pH	- Und de pH	-Potenciometría
		- Turbidez	- NTU	-Turbidimetría
Parámetros de operación del equipo de electrocoagulación.	Parámetros de operación del equipo de electrocoagulación expresados en tiempo de electrocoagulación, potencial eléctrico aplicado y flujo de recirculación.	- Tiempo de electrocoagulación	- Minutos	- Medición directa
		- Potencial eléctrico aplicado.	- Voltios	- Medición directa
		- Flujo de recirculación.	- L/min	- Medición directa

IV. METODOLOGÍA

4.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación elegido para este proyecto de investigación es experimental, puesto que buscamos encontrar conocimientos que se puedan aplicar para resolver la problemática de la remoción de carga orgánica de aguas residuales de conservación de la aceituna, por el método de electrocoagulación complementado con la radiación ultravioleta, que serán validadas mediante pruebas experimentales en el laboratorio de operaciones y procesos unitarios (LOPU) de la UNAC. El experimento básico estará constituido por 12(3*2*2) tratamientos, para los parámetros de operación del equipo de electrocoagulación complementado con radiación UV (X₂), considerando los parámetros: tiempo (02 niveles), voltaje (03 niveles) y distancia (02 niveles), se tiene:

Tabla 5

Diseño de Experimentos

N° DE EXPERIMENTOS	TIEMPO (min)	VOLTAJE (V)	Distancia (cm)
1	120	4	2
2	120	4	4
3	120	6	2
4	120	6	4
5	120	8	2
6	120	8	4
7	180	4	2
8	180	4	4
9	180	6	2
10	180	6	4
11	180	8	2
12	180	8	4

4.2. Método de investigación

Etapa 1. Caracterización del agua de conservación de aceituna.

Etapa 2: Preparación del equipo de electrocoagulación complementado con radiación ultravioleta. Quedan definidos en esta etapa, la capacidad de la

celda, el número de electrodos, tamaño de electrodos, la distancia entre electrodos y la potencia de la lámpara UV que se utilizará.

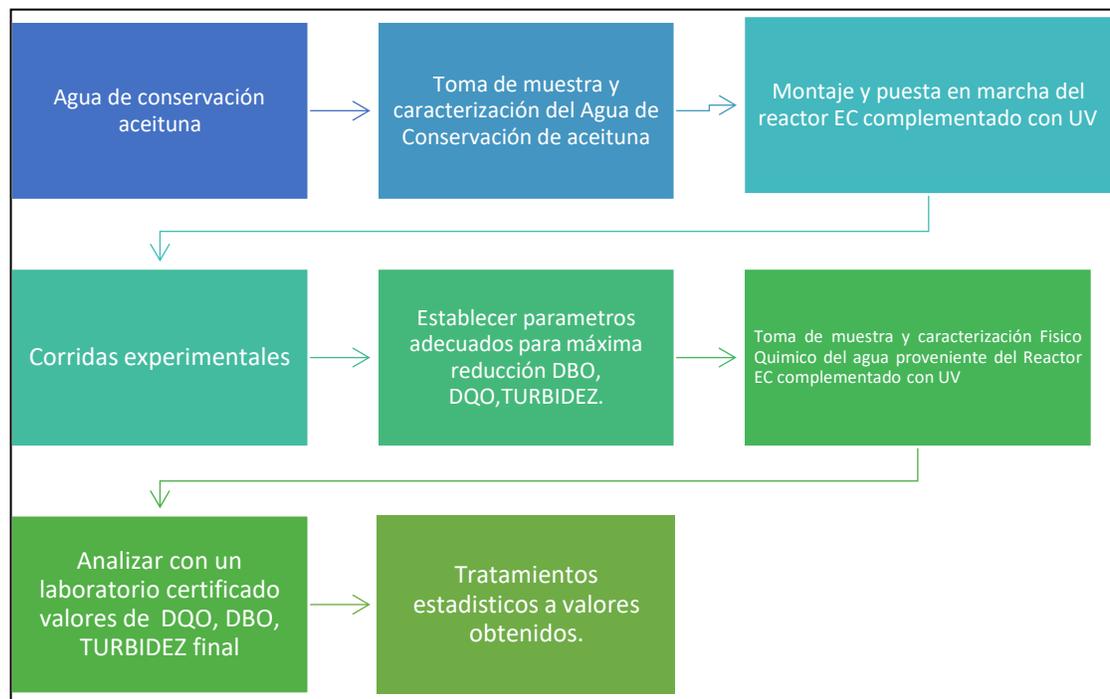
Etapa 3. Determinación del diseño experimental.

Etapa 4. Proceso de electrocoagulación complementado con radiación ultravioleta en un sistema discontinuo, utilizando electrodos de aluminio. Se trabajará a, se consideró como variables independientes el pH, voltaje y el tiempo de electrocoagulación. Como variables respuestas se tuvo: DQO, DBO y la turbidez.

En la figura 8 se indican las secuencias del método de investigación.

Figura 8

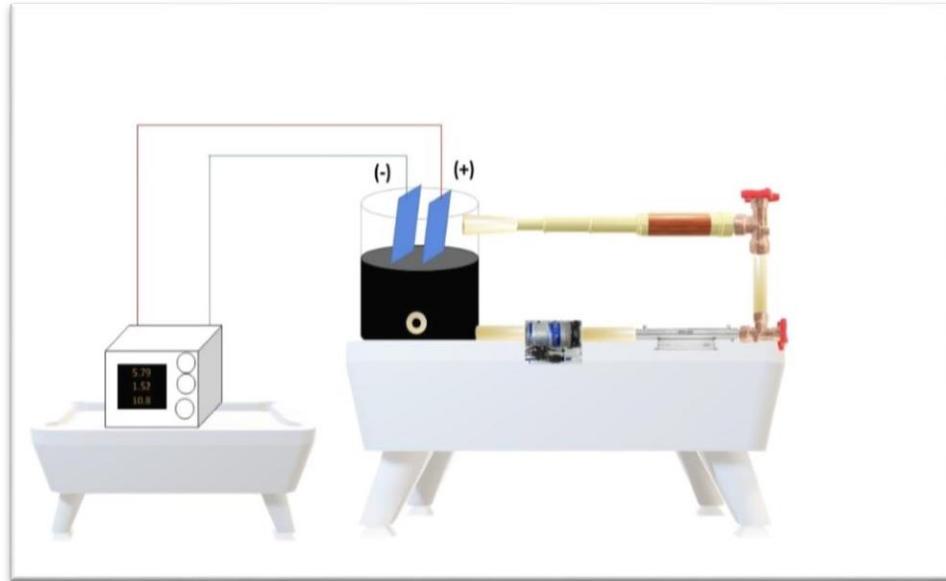
Secuencia del Método de Investigación



Adicionalmente se ha registrado los cambios de pH y masa del ánodo por cada experiencia.

Figura 9

Equipo de Electrocoagulación Combinado con Radiación Ultravioleta



4.3. Población y muestra

4.3.1 Población: Para la presente investigación el criterio de población no aplica, debido a que se trabajó con una unidad de análisis proveniente de una muestra caracterizada.

4.3.2 Muestra: Se trabajó 30 L de agua de conservación de aceitunas y para cada experimento se utilizó como unidad de análisis un volumen de 2 L.

La investigación experimental se desarrolló en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química de la UNAC. Método: exploratorio y experimental. La investigación tuvo una duración de 04 meses.

4.4. Lugares de estudio y periodo desarrollado

La investigación experimental se desarrolló en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química de la UNAC. Método: exploratorio y experimental. La investigación tuvo una duración de 04 meses.

4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de la información

Las pruebas de caracterización de la muestra se realizaron en un laboratorio certificado, luego en cada corrida experimental se monitoreó las variables respuesta, los datos se anotaron en una bitácora de información, una vez concluido cada tiempo de electrocoagulación el agua procesada se almacenó en envases de vidrio, rotulados y se almacenarán bajo refrigeración hasta la toma de lectura de DQO y turbidez. La tabla 3 muestra las técnicas e instrumentos por etapas de la investigación.

Los equipos y materiales que se utilizaron durante las corridas experimentales son:

Equipos:

- Celda electrolítica con ánodo de aluminio y un cátodo de acero
- Lámpara UV 242 nm
- Fuente de Poder regulable de 5A (0-30 V)
- Bomba de recirculación de 1gpd
- Multiparámetro
- Cronómetro
- Flujómetro

Materiales:

- Probetas
- Envases de muestreo
- Filtro
- Embudos
- Vasos de precipitación
- Cilindro
- Pipeta

Tabla 6

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

ETAPA	TÉCNICA	INSTRUMENTO	RESULTADO
Recolección de muestra del agua de conservación de aceituna	Óptico Físico	Ficha de registro de datos de la muestra del agua de conservación de aceituna (Cadena de custodia)	Muestra del agua de conservación de aceituna preservada y rotulada
Análisis de la muestra agua de conservación de aceituna	Instrumental (En laboratorio certificado)	<ul style="list-style-type: none"> • Biochemical Oxygen Demand (BOD) 5-Day BDO • Demanda Química de Oxígeno, Colorimetric Method. • Turbidez turbidity Nephelometric Method 	Valores de entrada de muestra: DQO, DBO y turbidez.
Construcción de la celda de electrocoagulación complementado con radiación UV	Óptico Físico	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de poder de 5A (0-30V) • Celda electrolítica de 2 electrodos, un ánodo y un cátodo, capacidad 2L. • Lámpara de radiación ultravioleta. • Bomba de recirculación 1 gpd 	Descripción del equipo y parámetros de operación.
Análisis de la muestra del agua tratada.	Instrumental (En laboratorio certificado)	Informe de ensayo de la muestra de agua tratada.	Valores finales de la muestra: DQO y turbidez

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Para el análisis estadístico se utilizó el software Minitab 18 y se realizó la prueba de análisis de varianza. Ver tabla 7, 8, 9, 10 y 11.

Tabla 7

Diseño Factorial de Múltiples Niveles.

Resumen del Diseño			
Factores:	3	Réplicas:	1
Corridas base:	12	Total de corridas:	12
Bloques base:	1	Total de bloques:	1
Número de niveles	2; 3; 2		

Tabla 8

Tabla de Diseño

Corrida	Blq	A	B	C
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	1	2	1
4	1	1	2	2
5	1	1	3	1
6	1	1	3	2
7	1	2	1	1
8	1	2	1	2
9	1	2	2	1
10	1	2	2	2
11	1	2	3	1
12	1	2	3	2

Regresión factorial: DQO-%Remocion vs. Tiempo (min); distancia (cm); voltaje (V)

*** NOTA * Este diseño incluye algunas corridas divergentes.**

Eliminación de términos hacia atrás

α a retirar = 0.1

Tabla 9**Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	2	1056.7	528.37	32.51	0.000
Lineal	2	1056.7	528.37	32.51	0.000
Voltaje (V)	1	880.1	880.07	54.15	0.000
Distancia (cm)	1	176.7	176.67	10.87	0.009
Error	9	146.3	16.25		
Total	11	1203.0			

Tabla 10**Resumen del modelo**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4.03137	87.84%	85.14%	79.79%

Tabla 11**Coefficientes codificados**

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		54.11	1.16	46.50	0.000	
Voltaje (V)	20.98	10.49	1.43	7.36	0.000	1.00
Distancia (cm)	-7.67	-3.84	1.16	-3.30	0.009	1.00

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\text{DQO-\%Remoción} = 34.16 + 5.244 \text{ Voltaje (V)} - 3.84 \text{ Distancia (cm)}$$

Estructura de alias

Factor	Nombre
A	Tiempo (min)
B	Voltaje (V)
C	Distancia (cm)

V. RESULTADOS

5.1 Resultados descriptivos.

En base al diseño experimental se obtuvieron los datos que se muestran en las tablas 12 a la 23.

Experimento 1

Tabla 12

Resultados a 4V, 2 cm de distancia y 120 min de electrocoagulación

t (min)	Amperaje (A)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L) 1:5	DQO (mg/L)	pH	% de remoción
0	1.85	42	14500	72500	3.5	0.00
30	1.84	29	11350	56750	5	21.72
60	1.84	17	9400	47000	5	35.17
90	1.85	10.2	8375	41875	6	42.24
120	1.83	5.4	7900	39500	7	45.52

Peso inicial de electrodo 111.8 g, peso final de 108.5 g, consumo real del electrodo 3.3 g, la intensidad de corriente promedio 1.84 A.

Experimento 2

Tabla 13

Resultados a 4V, 4 cm de distancia y 120 min de electrocoagulación

t (min)	Amperaje (A)	Turbidez (NTU)	DQO 1:5 (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	% Remoción
0	1.03	38	14450	72250	3.5	0.00
30	0.97	26	11625	58125	5	19.55
60	0.94	21	10300	51500	5.5	28.72
90	0.95	14	10075	50375	6.5	30.28
120	0.95	9	9425	47125	7	34.78

Peso inicial de electrodo 108.5 g, peso final de 107.7 g, consumo real del electrodo 0.8 g, la intensidad de corriente promedio 0.96 A.

Experimento 3

Tabla 14

Resultados a 6V, 2 cm de distancia y 120 min de electrocoagulación

t (min)	Amperaje (A)	Turbidez (NTU)	DQO 1:5 (mg/L)	pH	% de remoción DQO
0	3.89	42	15250	3.5	0
30	3.65	24	9350	4.5	38.68
60	3.49	19	7725	6	49.34
90	3.4	8.4	7225	7.5	52.62
120	3.35	4.1	6475	7.5	57.54

Peso inicial de electrodo 123.4 g, peso final de 118.6 g, consumo real del electrodos 4.8 g, la intensidad de corriente promedio 3.56 A.

Experimento 4

Tabla 15

Resultados a 6V, 4 cm de distancia y 120 min de electrocoagulación

t (min)	Amperaje (A)	Turbidez (NTU)	DQO 1:5 (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	% de remoción DQO
0	1.98	38	14500	72500	3.5	0.00
30	2.12	25	9050	45250	5	37.59
60	2.14	12	8050	40250	6	44.48
90	2.2	9	7050	35250	7	51.38
120	2.23	5.8	6625	33125	7.5	54.31

Peso inicial de electrodo 118.6 g, peso final de 117 g, consumo real del electrodo 1.6 g, la intensidad de corriente promedio 2.13 A.

Experimento 5

Tabla 16

Resultados a 8V, 2 cm de distancia y 120 min de electrocoagulación

t (min)	Amperaje (A)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L) 1:5	DQO (mg/L)	pH	% emoción DQO	Densidad de Corriente
0	4.64	39	14750	73750	3.5	0.00	552.38
30	4.92	26	7725	38625	7	47.63	585.71
60	5.34	19	6700	33500	7.5	54.58	635.71
90	5.87	8.2	5875	29375	8	60.17	698.81
120	5.49	3.6	5125	25625	8.5	65.25	653.57

Peso inicial de electrodo 132.6 g, peso final 127 g, consumo real del electrodo 5.6 g, intensidad promedio 5.25 A.

Experimento N° 6

Tabla 17

Resultados a 8V, 4 cm de distancia y 120 min de electrocoagulación:

t (min)	Amperaje (A)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	pH	% remoción DQO
0	3.12	35	14400	3.5	0.00
30	3.72	24	7000	5	51.39
60	3.83	18	6000	6	58.33
90	3.64	11	5700	7.5	60.42
120	3.61	3.7	5600	8	61.11

Peso inicial de electrodo 127 g, peso final 123.4 g, consumo real del electrodo 3.6 g, la intensidad promedio 3.58 A.

Experimento 7

Tabla 18

Resultados a 4V, 2 cm de distancia y 180 min de electrocoagulación

t (min)	Amperaje (A)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	% de remoción de DQO
0	1.83	38	14750	73750	3.5	0
30	1.85	24	10850	54250	4	26.44
60	1.82	16	8650	43250	5	41.35
90	1.8	12	8125	40625	5.5	44.91
120	1.79	7.4	7750	38750	7	47.45
150	1.78	4.6	7600	38000	7.5	48.47
180	1.74	4.1	7525	37625	7.5	48.98

Peso inicial de electrodo 117 g, peso final 111.8 g, consumo real del electrodo 5.2 gr, la intensidad de corriente promedio 1.80 A.

Experimento 8

Tabla 19

Resultados a 4V, 4 cm de distancia y 180 min de electrocoagulación

t (min)	Amperaje (A)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	% Remoción
0	0.85	38	14750	73750	3.5	0.00
30	0.86	25	11625	58125	4.5	21.19
60	0.86	18	10850	54250	5.5	26.44
90	0.84	13	10300	51500	6.5	30.17
120	0.85	7	9825	49125	7	33.39
150	0.83	5.4	9275	46375	7	37.12
180	0.8	5	9225	46125	7.5	37.46

Peso inicial de electrodo 111.8 g, peso final de 110.5 g, consumo real del electrodo de 1.3 g, intensidad de corriente promedio 0.84 A.

Experimento 9

Tabla 20

Resultados a 6V, 2 cm de distancia y 180 min de electrocoagulación

t (min)	Amperaje (A)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	% de remoción DQO
0	3.98	39	15050	75250	3.5	0
30	3.31	24	10175	50875	5	32.4
60	3.16	19	7400	37000	5.5	50.8
90	3.42	8.41	6425	32125	7	57.3
120	3.39	4.5	5800	29000	7.5	61.4
150	3.37	3.8	5575	27875	7.5	62.9
180	3.36	2.6	5400	27000	7.5	64.1

Peso inicial de electrodo 121.6 g, peso final de 114.2 g, consumo real de electrodos 7.4 g, la intensidad de corriente promedio 3.42 A.

Experimento 10

Tabla 21

Resultados a 6V, 4 cm de distancia y 180 min de electrocoagulación

t (min)	Amperaje (A)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	% de remoción DQO
0	1.98	40	14950	74750	3.5	0.00
30	2.12	28	10075	50375	5	32.61
60	2.14	18	8350	41750	6	44.15
90	2.2	13	7675	38375	7	48.66
120	2.23	6.5	7175	35875	7.5	52.01
150	2.03	4.6	6700	33500	7.5	55.18
180	1.98	3.6	6575	32875	7.5	56.02

Peso inicial de electrodo 114.2 g, peso final de 111.8 g, consumo real del electrodo 2.4 g, la intensidad de corriente promedio 2.09 A.

Experimento 11

Tabla 22

Resultados a 8V, 2 cm de distancia y 180 min de electrocoagulación

t (min)	Amperaje (A)	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	% remoción DQO	Densidad Corriente
0	4.3	37	14900	74500	3.5	0.00	511.9
30	4.77	24	8450	42250	7	43.29	567.9
60	5.85	17	5975	29875	7.5	59.90	696.4
90	6.36	7	5700	28500	9	61.74	757.1
120	6.26	3.3	5525	27625	8.5	62.92	745.2
150	6.16	1.9	5175	25875	8.5	65.27	733.3
180	5.87	1.8	5075	25375	8.5	65.94	698.8

Peso inicial del electrodo 135.4 g, peso final 127 g, consumo real del electrodo 8.4 g, la intensidad de corriente promedio 5.65 A

Experimento 12

Tabla 23

Resultados a 8V, 4 cm de distancia y 180 min de electrocoagulación

t (min)	Amperaje (A)	Turbidez (NTU)	DQO 1:3 (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	% remoción DQO
0	2.98	36	14900	74500	3.5	0
30	3.58	28	8825	44125	5.5	40.77
60	3.64	16	7350	36750	6.5	50.67
90	3.81	6.7	6225	31125	7.5	58.22
120	3.74	4.3	6125	30625	8	58.89
150	3.59	3.3	6050	30250	8	59.39
180	3.5	2.9	6050	30250	8	59.39

Peso inicial de electrodo 127 g, peso final 121.6 g, consumo real del electrodo 5.4 g, la intensidad de corriente promedio 3.54 A.

Resumiendo, data final de las doce (12) experiencias, se obtuvo % de remoción respecto a la DQO (mg/L), así mismo % remoción respecto a valores de turbidez (NTU) y consumo de electrodos.

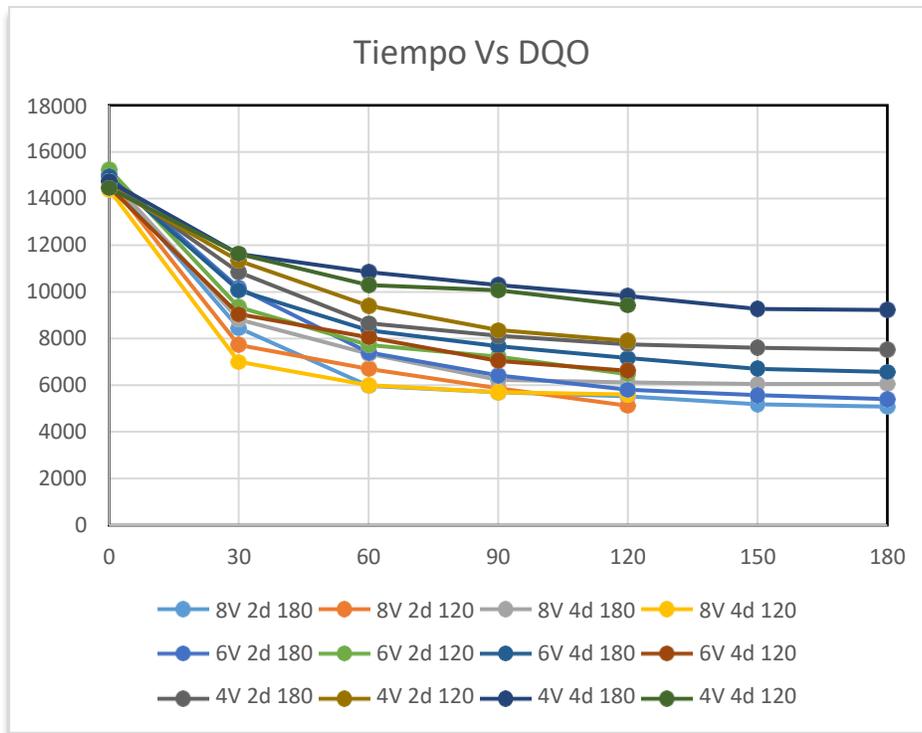
Tabla 24

Porcentaje de remoción por experimento respecto a la DQO.

Exp.	TIEMPO (min)	VOLTAJE (V)	DISTANCIA (cm)	DQO (mg/L) inicial 1:5	DQO (mg/L) final	% REMOCIÓN
01	120	4	2	14500	7900	45.52
02	120	4	4	14450	9425	34.78
03	120	6	2	15250	6475	57.54
04	120	6	4	14500	6625	54.31
05	120	8	2	14900	5125	65.60
06	120	8	4	14400	5600	61.11
07	180	4	2	14750	7525	48.98
08	180	4	4	14750	9225	37.46
09	180	6	2	15050	5400	64.12
10	180	6	4	14950	6575	56.02
11	180	8	2	14900	5075	65.94
12	180	8	4	14400	6050	57.99

Figura 10

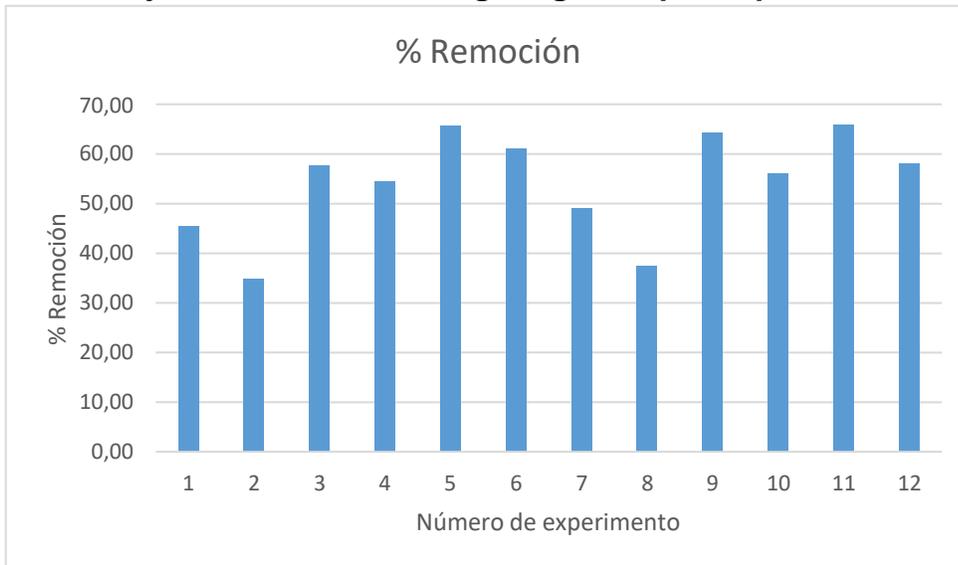
Porcentaje de remoción por experimento respecto a la DQO.



El comportamiento que se observa es que a partir de 120 minutos de electrocoagulación el porcentaje de remoción de la DQO es prácticamente constante.

Figura 11

Porcentaje de remoción de carga orgánica por experimento



Se observa mayor porcentaje de remoción de carga orgánica en el experimento 11 y 5 seguido del experimento 9, en tanto que el menor valor se observa en el experimento 2.

Tabla 25

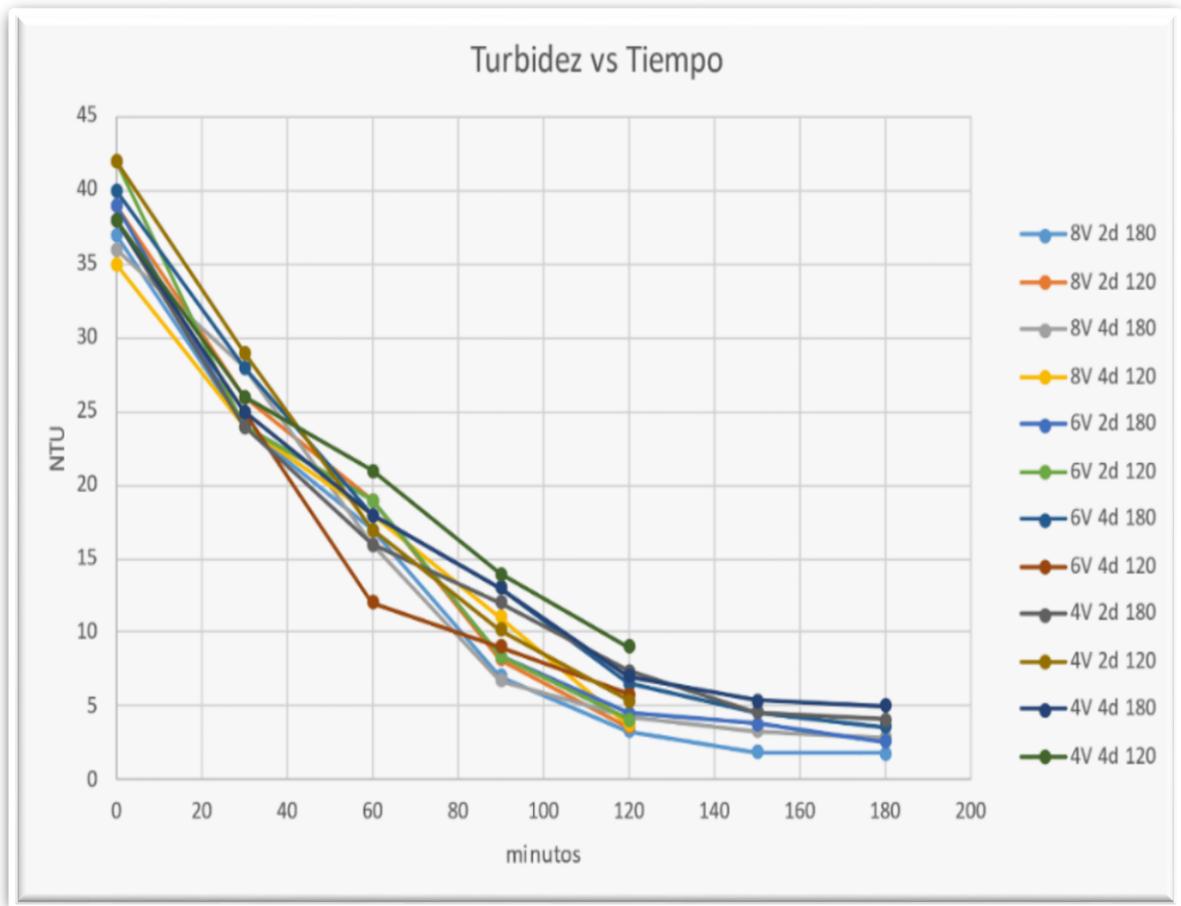
Porcentaje de remoción de turbidez por experimento

Exp.	TIEMPO (min)	VOLTAJE (V)	DISTANCIA (cm)	TURBIDEZ (NTU) inicial	TURBIDEZ (NTU) final	% REMOCIÓN
01	120	4	2	42	5.4	87.14
02	120	4	4	38	9	78.57
03	120	6	2	42	4.1	90.24
04	120	6	4	38	5.8	86.19
05	120	8	2	39	3.6	91.43
06	120	8	4	35	3.7	91.19
07	180	4	2	38	4.1	90.24
08	180	4	4	38	5	88.10
09	180	6	2	39	2.6	93.81
10	180	6	4	40	3.6	91.43

11	180	8	2	37	1.8	95.71
12	180	8	4	36	2.9	93.10

Figura 12

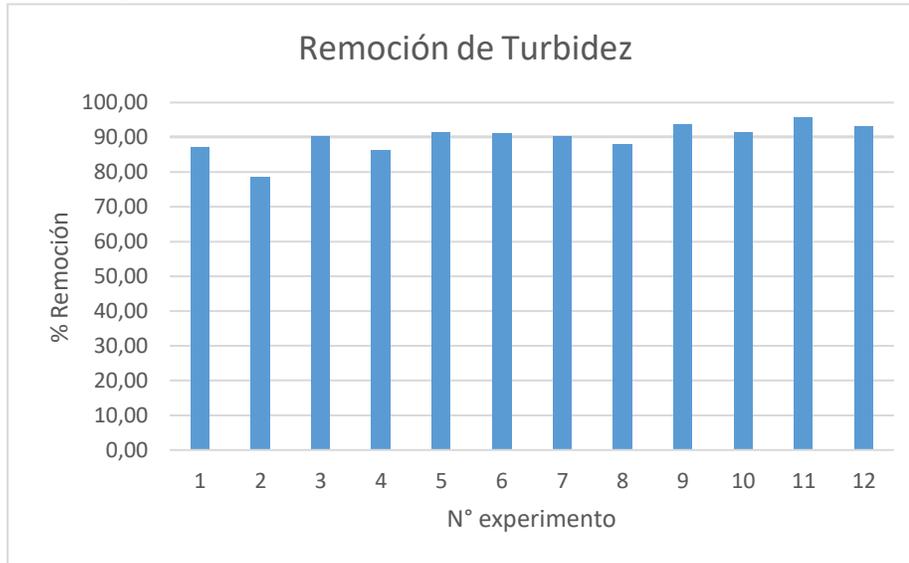
Comportamiento de la remoción de la turbidez NTU, con respecto al tiempo



El comportamiento que se observa es que a partir de 150 minutos de electrocoagulación el porcentaje de remoción de la turbidez es prácticamente constante.

Figura 13

Porcentaje de remoción de turbidez por experimento



La mayor remoción de la turbidez se observa en el experimento 11 seguido de los experimentos 12, 5 y 6, en tanto que el menor valor se observa en el experimento 2.

Tabla 26**Consumo de electrodos por experimento**

EXP.	TIEMPO (min)	VOLTAJE (V)	DISTANCIA (cm)	PESO ELEC. INICIAL (g)	PESO ELEC. FINAL (g)	CONSUMO (g)
01	120	4	2	111.8	108.5	3.30
02	120	4	4	108.5	107.7	0.80
03	120	6	2	123.4	118.6	4.80
04	120	6	4	118.6	117	1.60
05	120	8	2	132.6	127	5.60
06	120	8	4	127	123.4	3.60
07	180	4	2	117	111.8	5.20
08	180	4	4	111.8	110.5	1.30
09	180	6	2	121.6	114.2	7.40
10	180	6	4	114.2	111.8	2.40
11	180	8	2	135.4	127	8.40
12	180	8	4	127	121.6	5.40

Figura 14

Consumo del ánodo por experimento



Se aprecia mayor consumo del ánodo en el experimento 11, seguido del experimento 9 y menores consumos en los experimentos 2 y 4.

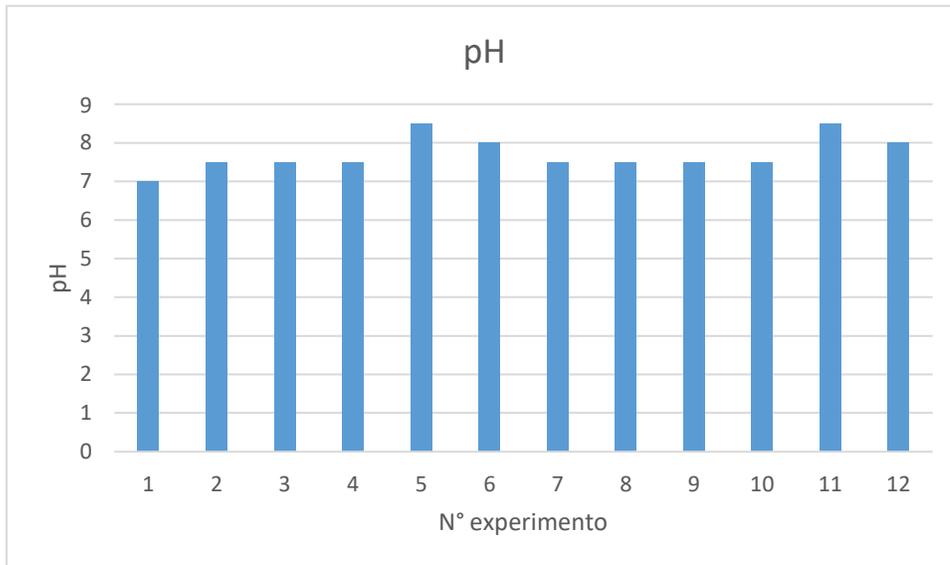
Tabla 27

Valores de pH según los experimentos

EXP.	TIEMPO (min)	VOLTAJE (V)	DISTANCIA (cm)	pH final
1	120	4	2	7
2	120	4	4	7.5
3	120	6	2	7.5
4	120	6	4	7.5
5	120	8	2	8.5
6	120	8	4	8
7	180	4	2	7.5
8	180	4	4	7.5
9	180	6	2	7.5
10	180	6	4	7.5
11	180	8	2	8.5
12	180	8	4	8.0

Figura 15

Variación del pH por experimento



Los valores del pH final en los experimentos están en el rango de 7 a 8.5 habiendo partido de un pH inicial de 3.5.

5.2. Resultados inferenciales.

5.2.1 Efecto de los parámetros en el % de remoción - DQO

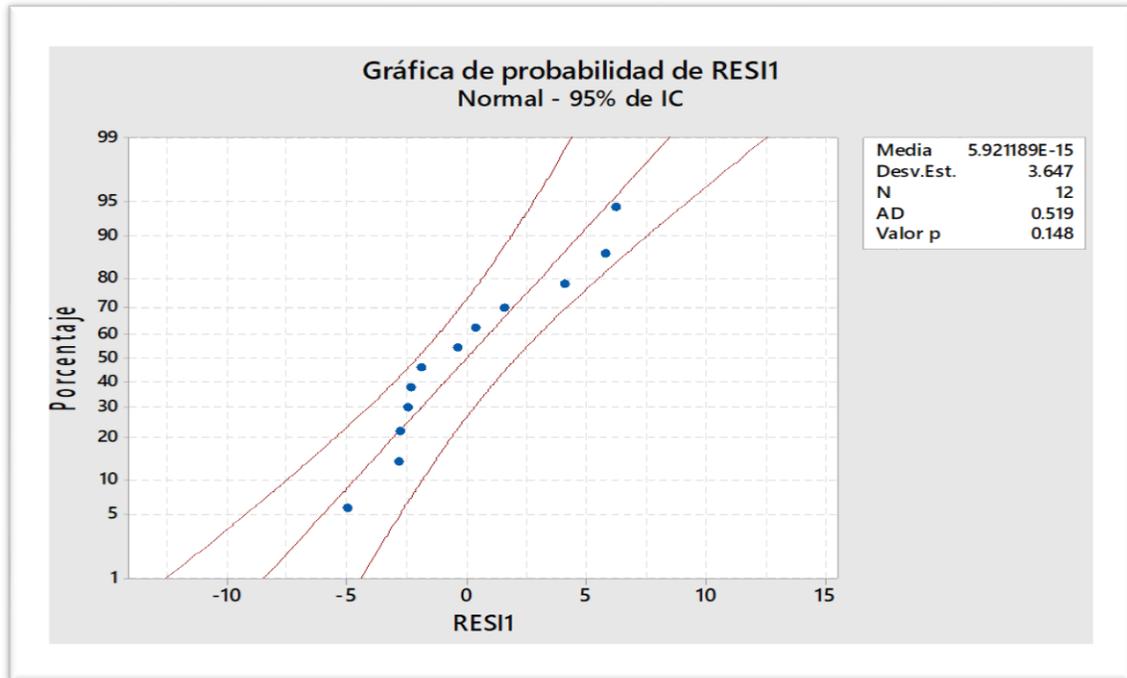
Para determinar el efecto de los parámetros en el porcentaje de remoción de la carga orgánica se realice la prueba de normalidad a fin de determinar si los datos siguen una distribución normal. Ver figura 16

Luego se determinó el efecto de los parámetros en el % de remoción-DQO, Ver figura 17.

Finalmente se determine la interacción de los parámetros por pares en el % de remoción -DQO. Ver figura 18.

Figura 16

Análisis de Diseño factorial (DQO-% Remoción) al 95% de confianza



Prueba de Normalidad

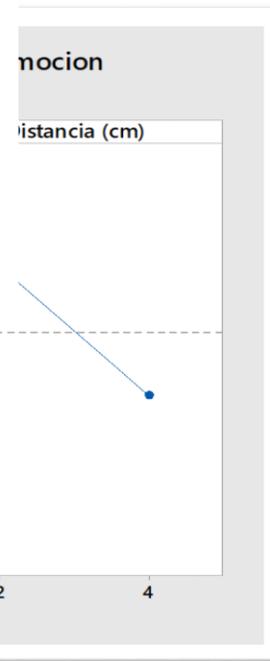
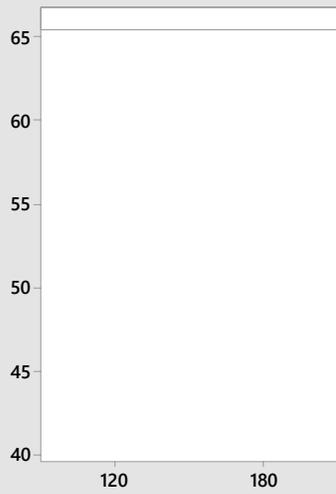
H₀: Los datos tienen una distribución normal

H₁: Los datos No tienen una distribución normal

p-value = 0.148 > 0.05

Decisión: No se rechaza la H₀

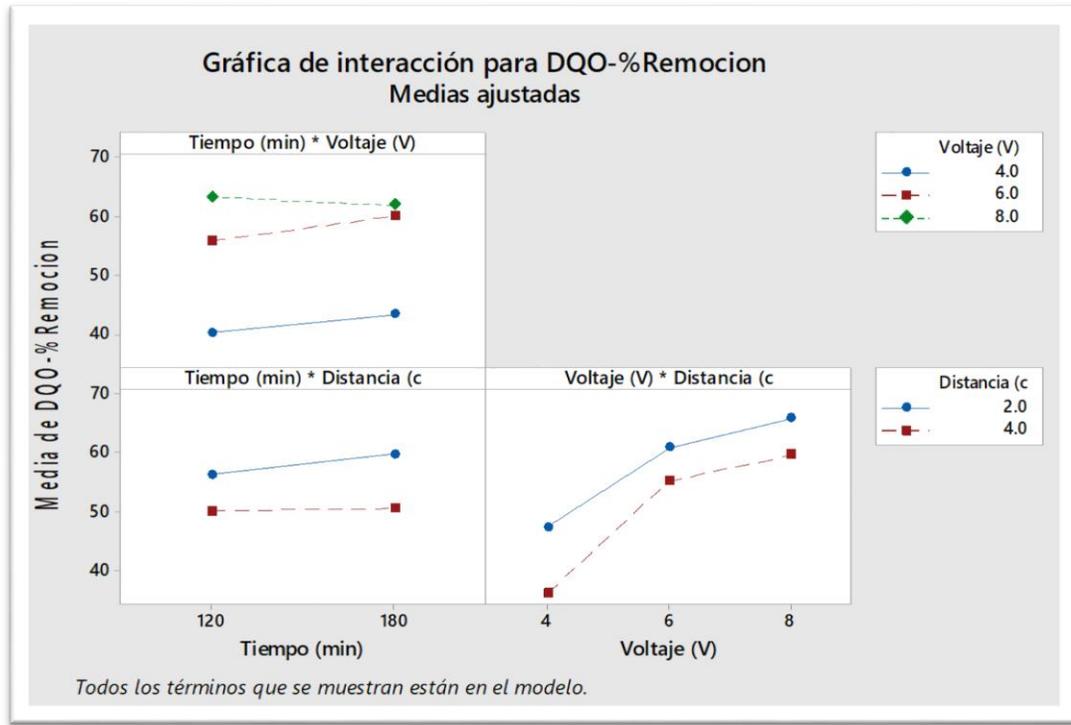
Conclusión: Con una significancia del 5% se concluye que los datos tienen una distribución normal.



La figura 17, muestra que el parámetro tiempo de electrocoagulación no tiene efecto sobre el porcentaje de remoción de carga orgánica, el parámetro voltaje tiene efecto directamente proporcional en la remoción de la carga orgánica, mientras que la distancia entre los electrodos tiene efecto inversamente proporcional.

Figura 18

Interacción de parámetros para DQO

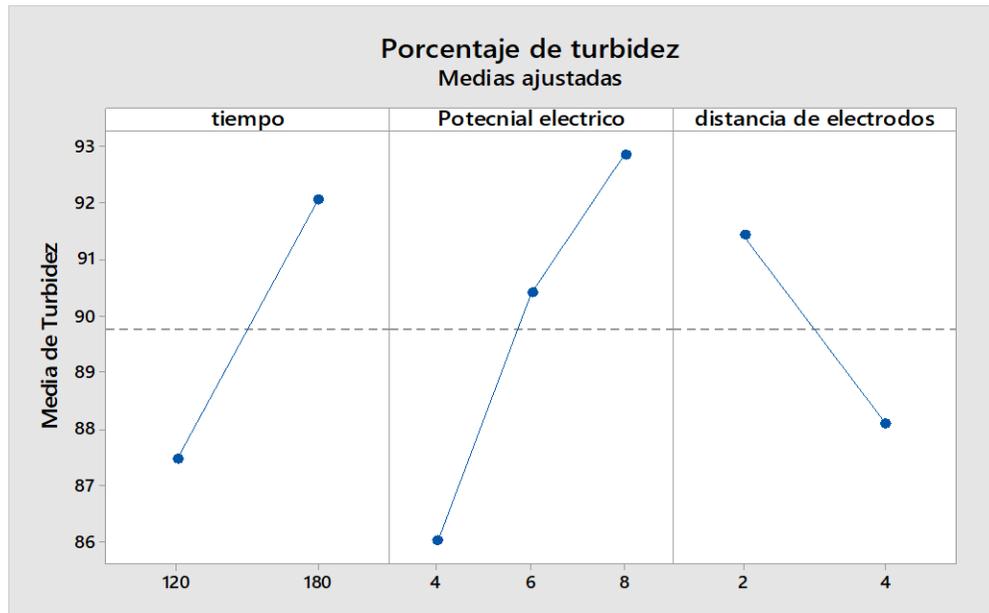


La figura 18, interacción entre parámetros para el % de remoción expresado como DQO, la interacción tiempo de remoción y voltaje muestra que la pendiente de % de remoción es positiva para los voltajes de 4 y 6 V a diferentes tiempos de electrocoagulación, manteniéndose prácticamente horizontal para 8V a diferentes tiempos de electrocoagulación. La interacción tiempo de remoción y distancia entre electrodos muestra una pendiente positiva para el % de remoción a medida que disminuye la distancia entre los electrodos y aumenta el tiempo de electrocoagulación. La interacción voltaje y distancia entre los electrodos muestra un aumento en el % de remoción conforme disminuye la distancia entre los electrodos y aumenta el voltaje.

5.2.2 Efecto de los parámetros en el % de remoción - NTU

Figura 19

Efecto de los parámetros en el % Remoción NTU



La figura 19, muestra que los parámetros tiempo de electrocoagulación y voltaje tienen efecto directamente proporcional en la remoción de la turbidez, mientras que la distancia entre los electrodos tiene efecto inversamente proporcional.

5.3. Otro tipo de resultados de acuerdo a la naturaleza del problema y la Hipótesis.

5.3.1 Caracterización del agua de conservación de la aceituna.

Se realizó la caracterización del agua de conservación de la aceituna para conocer las condiciones iniciales en el tratamiento de electrocoagulación complementado con radiación UV. Los resultados de pH, conductividad, DQO, DBO5, Turbidez se realizaron en un laboratorio certificado Analytical Laboratory E.I.R.L. Informe de ensayo N° IE-21-9627 (anexo 1) y se muestran en la tabla 28.

Tabla 28**Parámetros del agua de conservación de aceituna, valores de entrada**

<i>Ensayo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>
Ph	pH	3.5
Conductividad	μS/cm	79 700,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg BOD5/L	35 325,0
Demanda Química de Oxígeno	(mg O2/L)	75 179,3
Turbidez	NTU	45,00

Fuente: Analytical Laboratory E.I.R.L

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.

Hipótesis Específica 1

Se realizó la caracterización fisicoquímica del agua residual de conservación de la aceituna, encontrando elevados valores de demanda química de oxígeno (75 179.3 mgO₂/L), demanda bioquímica de oxígeno (35 325.0 mg BOD₅/L), turbidez (45 NTU) y conductividad (79 700 µS/cm). Con estos resultados se demuestra el alto contenido de materia orgánica lo cual necesariamente debe ser removida para evitar daños al medio ambiente.

Hipótesis Específica 2

Los parámetros adecuados de la EC en combinación con la radiación UV logran una mayor remoción de la carga orgánica presentes en las aguas residuales de conservación de la aceituna.

Los parámetros con los que se operó el equipo de electrocoagulación en combinación con la radiación UV usando ánodo de aluminio y cátodo de acero, fueron la distancia entre electrodos, el tiempo de electrocoagulación y el voltaje. Se mantuvieron constantes el flujo de recirculación y la intensidad de radiación de la lámpara UV. Las variables respuesta fueron porcentaje de remoción de carga orgánica y turbidez en unidades de DQO y NTU respectivamente.

Respecto al porcentaje de remoción de carga orgánica expresado en DQO, los parámetros de influencia de acuerdo con los resultados de los experimentos son el voltaje y distancia entre los electrodos, es decir para los tiempos de electrocoagulación de 120 min y de 180 min no se aprecia diferencias significativas, mientras que a mayor voltaje y menor distancia entre los electrodos si existe diferencias significativas en el porcentaje de remoción, en consecuencia se logran máximos porcentajes de remoción de carga orgánica – DQO 65,60% a 120 min, 8V y 2 cm de distancia entre los electrodos y de 65,94% a 180 min, 8V y 2 cm de distancia entre los electrodos.

Respecto al porcentaje de remoción de la turbidez expresado en NTU, los parámetros de influencia de acuerdo con los resultados de los experimentos son el tiempo de electrocoagulación, el voltaje y la distancia entre los electrodos, es decir a mayor tiempo de electrocoagulación, mayor voltaje y menor distancia entre los electrodos se logra mayor remoción de la turbidez, en consecuencia el mayor porcentaje de remoción de la turbidez – NTU 95.38% se logra a 180 min de electrocoagulación, 8V y 2 cm de distancia entre los electrodos.

Hipótesis general

Se comprobó de acuerdo con los resultados de los experimentos que mediante un tratamiento de electrocoagulación complementado con radiación UV se logra una remoción de la carga orgánica expresada en DQO hasta de 65,94% y remoción de la turbidez expresado en NTU hasta de 95,38% para un tiempo de electrocoagulación de 180 min, 8V y 2 cm de distancia entre los electrodos.

Comparando el pH final del tratamiento se llega a 8.5 que se encuentra dentro del rango de límite máximo permisible para efluentes de una PTAR según el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM que se muestra en la figura 3.

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares.

En la actualidad se encuentran muchas investigaciones realizando tratamientos de aguas residuales empleando el método de la EC; sin embargo el método combinado con radiación UV es relativamente nuevo, en este trabajo se obtuvo una mayor reducción de la DQO de 65.94% en contraste con el 50% de remoción obtenido por Benekos et al., (2019) a nivel laboratorio en el tratamiento de aguas residuales del procesamiento de aceitunas de mesa mediante electrocoagulación partiendo de una DQO inicial de 3000 mgO₂/L, mientras que en el presente trabajo la muestra contuvo una DQO inicial de 14900 mgO₂/L, mostrando la mejores valores de remoción con el método combinado de EC-UV.

Comparado con el trabajo de Niazmand et al.,(2019) quienes utilizaron el método de electrocoagulación con filtración para el tratamiento de aguas del proceso de

desamargado de aceituna, logrando una reducción de la turbidez de 97,93% a 15.0 mA.cm⁻² en un tiempo de 60 min usando ánodos de aluminio y sin acondicionamiento previo de la muestra, en este trabajo se logró un máximo de 95,38% de reducción de la turbidez a 5,65 A y un tiempo de 180 min utilizando ánodos de aluminio, observando también la eficiencia del ánodo de aluminio y sin previo acondicionamiento del pH de la muestra lo que condujo a un pH final de 8.5 que se encuentra en el rango de pH aceptable como límite máximo permisible.

Comparando con el trabajo de Sameh, (2010) quien utilizó un proceso fotolítico secuencial de electrocoagulación-UV en el tratamiento de aguas residuales de curtiembres para demostrar que la combinación de EC y UV es eficaz, logró una reducción de la DQO de 94,1% partiendo de una DQO inicial de 7376 mgO₂/L, en tanto que en el presente trabajo se obtuvo una reducción de la DQO de 65,94% partiendo de una DQO inicial de 14900 mgO₂/L que es prácticamente el doble de DQO.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

Los autores de la investigación nos responsabilizamos por la información emitida en el presente trabajo de investigación de acuerdo al Reglamento del Código de Ética de la Investigación de la Universidad Nacional Del Callao, Resolución de Consejo Universitario N° 260-2019-CU.

CONCLUSIONES

Se identificaron las características físico químicas de la muestra tomada en el mercado de “La Parada”, distrito La Victoria, Región Lima, obteniendo los siguientes valores: demanda química de oxígeno 75 179.3 mgO₂/L, demanda bioquímica de oxígeno 35 325.0 mg BOD₅/L, turbidez 45 NTU y conductividad 79 700 μS/cm; los cuales son muy superiores a los Valores Máximos Admisibles para aguas residuales no domésticas.

Se han establecido los parámetros de operación del equipo de electrocoagulación combinado con radiación UV para la remoción de carga orgánica presente en las aguas residuales de conservación de la aceituna, logrando porcentajes significativos de remoción a tiempos desde 120 a 180 min, potencial de 6V a 8V y distancia entre electrodos de 2 cm; se fijó la capacidad de la celda de electrocoagulación de 2 L, flujo de recirculación de 1 L/min, lámpara UV de 242 nm de longitud de onda, ánodo de aluminio y cátodo de acero. No se agregó reactivos químicos ni se realizó un tratamiento previo a la muestra.

Se logró el mayor porcentaje de remoción de la DQO en aproximadamente 65.94% y turbidez en aproximadamente 95.71% a las condiciones de 180 minutos, 8 voltios y 2 centímetros de distancia, para una concentración inicial de 14900 mg L⁻¹ y 45 NTU de DQO y Turbidez, respectivamente.

RECOMENDACIONES

Realizar estudios sobre el pretratamiento para la reducción de conductividad de aguas residuales de conservación de aceituna a fin de disminuir los efectos de aumento de la intensidad de corriente en el proceso de electrocoagulación.

El Sistema combinado de electrocoagulación combinado con UV puede integrarse con otros procesos, como la ultrafiltración y la nanofiltración, para lograr una mayor purificación. Además, el agua tratada, puede diluirse a un nivel aceptable de contaminantes y reciclarse, lo cual es significativo en términos de aspectos económicos y ambientales

Realizar mayores estudios sobre la influencia de la radiación UV en la remoción de DQO en aguas residuales.

.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Andreas Benekos, Charikleia Zampeta, Rafailaia Argyriou, Christina Economou, Irene Triantaphyllidou, Triantafyllos Tatoulis, Athanasia Tekerlekopoulou, Dimitris Vayenas. (2019). Treatment of table olive processing wastewater using electrocoagulation in laboratory and pilot-scale reactors. *El Sevier*, 38-47.
- Apaza Aquino, H. (2018). *sistema combinado electrocoagulación-filtro biológico para la remoción de carga orgánica de los efluentes lácteos*. obtenido de biblioteca agrícola nacional:
<http://190.119.243.88/bitstream/handle/UNALM/3395/apaza-aquino-hugo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Apaza Aquino, H. (2019). *Eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de materia orgánica de las aguas del rio torococha*. obtenido de revista científica de investigaciones ambientales:
<http://revistas.upsc.edu.pe/journal/index.php/RIAM/article/view/57>
- Arango Ruiz, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Lasallista de investigación*, 49-56.
- Arango-Ruiz, A. (2014). Tratamiento de aguas residuales mediante. *Journal of Engineering and technology*, 78-98.
- Chamot, E. C. (2018). *Olivos y Olivas en la historia del Perú*. Lima: Universidad Ricardo Palma.
- Condorchem Envitech. (30 de 07 de 2021). *La contaminación en el sector de la aceituna, soluciones en vías de desarrollo*. Obtenido de <https://condorchem.com/es/blog/la-contaminacion-en-el-sector-de-la-aceituna-soluciones-en-vias-de-desarrollo/>
- Cotillas, S., Cañizares, P., Martín de Vidales, M., Sáez, C., Rodrigo, M., & Llanos, J. (2014). Electrocoagulation-UV Irradiation Process for Urban Wastewater Reuse. *Chemical Engineering Transactions*, 132-138.
- Dirección Regional de Agricultura Región Tacna. (2017). *Olivo Producción y Exportación 2017*. Obtenido de Agritacna:
http://www.agritacna.gob.pe/gestores/estadistica/of_ol_estadidet_e/archivos/2778343429_4387653883.pdf
- Elvira Bocos, Enric Brillas, M. Ángeles Sanromán, Ignasi Sirés. (21 de Junio de 2016). *Electrocoagulation: simply a phase separation technology? The Case of Bronopol Compared to Its Treatment by EAOPs*. Recuperado el 21 de

Marzo de 2021, de ACS Publications:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.14>

- Holt, P., Barton, G., & Mitchell, C. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 355-367.
- León, E. M. (03 de Septiembre de 2017). *El olivo (oliva europea) en America*. Obtenido de Scielo:
https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292017000300003
- Lourdes March, Alicia Rios. (1989). *El aceite y la aceituna*. Madrid: Alianza editorial.
- Marín, A., & Osés, M. (2013). *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de aguas Residuales con el Proceso de Lodos Activados*. México: Arturo Nelson Villarreal.
- Martín, I., Betancort, J., Salas, J., Peñate, B., Pidre, J., & Sardón, N. (2006). *Guía Sobre Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas para Pequeños Nucleos de Población*. Canarias: Daute Diseño .
- Mollah, Y., Schennach, R., Parga, J., & Cocke, D. (2001). Electrocoagulation (EC) - science and applications. *Jornal Hazardous Materials*, 29-41.
- N. Adhoum, L. Monser. (2004). Decolorization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. En Process, *Process intensification* (págs. 1281-1287). Chem. Eng.
- Ramirez Indigoyen, D. (2019). Remoción de materia orgánica de aguas residuales de la industria láctea por el método de electrocoagulación, utilizando energía eólica. Huancayo, Perú.
- Razieh Niazmand, Moslem Jahani, Sara Kalantarian. (2019 de octubre de 2019). Treatment of olive processing wastewater by electrocoagulation: An effectiveness and economic assessment. *El Sevier*, 38-47.
- Ronzano, e., & dapena, J. L. (2002). *Tratamiento biológico de las aguas residuales*. diaz de santos.
- Sameh, J., Wali, A., Buonerba, A., Beljorno, V., Zarra, T., Naddeo, V., & Ksibi, M. (2020). Efficient and Sustainable Treatment of Tannery Wastewater by a Sequential Electrocoagulation-UV Photolytic Process. *Journal of Water Process Engineering*.
- Sameh, J., Wali, A., Buonerba, A., Zarra, T., Beljorno, V., Naddeo, V., & Ksibi, M. (2020). Efficient and Sustainable Treatment of Tannery Wastewater by a Sequential Electrocoagulation-UV Photolytic Process. *Journal of Water*

Process Engineering. Obtenido de
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101642>

Severiche, C., Castillo, M., & Acevedo, R. (2013). *Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Físico Químicos Básicos en Agua*. Cartagena de Indias. Obtenido de <https://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1326/index.htm>

Tsioulpasa, Dimoua, Iconomoub, Aggelisa. (2002). Phenolic removal in olive oil mill wastewater by strains of *Pleurotus* spp. in respect to their phenol oxidase (laccase) activity. En L. o. Department of Agricultural Biotechnology, *Bioresource Technology* (págs. 251-257). Grecia: Agricultural University of Athens.

V. Kuokkanen, T. Kuokkanen, J. Lassi u. (2013). Recent applications of electrocoagulation in treatment of water and wastewater-A review. En *Green Sustain* (págs. 89-121). Chem.

Wright, H., & Cairns, W. (1998). *Luz Ultravioleta*. Ontario. Obtenido de http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/agua/Luz_ultravioleta.pdf

ANEXOS

ANEXO 1: Matriz de consistencia.

ANEXO 2: Informe de Ensayo.

ANEXO 3: Fotografía de los experimentos.

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

“REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL DE CONSERVACIÓN DE LA ACEITUNA MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN COMPLEMENTADO CON RADIACIÓN ULTRAVIOLETA”

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿En qué medida el método de EC complementado con la radiación UV, logrará una mayor remoción de la carga orgánica presente en aguas residuales del proceso de conservación de la aceituna.	Determinar la remoción de la carga orgánica del agua residual de conservación de la aceituna mediante el método de electrocoagulación (EC) con la radiación UV	El método de la EC complementado con radiación UV, logra una mayor remoción de la carga orgánica presente en aguas residuales del proceso de conservación de la aceituna.	Y1= Porcentaje de remoción (%). *Que es remoción, turbidez, agua residual, carga orgánica, turbidez, EC, radiación UV, remoción	Sólidos remanentes	%	Método estándar
				DQO	mgO ₂ /L	Método estándar
				Turbidez	NTU	Turbidimetría
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿De qué manera influye el contenido de la carga orgánica en los valores de DBO, DQO y la turbidez en las aguas residuales de la conservación de la aceituna?	Determinar las características físicas químicas en el agua residual de conservación de la aceituna.	El contenido de la carga orgánica determina las características del agua residual de conservación de las aceitunas.	X ₁ = Carga orgánica en agua residual.	X _{1.1} : Características de agua residual	DQO	Método estándar
					DBO	Método estándar
					suspendidos totales (SST)	Método estándar
					Sólidos disueltos totales (SDT)	Método estándar
					Conductividad	Conductimétrica
					pH	Potenciométrico
					Turbidez	Turbidimetría
¿Cuáles serán los parámetros más adecuados de operación del equipo de electrocoagulación que permita el máximo porcentaje de remoción de la carga orgánica?	Establecer parámetros adecuados de operación del equipo de electrocoagulación que permita el mayor porcentaje de remoción de carga orgánica.	Los parámetros adecuados de la EC en combinación con la radiación UV logran una mayor remoción de la carga orgánica presentes en las aguas residuales de conservación de la aceituna.	X ₂ = condiciones de remoción por EC y radiación UV.	X2.1: Flujo de recirculación.	L/min	Lectura directa del equipo
				X2.2: Radiación UV	IUV	Lectura directa del equipo
				X2.3: Tiempo de remoción.	min	Lectura directa del equipo
				X2.4: Potencial eléctrico del equipo de EC.	V	Lectura directa del equipo
				X2.5 : Distancia entre los electrodos	cm	Lectura directa del equipo

Anexo 2: Informe de Ensayo



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-9627

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL : SOMALAB SOCIEDAD ANONIMA CERRADA
2.-DIRECCIÓN : AV. TUPAC AMARU NRO. 4784 DPTO. 4 COO. VILLA COLLIQUE LIMA - LIMA - COMAS
3.-PROYECTO : REMODELACION DE CARGA ORGANICA DEL AGUA RESIDUAL DE CONSERVACION DE LA ACEITUNA
MEDIANTE ELETROCOAGULACION
4.-PROCEDENCIA : NO ESPECIFICA
5.-SOLICITANTE : SOMALAB SOCIEDAD ANONIMA CERRADA
6.-ORDEN DE SERVICIO N° : 0000003907-2021-0001
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : NO APLICA
8.-MUESTREADO POR : EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME : 2021-08-19

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO : Agua
2.-NÚMERO DE MUESTRAS : 1
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA : 2021-08-10
4.-PERÍODO DE ENSAYO : 2021-08-10 al 2021-08-19

Gaby Moreno Muñoz
Jefe de Laboratorio
CIP N° 191207

Marco Valencia Huerta
Ingeniero Químico
CIP N° 152207

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-9627**III. MÉTODOS Y REFERENCIAS**

TIPO DE ENSAYO	NORMAL REFERENCIA	TÍTULO
Conductividad ⁽¹⁾	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B 23rd Ed. 2017	Conductivity. Laboratory Method.
Demanda Bioquímica de Oxígeno ⁽¹⁾	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 23 rd Ed. 2017	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test
Demanda Química de Oxígeno ⁽¹⁾	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23 rd Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method
Turbidez ⁽¹⁾	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B 23rd Ed. 2017	Turbidity. Nephelometric Method.

⁽¹⁾SMEWW : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

⁽¹⁾ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-9627

IV. RESULTADOS

ITEM	1			
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-21-34096			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	A-01			
COORDENADAS:	E:0770103			
UTM WGS 84:	N: 120420			
PRODUCTO:	Agua Natural			
SUB PRODUCTO:				
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA			
FECHA y HORA DE MUESTREO :	09-08-2100 12:00			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Conductividad (*)	µS/cm	NA	0,01	79 700,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg BOD5/L	0,4	2,0	35 325,0
Demanda Química de Oxígeno (*)	(mg O2/L)	2,0	5,0	75 179,3
Turbidez (*)	NTU	NA	0,01	45,00

*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *<= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *<= Menor que el L.D.M.

*-: No ensayado

NA: No Aplica

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Anexo 3: Fotografías de los experimentos

Fotografía 1

Agua residual de aceituna antes del tratamiento.



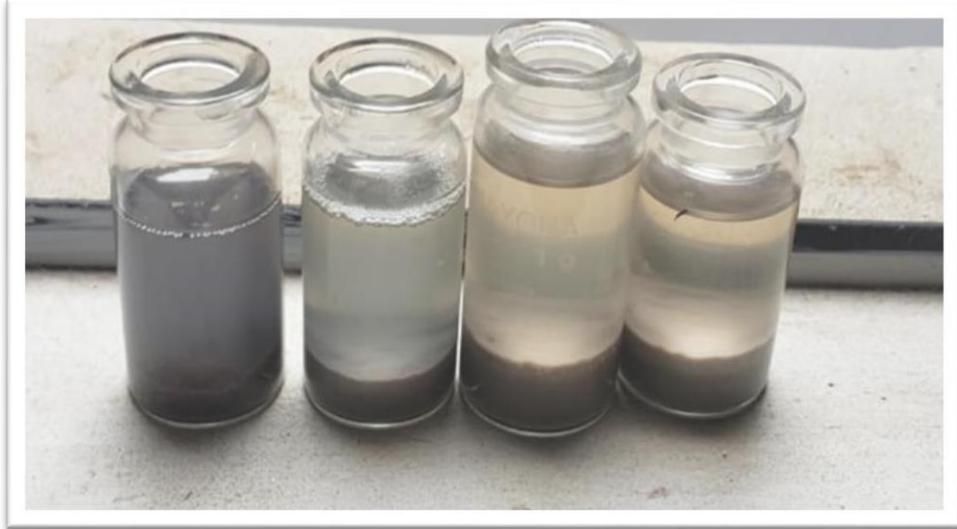
Fotografía 2

Muestra tratada con 120 minutos de recirculación , 2 cm de distancia y 4 Voltios.



Fotografía 3

Muestra tratada con 180 minutos de recirculación , 2 cm de distancia y 8 Voltios.



Fotografía 4

Montaje de sistema combinado de electrocoagulación con radiación UV



Fotografía 5

Muestra tratada con 120 minutos de recirculación , 2 cm de distancia y 6 Voltios.



Fotografía 6

Muestra diluida para medición de DQO



Fotografía 7

Toma de valores de turbidez de la muestra



Fotografía 8

Fuente de poder regulable de 10A (de 0 a 30 V)



Fotografía 9

Filtrado de la solución, para la medición de parametros.



Fotografía 10

