

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
ESCUELA DE POSGRADO

UNIDAD DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



“REMOCIÓN DE SOLIDOS TOTALES DISUELTOS Y TURBIDEZ MEDIANTE
ELECTROCOAGULACIÓN Y OZONIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE
DESTILERÍA”

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN INGENIERÍA
QUÍMICA

FANNY BLAS RODRÍGUEZ.

ROSAURA FRANCISCA CONISLLA
REYMUNDO.

DNI: 42142245

Callao, 2021

PERÚ

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO

MIEMBROS DEL JURADO

Dr. LUIS AMÉRICO CARRASCO VENEGAS	PRESIDENTE
Dr. OSCAR JUAN RODRÍGUEZ TARANCO	SECRETARIO
Mg. PABLO BELIZARIO DÍAZ BRAVO	VOCAL
Mg. CARLOS ERNESTO ANGELES QUIROLO	VOCAL
Dr. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA	ASESOR

N° de Libro: 01

N° de Acta: 032-2021-UPG-FIQ-V

Fecha de aprobación de tesis de sustentación: 14 de diciembre de 2021

Resolución del Comité Directivo: N°115-2021-CD-UPG-FIQ.

DEDICATORIAS

A Dios quién me dio la fortaleza necesaria para superar los obstáculos que se presentan en la vida y me permitió concluir con éxito esta investigación.

A mis padres por su apoyo incondicional y sus valiosos consejos, quienes con su ejemplo me enseñaron a ser una mejor persona y me enseñaron a luchar por mis sueños, a mi hermana July quien siempre estuvo apoyándome día a día.

Fanny Blas Rodríguez.

A mis padres por su gran amor, apoyo incondicional, por creer en mí y por enseñarme que la culminación de una meta es el inicio de algo más grande.

Rosaura Francisca Conislla Reymundo

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres y toda mi familia por su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

A nuestro Asesor por su paciencia y compromiso con el desarrollo de la presente investigación.

Al Laboratorio FAINGENIEROS SAC por prestar sus instalaciones para realizar todas las pruebas de laboratorio durante todo el desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
INTRODUCCION.....	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	10
1.2 Formulación del problema	11
1.2.1 Problema General	11
1.2.2 Problemas específicos	11
1.3 Objetivos de la Investigación	12
1.3.1 Objetivo general	12
1.3.2 Objetivos Específicos	12
1.4 Limitantes de la investigación	12
II: MARCO TEÓRICO	13
2.1. Antecedentes.....	13
2.1.1. Internacionales:.....	13
2.1.2. Nacionales	14
2.2 Bases Teóricas.....	17
2.2.1 Vinaza.....	17
2.2.2 Electrocoagulación.....	17
2.2.3 Mecanismo de Reacciones	18
2.2.4 Ley de Faraday	19
2.2.5 Tratamiento de la vinaza por electrocoagulación	19
2.2.6 Conexiones Eléctricas.....	20
2.3. Conceptual	20

2.3.1	Aguas Residuales	20
2.3.2	Aguas Residuales en Destilería.....	20
2.3.3	Electrocoagulación.....	21
2.3.4	Factores que afectan el proceso de la electrocoagulación	21
2.3.5	Ozonificación	23
2.3.6	Mecanismo de Remoción de Contaminantes.....	24
2.3.7	Ventajas de la electrocoagulación	25
2.4.	Definición de Términos básicos	25
III:	HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	27
3.1.	Hipótesis.....	27
3.1.1.	Hipótesis General.....	27
3.1.2.	Hipótesis Específicas	27
3.2.	Definición Conceptual de Variables.	27
3.2.1.	Operacionalización de las Variables.....	28
IV:	DISEÑO METODOLÓGICO.....	29
4.1.	Tipo y diseño de Investigación	29
4.1.1	Tipo de Investigación	29
4.1.2	Diseño de la Investigación.....	29
4.1.3	Etapas de la Investigación.....	30
4.2.	Método de Investigación.....	31
	EQUIPO EXPERIMENTAL	31
4.3.	Población y muestra	35
4.4.	Lugar de Estudio y periodo desarrollado	36
4.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	36
4.5.1	Técnica	36
4.5.2	Instrumentos	37

4.6. Análisis y Procesamiento de Datos.....	38
V: RESULTADOS	38
5.1. Resultados Descriptivos	39
5.2 Resultados Inferenciales.....	61
VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	62
6.1. Contrastación y demostración de la Hipótesis con los resultados.	62
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	65
6.3. Responsabilidad Ética de acuerdo con los reglamentos vigentes.	66
CONCLUSIONES	67
RECOMENDACIONES	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS.....	74
Anexo 1: Matriz de consistencia.....	75
Anexo 2 : Fotografías de la Prueba Experimental	77
Anexo 3: Equipos y Materiales.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables	28
Tabla 2 Matriz de Experimento.....	30
Tabla 3 Análisis Físicoquímicos y Biológicos del Agua Residual Inicial.....	39
Tabla 4 Concentraciones de sustancias químicas en la vinaza	39
Tabla 5 Resultados Experimentales de las pruebas, según nuestro Diseño Experimental	40
Tabla 6 Análisis Físicoquímicos Del Agua Residual Final	40
Tabla 7 Condiciones Iniciales del Efluente pH, voltaje, Conductividad, DQO, Turbiedad, Solidos suspendidos totales (V=12 y t=100min).....	46
Tabla 8 Condiciones Iniciales del Efluente pH, voltaje, Conductividad, DQO, Turbiedad, Solidos suspendidos totales (V=12 y t=150min).....	46
Tabla 9 Condiciones Iniciales del Efluente pH, voltaje, Conductividad, DQO, Turbiedad, Solidos suspendidos totales (V=12 y t=200min).....	47
Tabla 10 Regresión factorial general: Y1 vs. X1; X2.....	62
Tabla 11 ANOVA para el modelo de primer orden-Análisis de Varianza	63
Tabla 12 Resumen del modelo	63
Tabla 13 Coeficientes	63
Tabla 14 Matriz de consistencia	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Efecto del potencial eléctrico en la degradación de DQO en función del tiempo.....	42
Figura 2 Efecto del potencial eléctrico en el porcentaje de remoción de DQO en función del tiempo	42
Figura 3 Efecto del potencial eléctrico en la degradación de DQO en función del tiempo.....	43
Figura 4 Efecto del potencial eléctrico en el porcentaje de remoción de DQO en función del tiempo	43
Figura 5 Porcentaje de Remoción DQO para cada Diseño de Experimentos.	44
Figura 6 Ln de la Concentración de DQO en función del tiempo	44
Figura 7 Ln de la Concentración de DQO en función del tiempo	45
Figura 8 Variación de la Turbiedad en Función del Tiempo (12v-100min).....	47
Figura 9 Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (12v-100min).....	48
Figura 10 Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (12v-150min).....	49
Figura 11 Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (12v-200min).	49
Figura 12 Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (12v-200min).....	50
Figura 13 Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (18v-100min).	50
Figura 14 Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (18v-100min).....	51
Figura 15 Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (18v-150min).	51
Figura 16 Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (18v-150min).....	52
Figura 17 Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (18v-200min).	52
Figura 18 Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (18v-200min).....	53
Figura 19 Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (24v-100min).	53
Figura 20 Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (24v-100min).....	54

Figura 21 Variación de La Turbiedad Respecto al Tiempo A (24v-150min).	55
Figura 22 Porcentaje de Remoción de la Turbiedad en Función del Tiempo (24v-150min).....	56
Figura 23 Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (24v-200min).	56
Figura 24 Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (24v-200min).....	57
Figura 25 Comportamiento de los Sólidos Totales en Función del Tiempo.....	57
Figura 26 Comportamiento de los Sólidos Totales en Función del Tiempo.....	58
Figura 27 Comportamiento de los Sólidos Totales en Función del Tiempo.....	58
Figura 28 Comportamiento de la Intensidad, Ph, T°C en Función del Tiempo.....	59
Figura 29 Comportamiento de la Intensidad, Ph, T°C en Función del Tiempo.....	59
Figura 30 Efectos principales para Y1 (% de Remoción de DQO).....	59
Figura 31 Gráfica de Efectos Principales para Y2 (% de remoción de la Turbidez) 65	
Figura 32 Gráfica de Medias para Y3 (% de Remoción de Sólidos Totales).....	60
Figura 33 Gráfica de Medias para Y4 (Energía consumida)	61
Figura 34 Desarrollo de pruebas experimentales en el Laboratorio FAINGENIEROS SAC.....	77- 79
Figura 35 Pruebas experimentales midiendo el DQO, SST y TURBIDEZ de la Vinaza.....	80-81
Figura 26 Corridas experimentales (EC) en los diversos tiempos.....	47-57
Figura 27 Corridas experimentales (EC) en los diversos tiempos.....	47-57
Figura 28 Diversas corridas en tiempo y voltaje	47-57
Figura 39 Pruebas con Viales.....	80
Figura 40 Colorímetro.....	80
Figura 41 Equipo de Ozono empleado.....	81

RESUMEN

En este trabajo de investigación, se utilizó el proceso híbrido de electrocoagulación / ozonificación para el tratamiento de aguas residuales de destilería. Se estudió el efecto de los parámetros de operación como potencial eléctrico y tiempo de electrocoagulación sobre la influencia de la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Totales y la Turbiedad de las aguas residuales de destilería. Para el desarrollo experimental se utilizó el diseño factorial de dos factores a tres niveles, potencial eléctrico de 12,18 y 24 voltios y tiempo de operación de 100, 150 y 200 min.

Como resultado se obtuvo una remoción de turbiedad entre el 58-88%, SST remoción entre 53-91% y en DQO remoción entre 49-83.7%, para un potencial eléctrico de 12V en un tiempo de 100 min. La investigación realizada demostró que la coagulación electroquímica es una técnica muy eficiente para emplearse para el tratamiento de aguas residuales de destilería.

Palabra clave: Electrocoagulación, Ozonificación, agua residual de destilería (vinaza), Demanda Química de Oxígeno, Sólidos Totales y Turbiedad.

ABSTRACT

In this research work, the hybrid electrocoagulation / ozonation process was used for the treatment of distillery wastewater. The effect of operating parameters such as electric potential and electrocoagulation time on the influence of removal of Chemical Oxygen Demand (COD), Total Solids and Turbidity of distillery wastewater was studied. For the experimental development, the factorial design of two factors at three levels was used, electric potential of 12, 18 and 24 volts and operating time of 100, 150 and 200 min.

As a result, turbidity removal between 58-88% was obtained, SST removal between 53-91% and in COD removal between 49-83.7%, for an electric potential of 12V in a time of 100 min. Research carried out showed that electrochemical coagulation is a very efficient technique to be used for treating distillery wastewater.

Key word: Electrocoagulation, ozonation, distillery waste water (vinasse), Chemical Oxygen Demand, Total Solids and Turbidity.

INTRODUCCIÓN

La vinaza Conocido como un efluente, presenta una coloración oscura, olor penetrante, pH ácido y concentraciones moderadas de potasio y nitrógeno (Pérez & Garrido, 2006; Korndörfer,2009). La vinaza es un subproducto que se obtiene en el proceso de producción, se caracteriza por el alto contenido de materia orgánica y sales, asociada a una elevada demanda bioquímica de oxígeno, convierten a la vinaza en un contaminante de las fuentes de agua, ya que bloquea los fotosistemas de las algas y agota el oxígeno disuelto, (Montenegro, 2009).

El método de electrocoagulación utilizado para la Remoción de Solidos Totales Disueltos y Turbidez, es una técnica que se produce por el exceso de electrones, generado por la diferencia de potencial eléctrico aplicado entre electrodos, en nuestro caso por disolución en placas de aluminio, dando lugar a un ánodo y dos cátodos, el cual produce liberación de burbujas de hidrógeno, produciendo desestabilización de los contaminantes en la vinaza, asimismo con ayuda del proceso de Ozonificación el cual produce oxidación avanzada que contribuye a la degradación de contaminantes orgánicos.

El presente trabajo de tesis se enfoca en el proceso de electrocoagulación y ozonificación en Aguas Residuales de Destilería, teniendo como objetivo reducir mediante oxidación química degradar DQO/DBO, utilizando un equipo que opera en continuo, no se utiliza ninguna cantidad de reactivo químico y se puede aplicar también para la remoción de contaminantes como color y turbidez.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

La pandemia del COVID-19 ha generado un incremento exponencial en el uso de alcohol etílico, producto que se obtiene principalmente por fermentación de la caña de azúcar. Este incremento trae como consecuencia la generación de más volúmenes de efluentes nocivos como la vinaza, que genera 12 - 15 litros de este por litro de alcohol etílico (Ibarra & León, 2018) o 3 litros por litro de pisco. Sus principales características son tener un pH promedio de 3,5 , DBO5 entre 25 000 a 30 000 mg/L y niveles importantes de potasio, nitrógeno, fósforo, calcio , y magnesio. Su alto contenido de materia orgánica convierte a la vinaza en un contaminante de las fuentes de agua, ya que bloquea los fotosistemas de las algas y agota el oxígeno disuelto, siendo ambas condiciones esenciales para la vida acuática (Montenegro, 2009).

Una técnica alternativa innovadora con muy buenos resultados es la electrocoagulación acoplada con una corriente de ozono.

En la electrocoagulación, el coagulante es formado in situ por disolución de iones aluminio del electrodo de sacrificio. La generación de iones aluminio tiene lugar en el ánodo y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrógeno las cuales ayudan a la flotación de los flóculos formados. Los estudios realizados hasta el momento demuestran que se pueden conseguir mejores resultados en la remoción de contaminantes, con ventajas económicas y ambientales sobre los métodos convencionales de eliminación de materia orgánica; se dan al inducir corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas de Aluminio, formando productos coagulantes; que desestabilizan las partículas contaminantes presentes (Holt, 2005). Mediante este trabajo experimental se propone construir un módulo y evaluar las variables de operación para alcanzar un alto porcentaje de remoción de la turbidez y los sólidos totales disueltos a partir de vinaza que proviene de la producción de licor de manzana en el distrito de Santa Cruz de Flores, Provincia de Cañete departamento de Lima.

Los estudios realizados hasta el momento demuestran que se pueden conseguir mejores resultados en la remoción de contaminantes, con ventajas económicas y ambientales sobre los métodos convencionales de eliminación de materia orgánica; se dan al inducir corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas formando productos coagulantes; que desestabilizan las partículas contaminantes presentes (Holt, 2005). Hoy en día que todas las empresas buscan reducir sus costos de operación y a la vez ser amigables con el medio ambiente, especialmente ahora que el sector Industrial ha sido duramente golpeado económicamente por la pandemia del Covid-19, planteamos la presente investigación con la finalidad de realizar el diseño de un equipo a nivel de laboratorio para el tratamiento de vinaza en base a la caracterización fisicoquímica, de esta manera se podrá estudiar el comportamiento de los diferentes parámetros involucrados en la remoción de contaminantes. El desarrollo en si del proyecto nos permitirá lograr un conocimiento claro y preciso de las diferentes variables de diseño, además de la obtención de datos experimentales y cálculos de ingeniería pertinentes para la correcta validación del equipo en cuestión.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema General

¿Cómo remover los sólidos totales disueltos y la turbidez mediante electrocoagulación y ozonificación en las aguas residuales de destilería?

1.2.2 Problemas específicos

¿Cuáles son las características físico químicas del agua residual de destilería para seleccionar las mejores condiciones de remoción?

¿Cuáles serán los parámetros de operación más adecuados del proceso de electrocoagulación y ozonificación para lograr altos valores de remoción de sólidos totales, turbidez y demanda química de oxígeno presente en el agua residual de destilería?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo general

Determinar el grado de remoción de los sólidos totales disueltos y la turbidez mediante el proceso de electrocoagulación y ozonificación presentes en las aguas residuales de destilería.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1.-Analizar los parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua residual de destilería.
- 2.- Determinar los parámetros más adecuados de operación del equipo de electrocoagulación y ozonificación para lograr altos valores de remoción de sólidos totales y turbidez presente en el agua residual de destilería.

1.4 Limitantes de la investigación

De acuerdo con (Milla Figueroa, 2019) el empleo de la electrocoagulación es una técnica ampliamente utilizada en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de una amplia gama de industrias. La ventaja de esta tecnología es que reduce metales, sólidos coloidales y contaminantes inorgánicos solubles presentes en medios acuosos, donde la corriente eléctrica con los electrodos produce especies poliméricas altamente cargadas como los hidróxidos de metal, por el cual se induce la precipitación de ciertos metales y sales.

Los limitantes en la Electrocoagulación es que el electrodo de sacrificio se consume por acción de la corriente eléctrica debido a su oxidación.

Otro limitante de estos sistemas es el consumo de energía eléctrica.

Se requieren aguas con mayor contenido de electrolitos, dado que la electrocoagulación se manifiesta en mayor grado en aguas con mayor conductividad.

Para el proceso de Ozonificación las limitantes son el conocer las condiciones óptimas como el pH y el tiempo, así como la concentración.

II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales:

Hing y Ojeda (2008) en su investigación sobre "Tratamiento de la Vinaza por Electrocoagulación" concluyen que el electrodo es la variable más significativa ya que influye en la cantidad del sólido que se obtiene, esto después de analizar las 3 variables independientes como el tipo de electrodo, intensidad de corriente y tiempo de residencia. De su análisis comparativo entre el electrodo de Fe y Al determinaron que el aluminio es el que proporciona mayor rendimiento y la relación de intensidad de corriente con los sólidos obtenidos es directamente proporcional. Para la evaluación se desarrolló un diseño de experimentos factorial 2^3 y para eliminar la temperatura como variable significativa, se diseñó un serpentín el cual logra mantener la temperatura constante durante todo el proceso.

Ibarra Camacho (2019) en su investigación sobre "Caracterización Físicoquímica de las vinazas de Destilerías" desarrolladas en las Destilería "Argeo Martínez" y "Arquímedes Colina" de las Provincias Guantánamo y Granma respectivamente. Lograron determinar los parámetros físicoquímicos clásicos para evaluar el poder contaminante de la vinaza, datos que se compararon con la Norma Cubana 521:2007. Como resultado de la investigación obtuvieron los parámetros de DQO, conductividad eléctrica, pH, temperatura, nitrógeno total y contenido de hierro verificando que se encuentran por encima de los límites máximos permisibles. Demostrando que la disposición final de este residual a las aguas terrestres y marítimas es inadecuada sin un previo tratamiento.

Asaithambi et al. (2012) con su investigación publicada sobre “Electrocoagulación asistida por ozono para el tratamiento de efluentes de destilería” demostraron que la técnica híbrida era más eficaz que la electrocoagulación y la ozonización por sí solas. Estudiaron la influencia de parámetros operativos como la concentración inicial de DQO, el pH inicial, la densidad de corriente, la distancia entre electrodos y la combinación de electrodos en el porcentaje de color y eliminación de DQO y también en el consumo de energía para el tratamiento de efluentes de destilería. Como resultado concluyeron que el porcentaje de eliminación de DQO aumentó del 45% al 92% con un aumento en la densidad de corriente. Se encontró que la máxima eliminación de la eficiencia de DQO era del 83% a una densidad de corriente de 3 Adm. -2 , concentración inicial de DQO 2500 ppm, pH inicial 6 y caudal de mezcla de gas ozono 15 L min^{-1} requiriendo un consumo de energía de 5,1 kW hm^{-3} . La eliminación completa del color se observó dentro de las 2 h del tiempo de proceso en todas las condiciones experimentales.

Aristizábal Alzate (2015) en su artículo de investigación “Caracterización físico-química de una vinaza resultante de la producción de alcohol de una industria licorera, a partir del aprovechamiento de la caña de azúcar” tuvo como propósito ilustrar los resultados de la caracterización físico-químico de vinazas a partir del aprovechamiento de la caña de azúcar. De los análisis presentan que la humedad que posee la Vinaza es cerca de un 91% y bajo contenido de Solidos Totales en la muestra. El estudio demuestra que los parámetros como la temperatura de ebullición, la densidad, entre otros, son de importancia para el tema de vertimientos líquidos, según la legislación colombiana, así como su pH y su curva de titulación ya que permiten conocer aspectos importantes a tener en cuenta si se desean utilizar tratamientos biológicos, de oxidación química y/o físicos (Evaporación/Concentración), que disminuyan el impacto ambiental negativo y potencial de contaminación que tienen las vinazas.

2.1.2. Nacionales

Salas Vizcarra (2019): En su Tesis de Maestría sobre “Optimización de los Parámetros Operacionales en Procesos Híbridos de Electrocoagulación y Ozono en

la Remoción de la Turbiedad en Efluentes provenientes de aguas grises, en la provincia de Huánuco” estudió los efectos de varios parámetros entre ellos la demanda química de oxígeno (DQO), SST y la turbiedad del agua gris. El tipo de investigación fue cuantitativo experimental por la manipulación de las variables, apoyándose después de métodos estadísticos, el diseño de investigación consistió en hacer una serie de experimentos para obtener un efecto sobre la variable saliente. Trabajó con los valores de intensidad de corriente en 0.5, 1.5 y 2.4 amperios; dando como resultado con la intensidad de corriente de 0,5 amperios, una turbiedad de 62.22 %, en SST 85.44% y en DQO 49.59 %. Con la aplicación de la intensidad de corriente de 1.5 amperios dio como resultado la reducción de turbiedad a un 82.64 % en SST, 91.20% y en DQO 68.29 %, que está cumpliendo con la normativa establecida. Con la aplicación de la intensidad de corriente de 2.4 amperios dio como resultado la reducción de turbiedad a un 98.93 % en SST, 94.88 % y en DQO 89.43 %, que está cumpliendo con la normativa establecida. La investigación realizada demostró que la Electrocoagulación es una técnica muy eficiente para emplearse para el tratamiento del agua.

Villanueva Salazar (2020) En esta investigación de tesis, se ejecutó la “ Optimización en la eliminación de la turbiedad utilizando el método Taguchi en aguas residuales de lavado de autos mediante el módulo de electrocoagulación asistida con procesos de oxidación avanzada”. El experimento se llevó acabo en un módulo de tipo batch re circulante (electrocoagulación/ozono/rayos ultravioleta), con el objetivo de optimizar la reducción de la turbiedad para ello se utilizó la metodología Taguchi, se estudiaron cinco factores: voltaje, tiempo de tratamiento, pH, distancia entre electrodos y flujo de alimentación cada uno de ellos con 4 niveles operacionales. Los resultados demuestran que empleando la tecnología se logró optimizar la reducción de la turbiedad llegando a 98.93%, trabajadas a condiciones operacionales de voltaje (10 V), tiempo de tratamiento (50 min), pH (5), distancia entre electrodos (1 cm) y flujo de alimentación (6 L/M), también se logró reducir la DQO (61.53%), DBO5 (44.23%), A y G (95.81%) y SAM (70.28%), aumentando la biodegradabilidad de 0.152 a 0.22.

Aguilar et al. (2018) en el estudio de su tesis sobre el “Efecto de la intensidad eléctrica y el tiempo en la disminución de la materia orgánica y turbidez en la electrocoagulación de las aguas residuales de la ciudad universitaria UNT” evaluaron el efecto de la intensidad de corriente eléctrica y tiempo de electrocoagulación en la disminución de materia orgánica y turbidez de las aguas residuales producidas en la ciudad universitaria de la Universidad Nacional de Trujillo (UNT), analizaron el agua residual antes del tratamiento de electrocoagulación y se determinó en promedio 508 mg O₂/L de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y 165 Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). Los niveles de las variables utilizadas fueron 1, 2,5 y 4 amperios (A) de intensidad y tiempos de 15, 30 y 60 minutos. Los resultados experimentales indicaron una disminución máxima en la cantidad de materia orgánica y turbidez en promedio de 81% y 76% respectivamente, aplicando 4 amperios de intensidad de corriente eléctrica durante 60 minutos.

Gamero Quijano (2011) en su artículo de investigación sobre “Remoción de bacterias patógenas del agua mediante electrocoagulación con ánodos de aluminio”, nos sirve de referencia ya que en nuestra investigación trabajamos con electrodos de aluminio tanto para los ánodos y cátodos. Los estudios del autor demuestran que la desinfección electroquímica mediante la técnica de electrocoagulación puede remover una amplia variedad de microorganismos, virus y algas. Los factores de pH, concentración de aluminio, densidad de corriente y tiempo de electrólisis fueron estudiados para la optimización del proceso. La eficiencia de la remoción de microorganismos patógenos fue evaluada utilizando cultivos de 3 tipos de bacterias obteniendo la relación Aluminio-Bacteria para futuros trabajos de investigación. Este antecedente se escogió para evaluar el comportamiento de los ánodos de aluminio con otras técnicas alternativas y poder verificar su comportamiento respecto a la remoción de los contaminantes.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Vinaza

Se conoce con el nombre de vinaza o mosto de destilería al residual que se obtiene del proceso de la obtención industrial de alcohol etílico por fermentación, usando la caña de azúcar como fuente de carbono (Larrahondo, 2009).

La vinaza se caracteriza por tener demanda biológica de oxígeno (DBO) muy alta, con valores entre 35.000 y 60.000 mg L⁻¹ y demanda química de oxígeno (DQO) entre 70.000-150.000 mg L⁻¹ (Madejón et al., 2001a,b; Nandy et al., 2002; Sangave et al., 2007; Robles-González et al., 2012). Posee un contenido elevado de sales minerales que se reflejan en altos valores de conductividad eléctrica y de porcentaje de cenizas (Ahmed et al., 2013).

La vinaza posee características fisicoquímicas distintivas y aunque su composición química puede variar en función de la materia prima y del proceso de destilación, en general presentan pH ácido, altos contenidos de materia orgánica, potasio y calcio, así como cantidades moderadas de nitrógeno y fósforo (Alfaro & Alfaro, 1996; García & Rojas, 2006; Montenegro et al., 2009; Vargas, 2014).

2.2.2 Electrocoagulación

La técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente utilizados están el hierro y el aluminio. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes (Arango, 2008).

La electrocoagulación es una tecnología impulsada electroquímicamente que produce especies coagulantes in situ a partir de la electrodisolución de ánodos de sacrificio, generalmente hechos de aluminio o hierro (García-Segura, S.; Eiband, 2017). Un reactor de Electrocoagulación está compuesto de una celda electrolítica, un ánodo y un cátodo. El ánodo y el cátodo constan de placas de metal, y el ánodo se reconoce como un "electrodo de sacrificio". Los electrodos suelen estar hechos del mismo o de diferentes materiales, como por ejemplo las placas de aluminio,

cuando se han utilizado estos electrodos, el aluminio se disuelve y sirve como agente coagulante, lo que lleva a la liberación de gas hidrógeno en el cátodo representado en las ecuaciones (1) y (2). Durante la disolución del aluminio en el ánodo, se generan diferentes especies de aluminio acuático. Estos tipos de aluminio actúan como coagulantes al combinarse con contaminantes para producir hidróxidos insolubles, que pueden eliminarse de la solución (Bazrafshan, E .; Ownagh, KA,2012).



2.2.3 Mecanismo de Reacciones

En los electrodos ocurren reacciones que proporcionan iones positivos y negativos, el ánodo provee iones metálicos por lo que se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse. (Restrepo, 2006).

De acuerdo con (Arango, 2008) la generación de iones metálicos tiene 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. 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.

Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes:

En el ánodo:



En el Cátodo:



El $Al(OH)_3(s)$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes (Restrepo, 2006).

2.2.4 Ley de Faraday

Faraday ejecutó varios estudios cuantitativos concerniente a la íntima relación que existe entre la cantidad de electricidad que atraviesa una solución. Estos postulados relacionan la cantidad de electricidad consumida o generada durante un proceso electroquímico con la masa de los reactivos presentes (Arbeláez, 2005). Primera ley de Faraday Varios metales como el Na, Mg o Al se producen industrialmente por electrólisis de sus sales fundidas.

En el proceso se consumen grandes cantidades de electricidad, que pueden relacionarse matemáticamente con la cantidad de producto formado sobre los electrodos de la celda electrolítica. Por ejemplo, en la electrólisis del NaCl, el ion sodio se reduce según la reacción: Así, un electrón es requerido para reducir un ion de sodio.



2.2.5 Tratamiento de la vinaza por electrocoagulación

La Electrocoagulación de la vinaza, se realiza debido a que el sólido que se separa queda suspendido o disuelto y este es el que constituye como el contaminante fundamental del residuo, el cual se clasifica como inhibidor de la corrosión.

Los inhibidores son sustancias que añadidas en pequeñas cantidades al medio corrosivo disminuyen apreciablemente la velocidad de corrosión. Un ejemplo lo constituye la industria alcoholera, que al verter sus efluentes (vinaza), trae consigo un alto poder contaminante en todos los ecosistemas donde es vertido. La vinaza es un residual muy agresivo, entre las características más relevantes se destaca el pH ácido, alta carga orgánica DQO, DBO,color marrón, alta temperatura y la presencia

de compuestos nitrogenados entre los que se destacan: proteínas, aminoácidos y vitaminas.

2.2.6 Conexiones Eléctricas

Un reactor de electrocoagulación puede construirse mediante una celda con un ánodo y un cátodo. Cuando se conectan a una fuente de poder, el material que está hecho en el ánodo se corroe electroquímicamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo es sujeto a una reducción y generación de H⁺ (microburbujas) que son los que suspenden los coágulos (Barrera, 2014).

2.3. Conceptual

2.3.1 Aguas Residuales

El consumo masivo de agua en la actualidad (Córdoba, María Alejandra; Del Coco, Valeria Fernanda; Basualdo, Juan Angel, 2010) que genera como resultado la contaminación de las mismas, ha llegado a preocupar a los investigadores y a adoptar nuevos procesos y tecnologías unitarias para el tratamiento de aguas residuales (Rubio Clemente, Ainhoa; Chica Arrieta, Edwin Lenin; Peñuela Mesa, Gustavo Antonio, 2013), como una manera de retribuir al medio ambiente (González Álvarez, 2002), y devolverle en mejores condiciones el agua utilizada.

De la revisión del estudio efectuado por SUNASS (2008), se desprende que el 70% de las aguas residuales en el Perú no tienen tratamiento de aguas, alguno de las 143 plantas de tratamiento residual que existen en el Perú, solo el 14% cumplen con la normatividad vigente para el cabal funcionamiento de estas; de acuerdo al Plan Nacional de Saneamiento 2006- 2015, existe un déficit de 948 millones de dólares americanos.

2.3.2 Aguas Residuales en Destilería

El alcohol producido en la etapa de fermentación contiene una gran cantidad de impurezas, por lo que es sometido a varias etapas de separación por destilación. Los productos más pesados de la destilación van a formar parte de las aguas residuales y son denominados vinazas. Las vinazas son compuestos altamente coloreados, los cuales son difíciles de tratar mediante procesos biológicos normales como lodos activados o lagunas de oxidación (Lugo S. 2001) (Singh D.S. and Nigam P, 1995).

2.3.3 Electrocoagulación

Es un proceso electroquímico que se emplea para la remoción de los contaminantes del agua residual. Consiste en la generación de coagulantes por la disolución del electrodo anódico, al pasar corriente continua entre 2 placas metálicas inmersa en el agua residual. (Torres, et al., 2014:6103).

Los electrodos más utilizados para el tratamiento de aguas residuales en electrocoagulación son los de Fe y Al, por lo que no son tóxicos para el ser humano y tampoco para el medio ambiente y en temas de costos también son accesibles de adquirir (Charoenlarp & Choyphan, 2009:253)

2.3.4 Factores que afectan el proceso de la electrocoagulación

1.- Densidad de corriente eléctrica.

Los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual son las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación y están ligados a factores económicos. La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente, el suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierros Fe^{+2} , liberados por los respectivos electrodos (Barrera, 2014).

Mediante la siguiente ecuación se determina el consumo de la Energía:

$$E_{\text{cons.}} = \frac{U * i * t}{V_m} \quad (8)$$

Donde:

U: Es el voltaje (V).

i: Intensidad de corriente (A)

t: tiempo de operación (h)

V_m : Volumen de la muestra (l).

• **Efecto pH.** Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. El pH durante el proceso puede

incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo (Barrera, 2014).

- **Conductividad.** Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado.

Diferentes autores han reportado valores de CE muy variables para vinazas resultantes de la obtención de alcohol, dependiendo del tipo y origen de las mismas (Pathak et al., 1999; Ramana et al., 2002; Jimenez et al., 2003; Fuess, 2013; Silva et al., 2014). Para el caso de vinazas obtenidas de la fermentación de melazas, Mariano et al. (2009) determinaron valores de CE de 18,5 mS cm⁻¹, mientras que Nandy et al. (2002) reportaron valores de 25,3 y de 53,8 mS cm⁻¹ para vinazas de jugos y melazas, respectivamente.

- **Tipo de material de los electrodos.**

Los materiales de los electrodos que se suelen emplear en la electrocoagulación son aluminio y hierro, se ha encontrado que la principal aplicación de los electrodos de hierro es para el tratamiento de aguas, debido a su alta eficiencia en la autogeneración de agentes coagulantes (Chen, 2004).

El consumo de la masa de los electrodos se determina mediante la Ley de Faraday:

$$m = \frac{i * t * M}{Z * F} \quad (9)$$

Donde:

m: masa consumida (g) de los electrodos.

i : intensidad de corriente (A)

t : tiempo de operación (s)

Z : número de electrones transferidos

M: masa atómica (g/mol)

F: constante de Faraday (9.65x10⁴ C/mol).

2.3.5 Ozonificación

La ozonificación es una buena técnica para disminuir el color de los efluentes industriales, debido a que los colorantes contienen compuestos aromáticos, el ozono es un oxidante extremadamente fuerte y reacciona rápidamente con los compuestos orgánicos de acuerdo con lo descrito por (Soares, et al., 2007:1478).

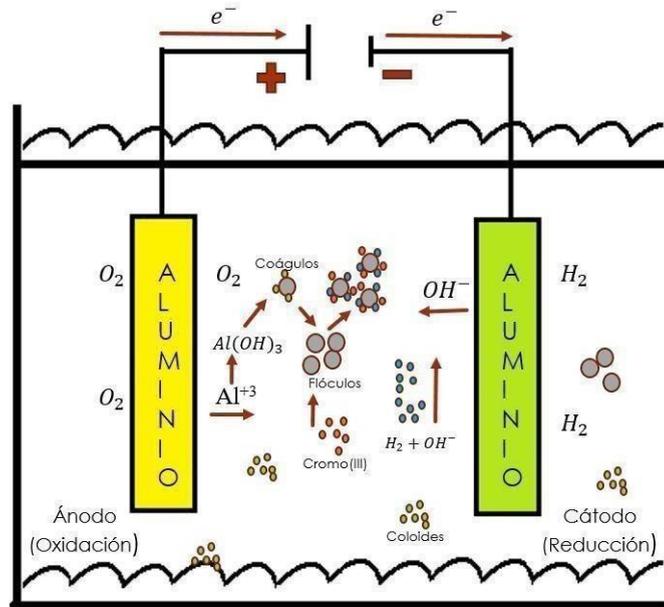
La ozonificación raramente produce mineralización completa (CO₂ y H₂O) frecuentemente se desarrolla una mineralización parcial con los subproductos: ácidos orgánicos, aldehídos y cetonas, de acuerdo a (Morales et al., 2014:363) la mineralización de los compuestos orgánicos está en función directa de las condiciones de oxidación.

Según (Medina, 2019) el contenido orgánico de la vinaza puede ser aprovechado y transformado en metano; sin embargo, los compuestos tóxicos presentes en la vinaza hacen imprescindible el uso de un tratamiento previo al biológico, que permita la degradación de compuestos inhibidores para el aprovechamiento integral de la vinaza.

Las eficiencias de remoción de DQO a pH ácido están de acuerdo con lo reportado por Caicedo (2010) donde se concluye que el pH natural de la vinaza (4,42) es el adecuado para aplicar una ozonización con fines de disminuir de la carga orgánica en este sustrato.

Figura 1

Diseño conceptual de un electrocoagulador con electrodos de aluminio.



Nota: Adaptado como referencia de Karen Beltrán.

2.3.6 Mecanismo de Remoción de Contaminantes.

La electrocoagulación produce cationes metálicos in situ, en lugar de dosificarlos externamente (Barrera, 2014). La electrocoagulación tiene la capacidad de remover un amplio rango de contaminantes incluyendo sólidos suspendidos, metales pesados, colorantes, materia orgánica, gasas, aceites, iones, etc. Las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes influyen e interactúan en el sistema de remoción de contaminantes (Barrera, 2014). En general, durante un tratamiento por electrocoagulación se presentan los siguientes procesos (Barrera, 2014):

- Reacciones electrolíticas en la superficie del electrodo.
- Formación de coagulantes en la fase acuosa por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio.
- Desestabilización de los contaminantes y partículas suspendidas.
- Los coagulantes (Fe^{2+}) absorben a los contaminantes solubles o coloides y se remueven por sedimentación o por flotación.

El porcentaje de remoción se determina mediante la siguiente Ecuación:

$$CR(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (10)$$

Donde:

Co : DQO inicial.

Ct : DQO en el tiempo de operación.

2.3.7 Ventajas de la electrocoagulación

- Este tratamiento electroquímico provoca una mejor y rápida ruptura de las emulsiones, para la separación de aceites. Son compactos y fáciles de instalar,
- Los equipos de electrocoagulación son compactos y fáciles de instalar, factores importantes cuando no se dispone de espacio suficiente.
- Este proceso es sencillo de automatizar debido a que el control de dosificación se realiza mediante el ajuste de corriente.
- Permite la reducción de una amplia variedad de contaminantes, como: metales pesados, grasa y aceites, materia orgánica, fosfatos y cianuros.
- Sus costos de operación son relativamente bajos si se realiza un apropiado diseño del reactor, selección de los materiales para electrodos, y una optimización de los parámetros de funcionamiento. Este proceso requiere poca corriente eléctrica y bajos costos de mantenimiento (Arango, 2005).

2.4. Definición de Términos básicos

Coloide: Suspensión de partículas diminutas de una sustancia, llamada fase dispersada, en otra fase llamada continua o medio de dispersión (Cárdenas, 2005).

DQO: Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación química de la materia orgánica del agua residual (Giraldo, 2004).

Turbidez: Parámetro importante de la coagulación química en cada turbiedad hay presencia de una dosis de coagulante en la cual se obtiene una turbiedad residual más baja. (Barrenechea, 2004).

Sólidos totales disueltos: indica la cantidad de sólidos presentes por lo cual se asocia con la turbidez del agua residual,

Celda Eléctrica: Es un circuito eléctrico constituido por dos electrodos y una solución de electrolitos. Contando con un cátodo y un ánodo (Genaro, 2000).

Densidad de Corriente: Se determina la corriente eléctrica por unidad de área que atraviesa la superficie.

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.

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

Floculación: La floculación es la unión entre los flóculos ya formados con el fin de aumentar su volumen y peso de forma que pueden decantar.

Floculantes: Son polímeros generalmente orgánicos aplicados para promover la formación de flóculos en el agua, promueven la formación de los enlaces entre las partículas. (Barrera, 2014).

III: HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis General

El sistema de tratamiento por electrocoagulación y ozonificación logran la mayor remoción de sólidos totales disueltos y turbidez presentes en las aguas residuales de destilería.

3.1.2. Hipótesis Específicas

- El alto contenido de sólidos totales y la turbidez son características del agua residual de destilería para seleccionar las mejores condiciones de remoción.
- Una mejor relación entre el proceso de electrocoagulación y la ozonificación logran altos valores de remoción de sólidos totales y la turbidez presente en el agua residual de destilería.

3.2. Definición Conceptual de Variables.

Variable Dependiente:

Y1: grado de remoción de sólidos totales y disminución de Turbidez.

Variable Independiente:

X: Condiciones de operación en el equipo de electrocoagulación y Ozonificación.

X₁ : Potencial Eléctrico

X₂: Tiempo de Operación (min)

Variables constantes:

- Flujo de Ozono: 1000mg/h
- Distancia entre electrodos: 2cm
- Flujo de recirculación del agua residual:10.4 ml/s
- Volumen de la solución: 1500ml.

3.2.1. Operacionalización de las Variables:

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Dimensiones	Definición Operacional	Indicador	Escala de Medición	Items	
Independiente							
F(x1) = Condiciones de remoción de sólidos totales y disminución de la turbidez en aguas residuales de destilería.	Los materiales que se suelen emplear en la electrocoagulación son aluminio y hierro. La configuración de los electrodos, generalmente es en forma de placas de aluminio o hierro; se ha encontrado que la principal aplicación de los electrodos de hierro es para el tratamiento de aguas, debido a su alta eficiencia en la autogeneración de agentes coagulantes (Chen, 2004).	x1. Aguas Residuales	En primer lugar se identifican las características iniciales de la muestra de agua residual de destilería, como concentración.	x1.1. Características Físicoquímicas.	Razón	Multiparámetro	
		x2. Electrocoagulación		x1.2. Flujo de agua residual	Razón	Multiparámetro	
				x2.1. Intensidad de corriente	Razón	Multiparámetro	
				x2.2. Distancia de electrodos	Intervalo	Multiparámetro	
				x2.3. Potencial eléctrico	Razón	Multiparámetro	
		x3. Ozonificación		x4. Electrocoagulación/ Ozonificación	x2.4. Tiempo	Razón	Multiparámetro
					x3.1 (mg/h) Ozono	Razón	Multiparámetro
					x4.1. Tiempo	Razón	Multiparámetro
				x4.2 pH	Intervalo	Multiparámetro	
				x4.3 % sólidos/Tiempo	Razón	Multiparámetro	
Dependiente							
G(y)= grado de remoción de sólidos totales y disminución de turbidez.	La electrocoagulación produce cationes metálicos in situ, en lugar de dosificarlos externamente (Barrera, 2014). Simultáneamente, se generan gases electrolitos, especialmente hidrógeno, en el cátodo. La electrocoagulación tiene la capacidad de remover un amplio rango de 22 contaminantes incluyendo sólidos suspendidos, metales pesados, colorantes, materia orgánica, gases, aceites, iones, etc. Las propiedades físicoquímicas de los contaminantes influyen e interactúan en el sistema de remoción de contaminantes (Barrera, 2014).	y1= % de sólidos	En primer lugar se identifican los % de turbidez inicial de la muestra.	y1.1. Turbidez	Nominal	Turbidímetro	
		y2= % de Turbidez		y2.1. Sólidos totales	Razón	Turbidímetro	
		y3= Características del agua tratada.		y3.1. Concentración	Razón	Turbidímetro	
				y4.1. pH	Intervalo	Turbidímetro	

IV: DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y diseño de Investigación

4.1.1 Tipo de Investigación

La investigación desarrollada corresponde:

a) Por su finalidad. Es de tipo aplicativo exploratorio, que sirve para el tratamiento de efluentes líquidos provenientes de destilería de Vinaza.

b) Por su diseño interpretativo. Es de tipo experimental porque permite manipular el factor causal para observar y determinar el efecto deseado, se realizaron varios ensayos variando condiciones fisicoquímicas con la finalidad de comprobar y demostrar tanto los valores como los parámetros más adecuados para el tratamiento. El diseño experimental se desarrolló para resolver la problemática de la remoción de carga orgánica mediante el método de electrocoagulación y Ozonificación.

El diseño experimental es un diseño factorial constituido por 09 experimentos, donde los parámetros de operación del equipo de Electrocoagulación (X2), considera 02 factores (voltaje y Tiempo) con tres niveles para el parámetro de voltaje (12v, 18v,24v) y 3 niveles para Tiempo (100 min, 150 min y 200 min), lo que nos permitió evaluar el efecto individual y la interacción entre los factores sobre la variable respuesta, al elaborar un análisis de varianza, ANOVA con la información obtenida.

c) Por el énfasis de la naturaleza de los datos manejados. Es del tipo mixto porque las variables de la investigación son cuantitativas y cualitativas.

4.1.2 Diseño de la Investigación

Se elaboró un diseño experimental con las variables de entrada y salida, en las que consideramos que las variables de entrada fueron: Voltaje y Tiempo y las variables de salida o respuesta:

DQO, Sólidos totales suspendidos (TSS) % de Turbidez con Filtrado. Peso de los electrodos del ánodo, consumo de energía.

Se envió a validar los resultados iniciales de la muestra patrón a un Laboratorio externo certificado.

Se iniciaron las pruebas experimentales trabajando con el método factorial, de 2 factores (Voltaje y Tiempo) y 3 niveles (100min, 150min y 200min), obteniéndose 09 pruebas experimentales, tal como se muestra en la tabla 2:

Tabla 2

Matriz de Experimento

Orden Corrida	X1	X2	Y
1	12	100	Y ₁
2	12	150	Y ₂
3	12	200	Y ₃
4	18	100	Y ₄
5	18	150	Y ₅
6	18	200	Y ₆
7	24	100	Y ₇
8	24	150	Y ₈
9	24	200	Y ₉

4.1.3 Etapas de la Investigación

Se han considerado las siguientes etapas:

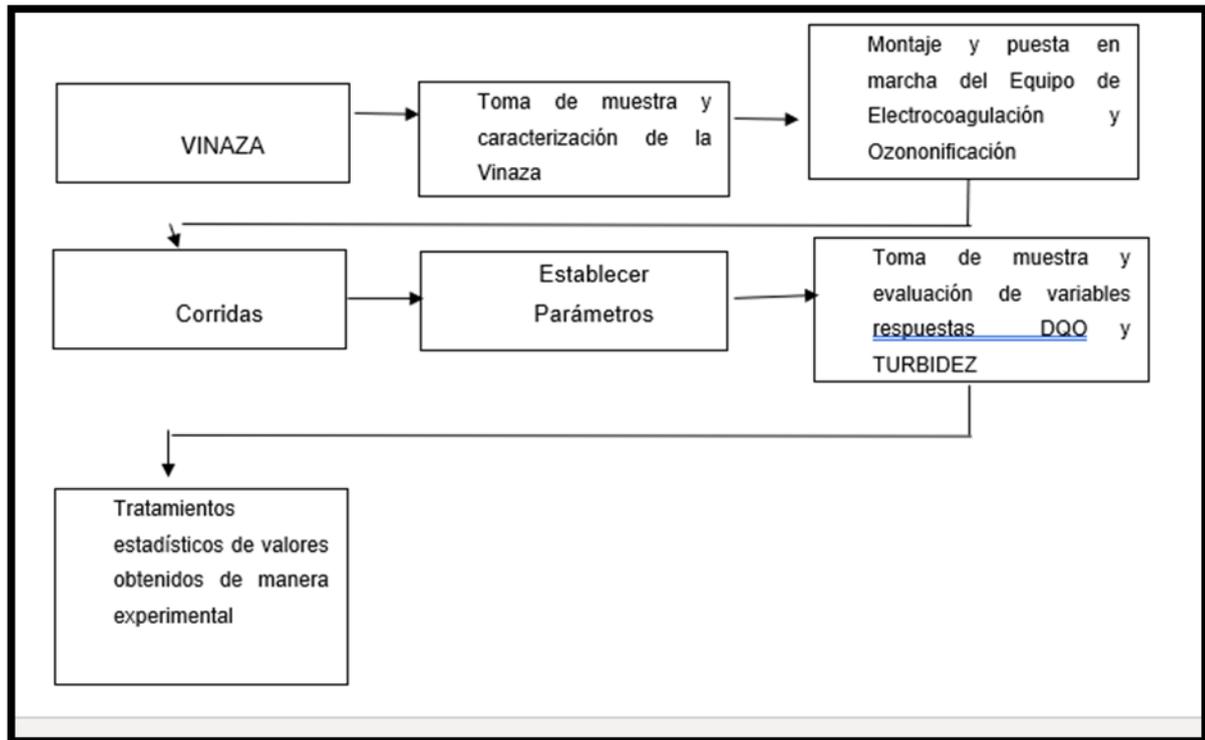
- Etapa 1. Caracterización de la muestra VINAZA, obtenida de la destilería "SMITH"
- Etapa 2. Preparación del equipo de Electrocoagulación con Ozonificación. Quedan definidos en esta etapa, la capacidad de la celda, el número de electrodos y la capacidad del equipo de ozono que se utilizará.
- Etapa 3. Determinación de Diseño Experimental.
- Etapa 4. Proceso de Electrocoagulación con Ozonificación en un sistema discontinuo utilizando electrodos de Aluminio. Se consideró como variables independientes el voltaje, el tiempo de electrocoagulación.
- Etapa 5. Con la información teórica y experimental obtenida en las etapas anteriores, se realizó un riguroso análisis de la información.

En esta etapa se identificó la variable Y (variable respuesta: DQO, la Turbidez y Sólidos Totales).

En la siguiente figura 2 se puede apreciar los pasos al detalle por el cual pasa nuestra metodología de investigación.

Figura 2

Secuencia Del Método De Investigación.



Nota: Se muestra el proceso por el cual pasa nuestra metodología de investigación para el desarrollo del experimento.

4.2. Método de Investigación

La presente investigación se realizó aplicando el método científico, consistente en la percepción directa del objeto de investigación y está conformado por cinco etapas.

EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo experimental cuenta con una celda de electrocoagulación de material acrílico transparente diseñada de forma de un paralelepípedo rectangular con las siguientes dimensiones: Ancho = 20 cm Largo = 15 cm y Altura= 20 cm en el cual se encuentran sumergidos los tres electrodos de aluminio de forma rectangular. El equipo cuenta con una bomba que recircula el agua, tiene instalado un generador de ozono, los electrodos se encuentran conectados a una fuente de poder la cual suministra la corriente para el proceso de electrocoagulación, se utilizó una fuente de poder de voltaje y amperaje variable, permitiendo modificar el suministro de corriente que se le proporciona a la celda.

En la figura 3 podemos apreciar el equipo instalado en el Laboratorio, para la realización de las pruebas experimentales, la cual está comprendida por la celda de Electrocoagulación/ozonificación.

Figura 3

Diagrama de Equipo EC empleado en las pruebas experimentales.

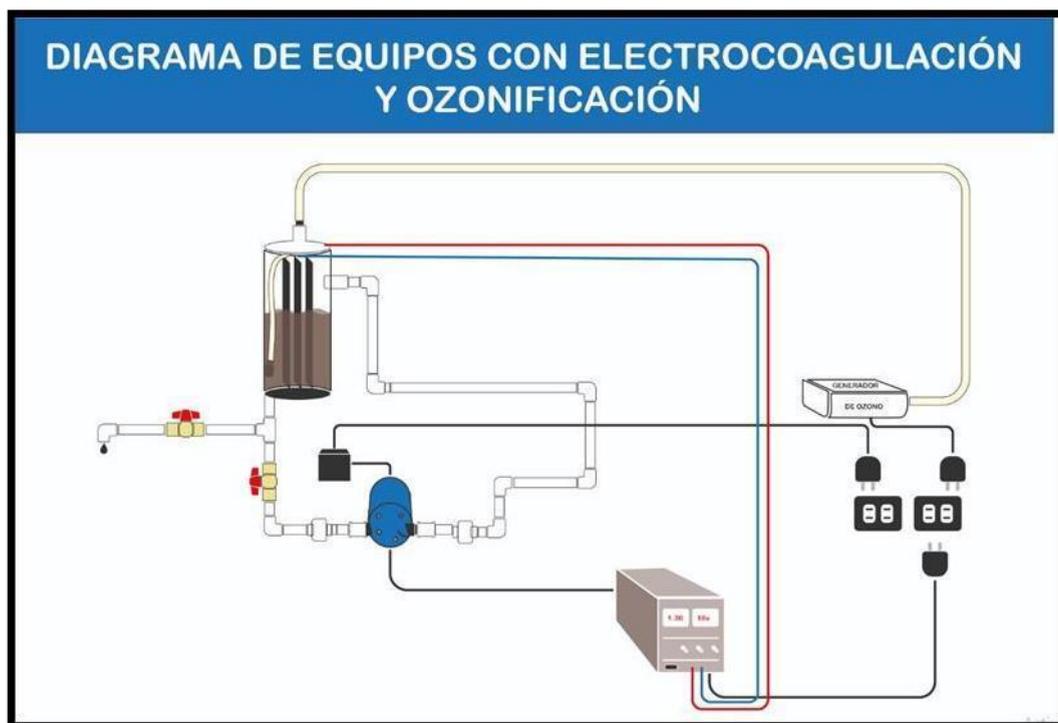


Figura 4

Equipo Experimental.



En la figura 5 se muestra la celda de electrocoagulación en pleno proceso de una corrida experimental.

Figura 5

Celdas de Electrocoagulación en pleno proceso de Operación.



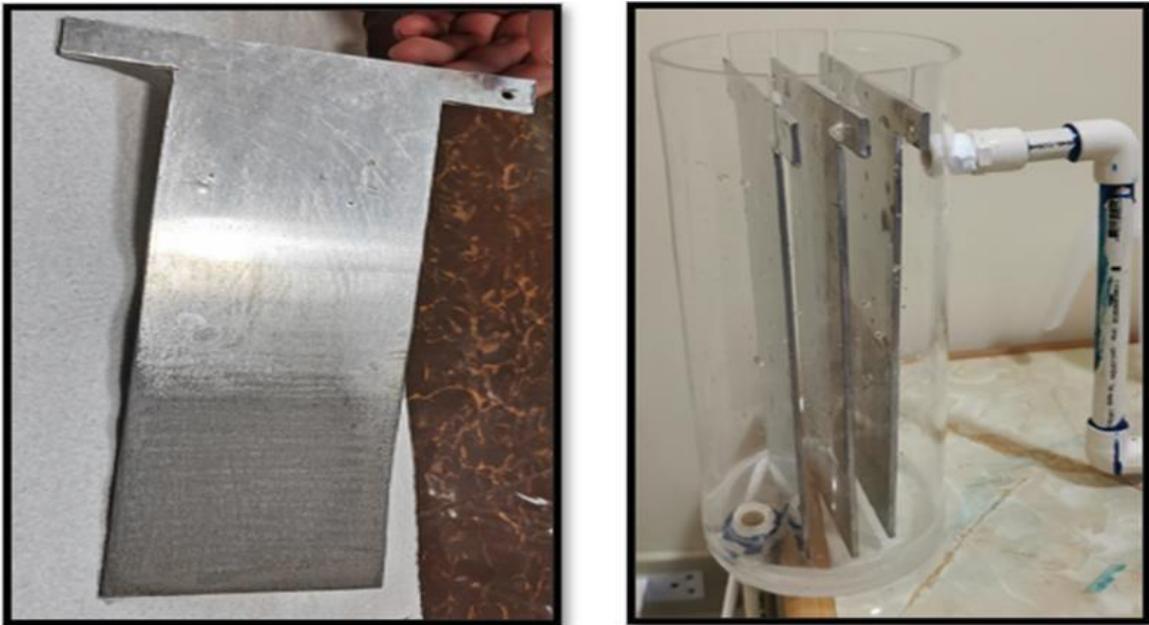
Nota: Se puede apreciar el comportamiento de la vinaza antes y después del tratamiento, donde se evidencia el cambio de color de la turbidez.

Electrodos

Los materiales utilizados como electrodos (ánodo y cátodo) fueron de aluminio. Las dimensiones de los electrodos fueron de 23.5 cm de largo y 8 cm de ancho, de forma rectangular. Se utilizaron 3 placas metálicas como electrodos, 02 placas de aluminio como ánodo (electrodo de sacrificio) y 01 placa como cátodo.

Figura 6

Electrodos de Aluminio.



Nota: Se presentan los electrodos de aluminio (1 cátodo y 2 ánodos de sacrificio) con los cuales se trabajaron en las pruebas experimentales.

Fuente de poder

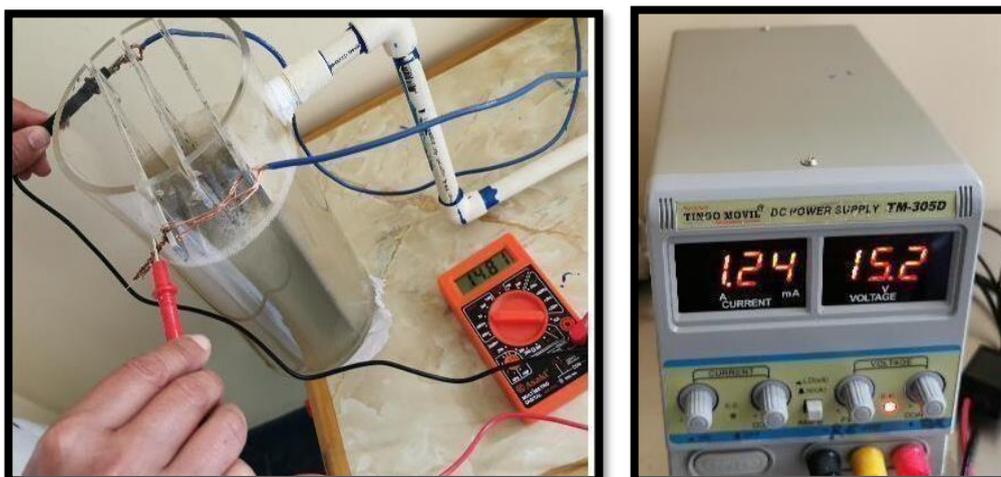
La fuente de poder utilizada nos permitió regular la cantidad de corriente suministrada a la celda para el proceso de electrocoagulación, esta tenía una capacidad de suministrar hasta 30 amperios y un voltaje de 0 a 32 V, los cuales se podrían monitorear con medidores digitales de amperaje y voltaje. Para la verificación de las lecturas de los medidores digitales de intensidad de corriente se utilizó un amperímetro y un cronómetro para las mediciones del tiempo.

Para el suministro de corriente continua a los electrodos se utilizaron cables de uso eléctrico y cocodrilos los cuales se conectaron a las placas de aluminio.

En la figura 7 se observa la fuente de poder utilizada en el equipo del sistema de electrocoagulación y ozonificación del laboratorio.

Figura 7

Fuente de Poder utilizada en el Equipo del Sistema de Electrocoagulación y Ozonificación del Laboratorio.



4.3. Población y muestra

La población trabajada en la presente investigación es finita, y está representada por la muestra de vinaza, cuyos efluentes se obtuvieron a partir de la fermentación de melaza de caña de azúcar y se colectaron inmediatamente a la salida de las

columnas de destilación, en bidones resistentes a altas temperaturas, debidamente acondicionados para su traslado.

La muestra representó un volumen de 30 litros obtenida de la Bodega Smith Aspitia en el departamento de Lima, provincia de Cañete Distrito Santa Cruz de Flores, anexo de Azpitia. (Figura 8).

Figura 8

Destilería Bodega Smith Aspitia de la provincia de Cañete.



Nota: Bodega Smith Aspitia proveedora de la muestra de vinaza para los ensayos experimentales.

4.4. Lugar de Estudio y periodo desarrollado

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el laboratorio de la Empresa FA INGENIEROS SAC, ubicado en el Distrito de los Olivos, Lima-Perú.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.

4.5.1 Técnica.

Las técnicas que se utilizaron son técnicas para análisis fisicoquímicos.

4.5.2 Instrumentos

El instrumento de medición que se utilizó fue con la finalidad de medir magnitudes fisicoquímicas como: % de sólidos totales (ST), Turbidez, Demanda química de oxígeno (DQO), El pH se midió potenciométricamente y la conductividad eléctrica mediante el método conductimétrico. Un barrido completo de aniones y cationes.

Equipos

Fuente de corriente DC (0 - 12A/ 0 - 30 V), pinza amperimétrica, medidor multiparámetro, medidor de pH y temperatura, Conductividad, Turbidímetro portátil (EPA), Colorímetro portátil multiparamétrico DR900, Reactor CR25, Generador de ozono, cronómetro, balanza analítica de precisión.

1.- 2100Q Turbidímetro portátil (EPA)

El turbidímetro portátil 2100Q ofrece una gran facilidad de uso y exactitud en la medición de la turbidez.

2.- Colorímetro portátil multiparamétrico DR900

El DR900 portátil permite un rápido y fácil acceso a los métodos de análisis más utilizados. Con una interfaz de usuario intuitiva, capacidades para una cómoda transferencia de datos y capacidad de análisis de hasta 90 de los métodos de análisis de agua utilizados con mayor frecuencia.

3.- Reactor CR25

El reactor CR25 permite la digestión de viales DQO de reflujo cerrado es más fácil y seguro que el tradicional método titulométrico de reflujo abierto.

Figura 9

Equipos empleados en las pruebas experimentales.



Nota: Equipo completo para las lecturas de DQO, Turbidez y Sólidos totales.

Generador de ozono

El ozono fue producido en un equipo generador de ozono, que utiliza el método de micro descargas eléctricas de alta frecuencia entre placas, para generar el ozono. Posee un caudal determinado en laboratorio de 1 gr/hr y una concentración de 2.8 mg O₃/l de aire y una potencia de 45W.

4.6. Análisis y Procesamiento de Datos.

Para el procesamiento de los datos resultados de las pruebas experimentales, se utilizó el software Minitab 18 y el programa de Excel avanzado.

V: RESULTADOS

5.1. Resultados Descriptivos

Dentro de los resultados, tenemos la Caracterización Físico-química y biológicos del agua residual, en la tabla 1 se observa la demanda química de oxígeno (DQO), turbiedad, solidos totales disueltos y pH .En la tabla 2 se muestra la concentración de los aniones y cationes.

Tabla 3

Análisis Fisicoquímicos y Biológicos del Agua Residual Inicial

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M	L.C.M	RESULTADOS
Demanda Bioquímica De Oxigeno	mg BOD 5/L	0,4	2,0	122 775.00
Demanda Química De Oxigeno	mgO2/L	2,0	5,0	202 532.40
pH	Ph	NA	0,01	3,52
Solidos Totales	mg total solids/ L	2,00	5,00	125 095.00
Turbidez	NTU	NA	0,01	650

Nota: Estos resultados fueron obtenidos del Laboratorio ALAB.

Tabla 4

Concentraciones de sustancias químicas en la vinaza.

METALES TOTALES ICPOES	UNIDAD	L.D.M	L.C.M.	RESULTADOS
Boro	mg/L	0,002	0,008	1,152
Calcio	mg/L	0,002	0,006	54,662
Cobre	mg/L	0,0003	0,0010	0,0672
Fosforo	mg/L	0,01	0,04	88,71
Hierro	mg/L	0,001	0,004	3,946
Magnesio	mg/L	0,005	0,02	29,661
Plomo	mg/L	0,002	0,006	3,135
Potasio	mg/L	0,04	0,10	589,76
silice	mg/L	0,001	0,004	30,693
Sodio	mg/L	0,004	0,010	89,187
Zinc		0,0001	0,0004	0,3958

Nota: Estos resultados fueron obtenidos del Laboratorio ALAB

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos en las pruebas experimentales:

Tabla 5

Resultados Experimentales de las pruebas, según nuestro Diseño Experimental.

EXPERIMENTOS	VOLTAJE (V)	TIEMPO (min)	I (A)	PH _{Final}	DQO (%)	% SOLID. TOTALES SUSPEND.	(%) TURBIDEZ	Econs. (KWh/l)	m ^{elect.} Exp. (g)
1	12	100	1.5	4.77	83.7	74	78	20.60	2.86
2	12	150	1.9	5	49.5	53	58	38.20	2.14
3	12	200	1.5	4.93	62.1	91	88	39.90	2.86
4	18	100	2.02	4.79	71.26	73	85	40.36	3.14
5	18	150	1.86	4.94	66.33	88	93	55.86	1.94
6	18	200	2.24	5.24	49.34	40	89	89.60	1.77
7	24	100	2.55	4.91	71.86	87	90	68.00	3.61
8	24	150	1.56	4.81	48.16	85	85	62.32	2.62
9	24	200	1.87	5.45	68.4	85	93	100.00	0.35

Nota: Porcentaje de remoción de DQO, sólidos totales y turbidez para cada experimento, resultando el experimento 1, 4 y 5 los óptimos con el objetivo planteado.

En la siguiente tabla 6 se muestra los resultados finales después del tratamiento de Electrocoagulación con Ozono a las condiciones de 18 voltios y 200 minutos, reportado por el Laboratorio ALAB para la realización de los análisis fisicoquímicos.

Tabla 6

Análisis Fisicoquímicos Del Agua Residual Final

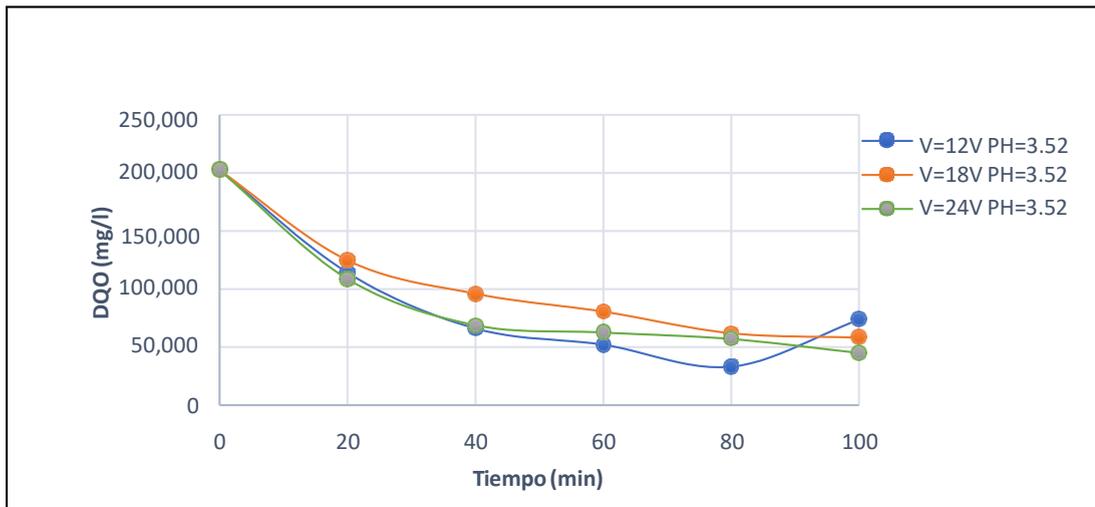
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M	L.C.M	RESULTADOS
Demanda Química De Oxígeno	mgO ₂ /L	2,0	5,0	177 024.2
pH	Ph	NA	0,01	4.88
Sólidos Totales	mg total solids/ L	2,00	5,00	112 366.67
Turbidez	NTU	NA	0,01	2 400

Nota: Resultados de caracterización fisicoquímica final de la Vinaza.

Podemos observar la variación del DQO en función del tiempo para 100min de experimentación, se muestra la misma tendencia para 12,18 y 24 voltios.

Figura 10

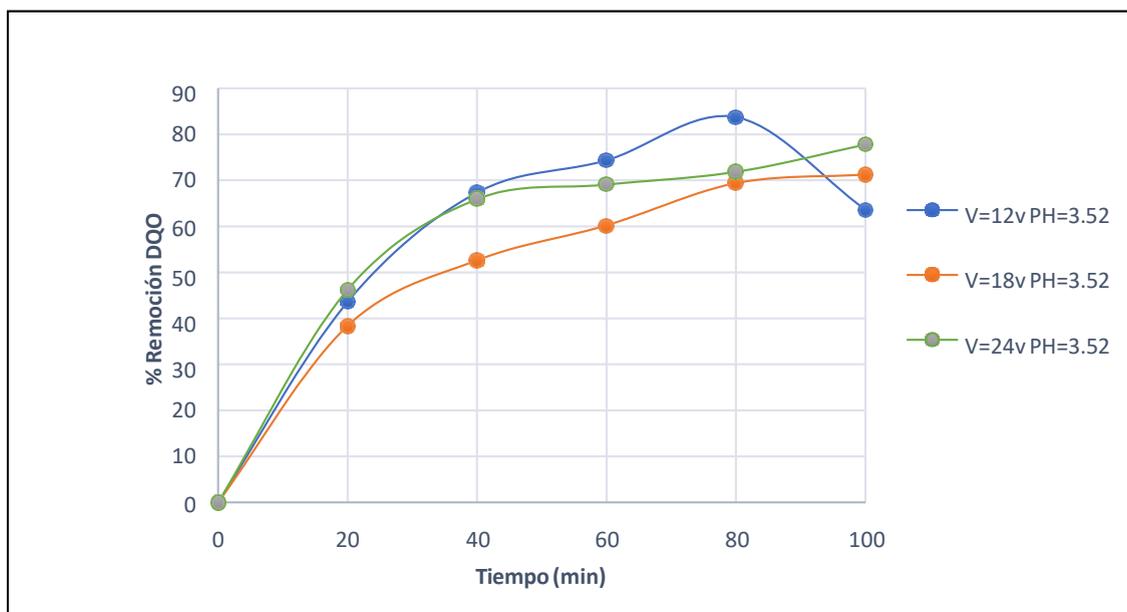
Efecto del potencial eléctrico en la degradación de DQO en función del tiempo.



De la Figura 11 observamos que a 12 voltios el porcentaje de remoción del DQO es mayor.

Figura 11

Efecto del Potencial Eléctrico en el Porcentaje de Remoción de DQO en Función del Tiempo.



Se observa la variación del DQO en función del tiempo para 150 min de experimentación, se muestra la misma tendencia para 12,18 y 24 voltios .

Figura 1

Efecto del potencial eléctrico en la degradación de DQO en función del tiempo.

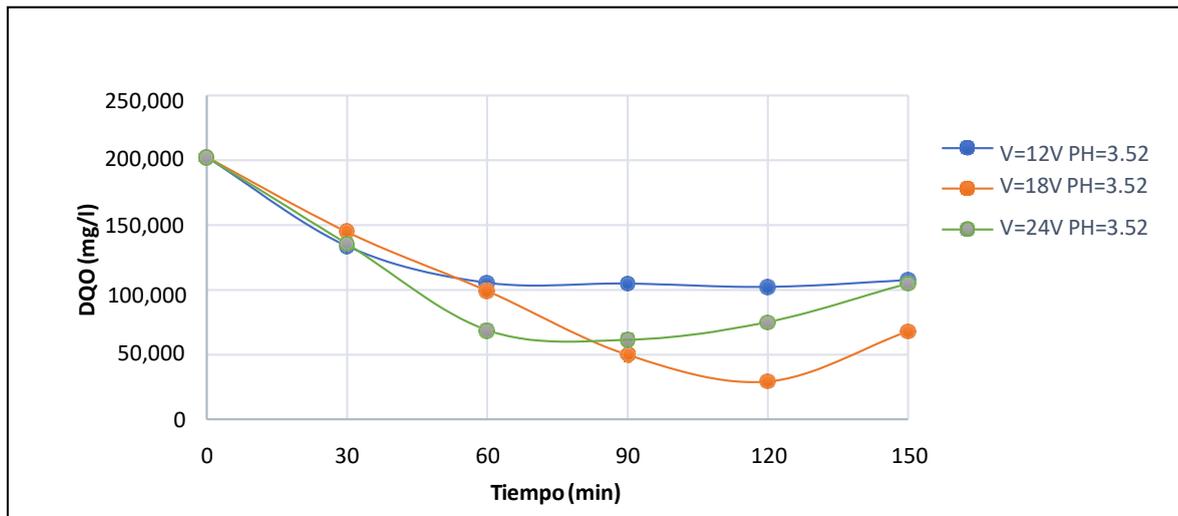


Figura 2

Efecto del potencial eléctrico en el porcentaje de remoción de DQO en función del tiempo.

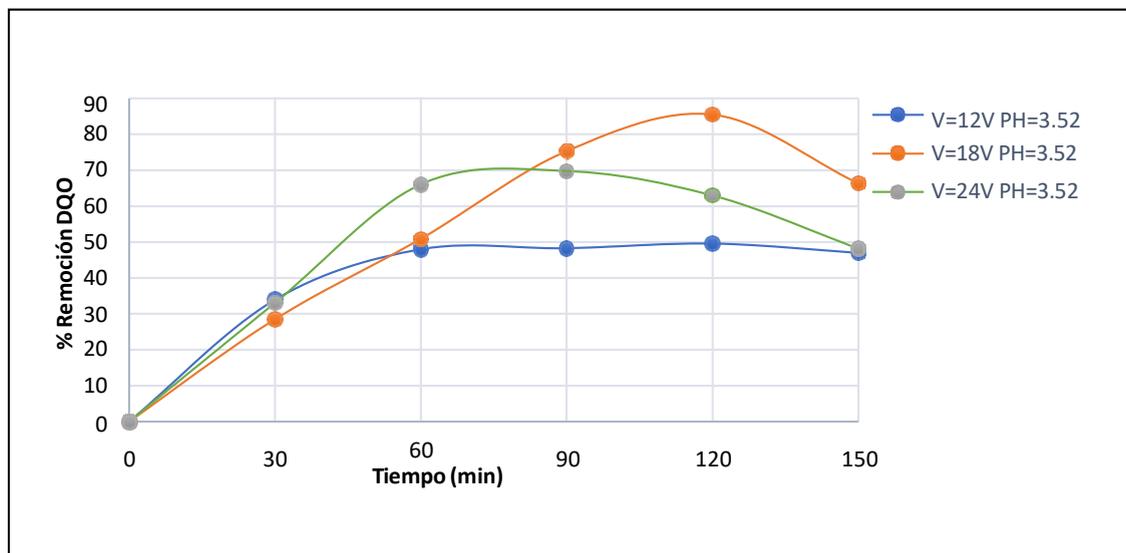


Figura 3

Efecto del potencial eléctrico en la degradación de DQO en función del tiempo.

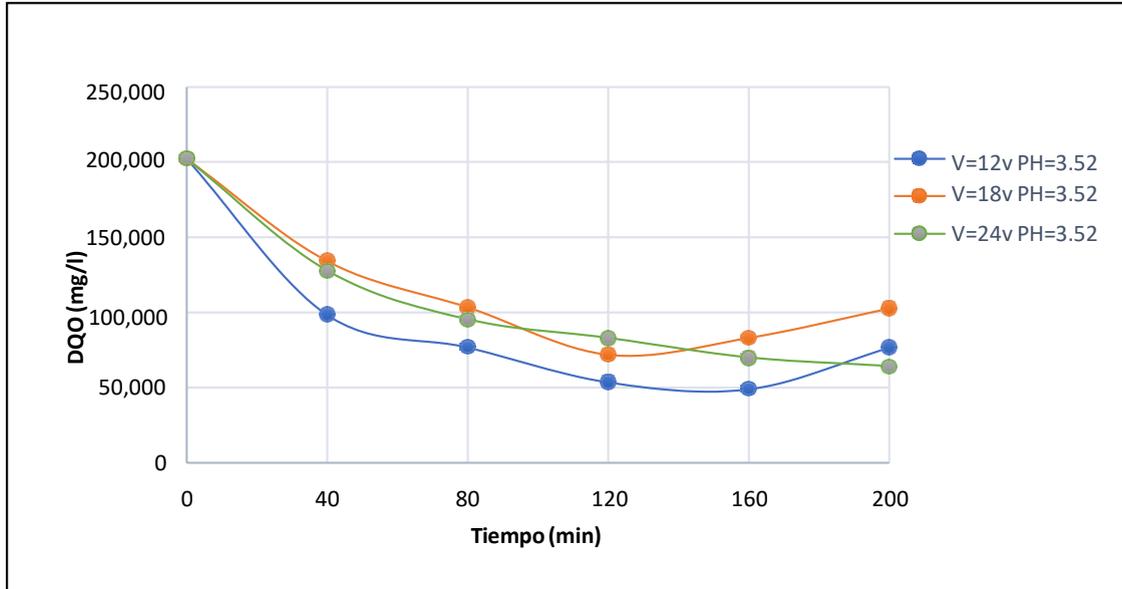
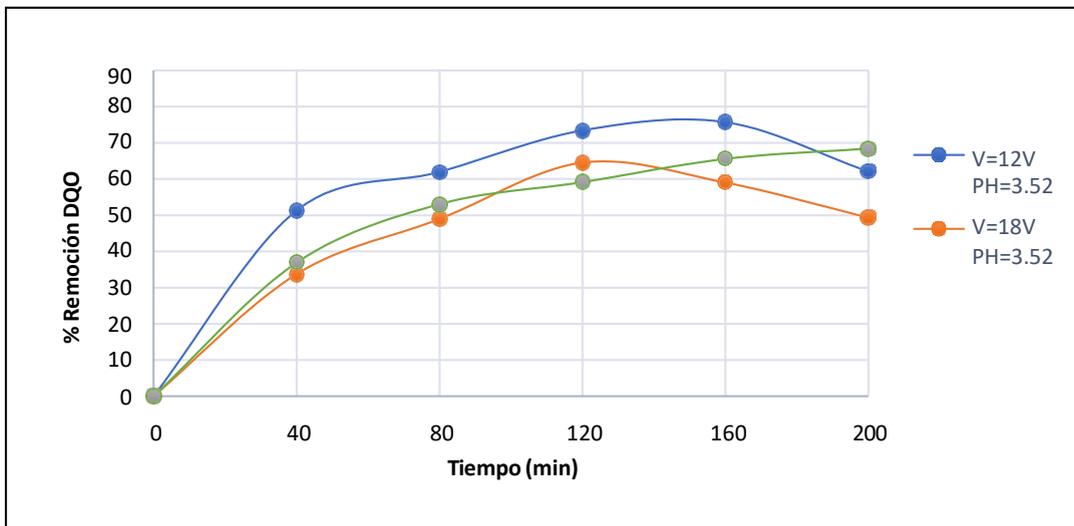


Figura 4

Efecto del potencial eléctrico en el porcentaje de remoción de DQO en función del tiempo



De la Figura 16 se observa que el mayor porcentaje de remoción de DQO se presenta en el experimento 1, seguido del experimento 4 y 7.

Figura 5

Porcentaje de Remoción DQO para cada Diseño de Experimentos.



En la figura 17 y 18 se observa $\ln(DQO_0/DQO_t)$ en función del tiempo para determinar la constante de velocidad de primer orden.

Figura 6

Ln de la Concentración de DQO en función del tiempo.

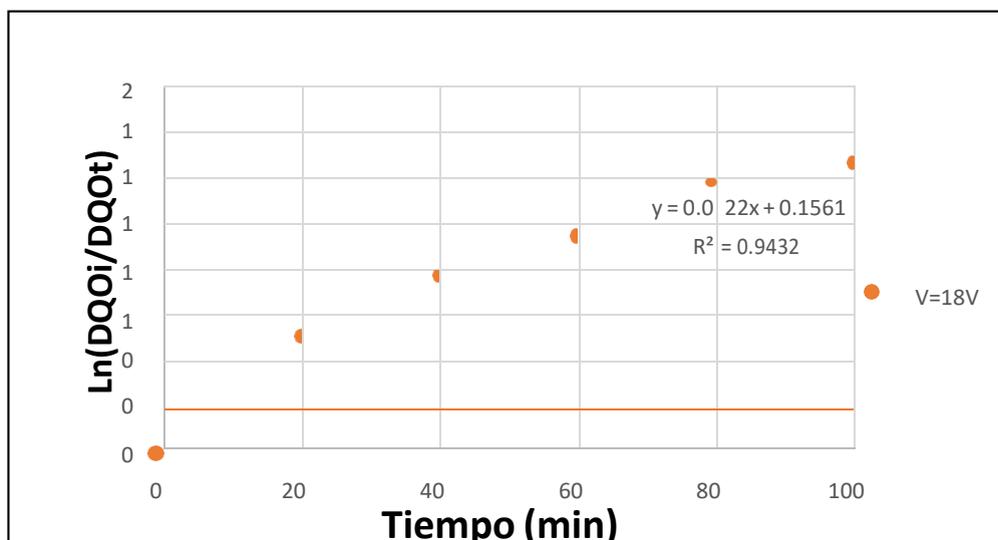


Figura 7

Ln de la Concentración de DQO en función del tiempo.

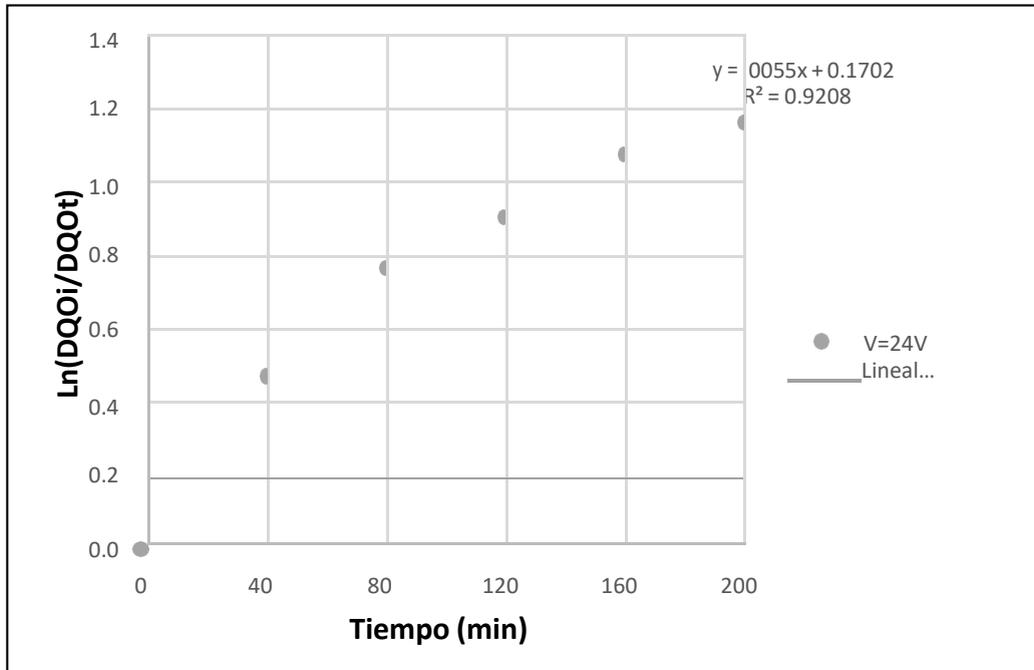


Tabla 7

Condiciones Iniciales del Efluente pH, voltaje, Conductividad, DQO, Turbiedad, Sólidos suspendidos totales (V=12 y t=100min).

tiempo	min	0	20	40	60	80	100
Intensidad	Amp	1.46	1.42	1.63	1.69	1.6	1.45
Ph		3.59	4.31	4.03	4.47	4.71	4.77
Temperatura	°C	16.8	18.8	19.1	22	22.6	22.3
Conductividad		5.5.7	5.6.3	5.7.4	6.1.3	6.6.0	6.3.4
Sólidos Totales Suspendidos	TSS	647	594	586	654	121.5	170.7
%Turbidez c/filtrado	NTU	410	305	229	174	120	89
DQO	DQO	202 532	114 200	66 200	52 000	33 000	73 800

Tabla 8

Condiciones Iniciales del Efluente pH, voltaje, Conductividad, DQO, Turbiedad, Sólidos suspendidos totales (V=12 y t=150min).

Tiempo	min	0	30	60	90	120	150
Intensidad	Amp	1.85	1.93	2.22	2.62	1.05	1.78
Ph		2.71	3.85	4.7	4.88	5.05	5.00
Temperatura	°C	13.5	21.2	23.9	24	21.4	24.3
Conductividad		8.8.1	6.4.4	6.5.2	6.5.5	6.3.2	6.4.2
Sólidos Totales Suspendidos	TSS	750	502	599	175.8	258.6	353.5
%Turbidez c/filtrado	NTU	417	224	129	36.8	21.4	175
DQO	DQO	202 532	133 800	105 400	104 800	102 200	107 400

Tabla 9

Condiciones Iniciales del Efluente pH, voltaje, Conductividad, DQO, Turbiedad, Solidos suspendidos totales (V=12 y t=200min).

Tiempo	min	0	40	80	120	160	200
Intensidad	Amp	1.5	1.54	1.56	1.66	1.41	1.3
Ph		3.67	4.01	4.56	4.77	4.98	4.93
Temperatura	°C	13	20.2	22.3	21.7	22.2	21.8
Conductividad		6.2.7	5.6.4	6.0.2	6.3.4	6.2.0	6.1.8
Sólidos Totales Suspendidos	TSS	298	642	683	1566	2484	28.02
%Turbidez c/filtrado	NTU	176	135	103	65.6	41.4	21.39
DQO	DQO	<u>202</u> <u>532</u>	98 600	77 000	53 800	49 200	76 800

Figura 8

Variación de la Turbiedad en Función del Tiempo (12v-100min).

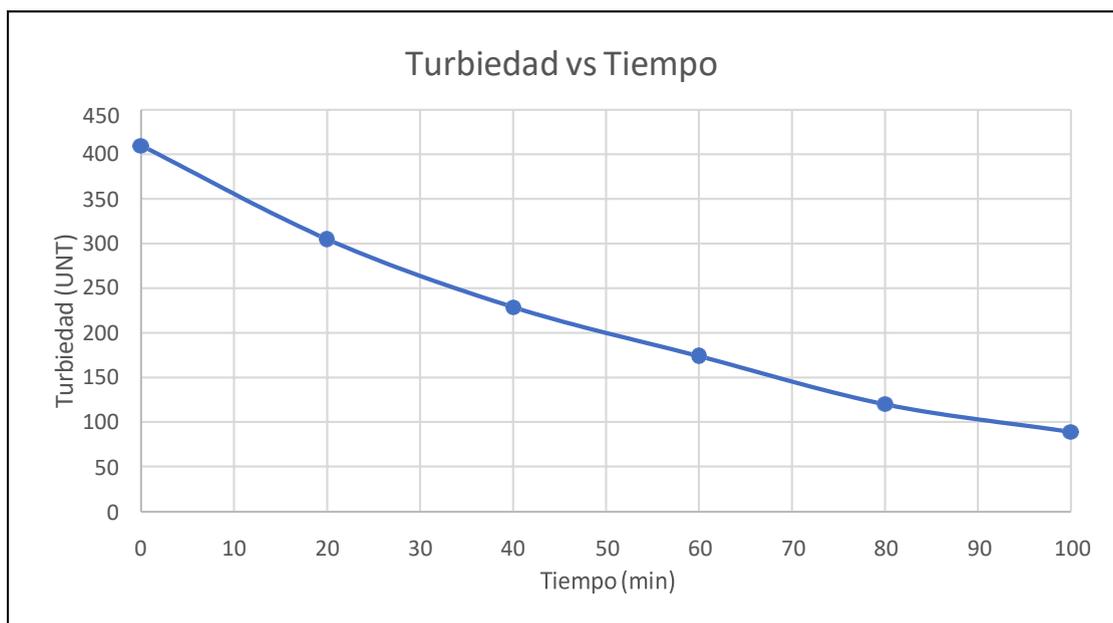


Figura 9

Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (12v-100min).

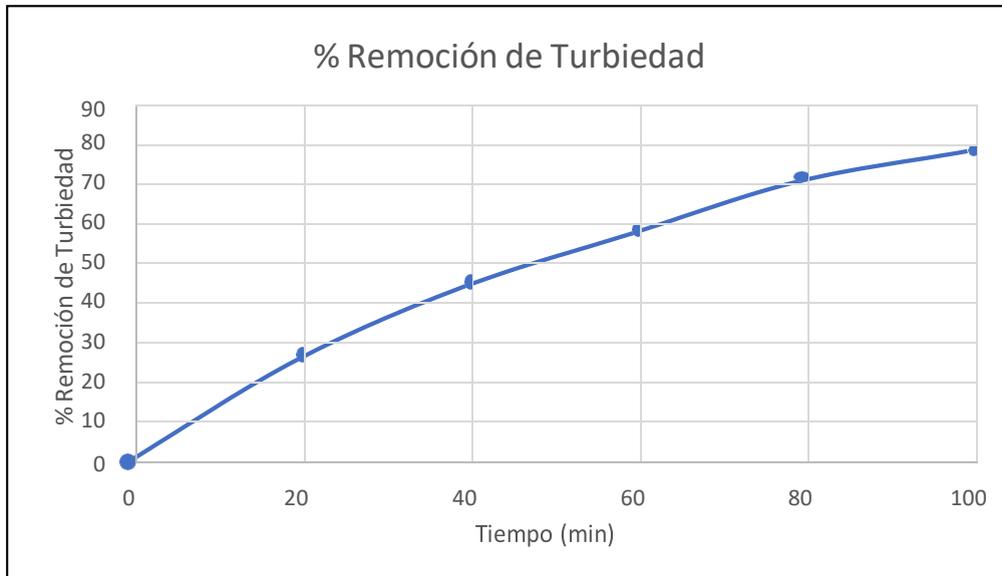


Figura 21

Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (12v-150min).

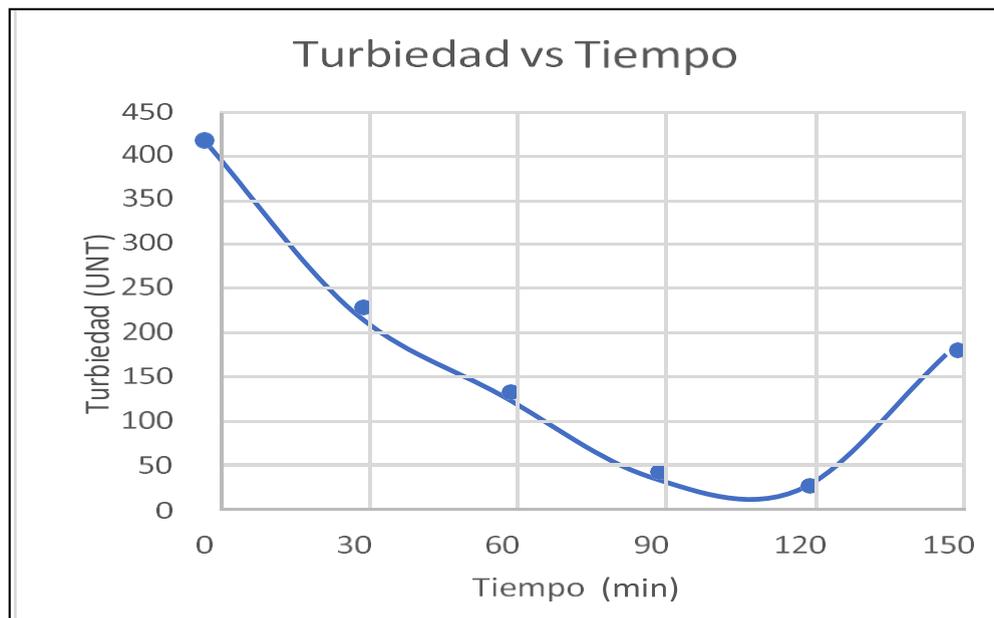


Figura 10

Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (12v-150min).

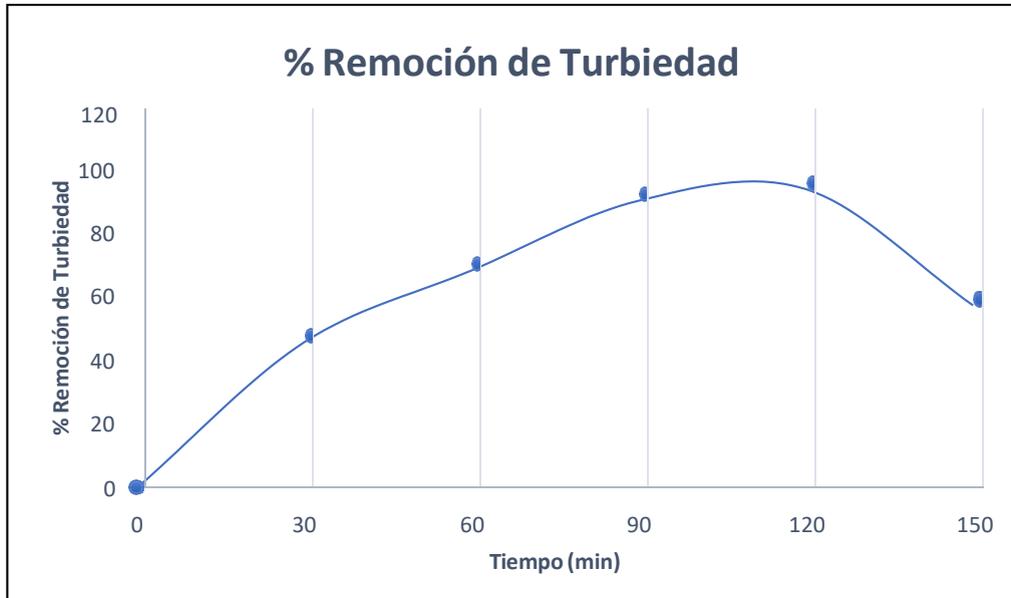


Figura 11

Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (12v-200min).

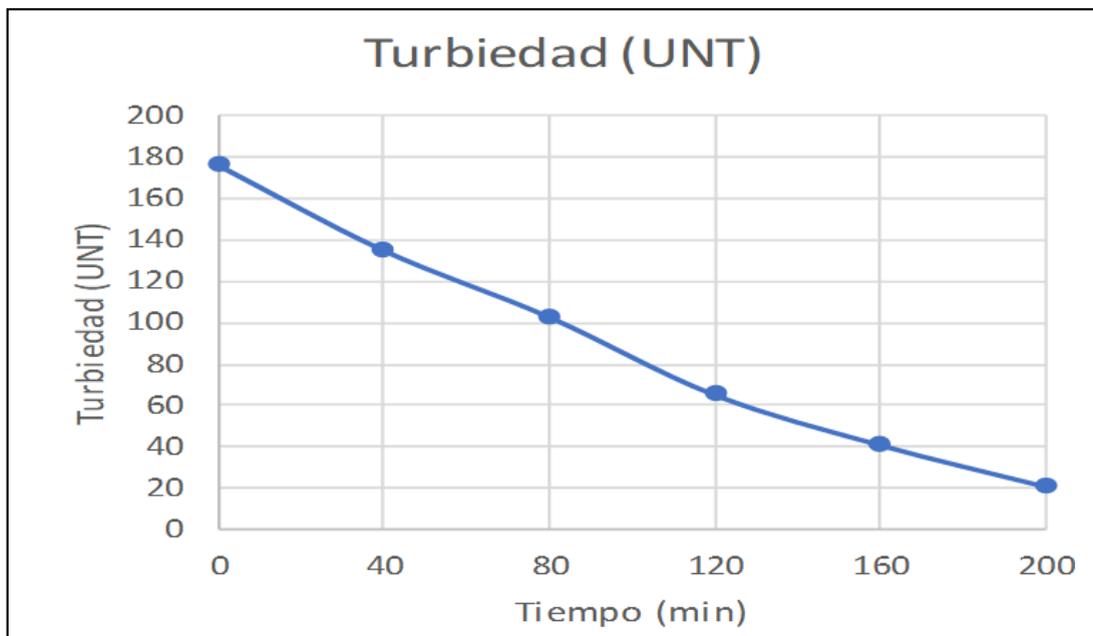


Figura 12

Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (12v-200min).



Figura 13

Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (18v-100min).

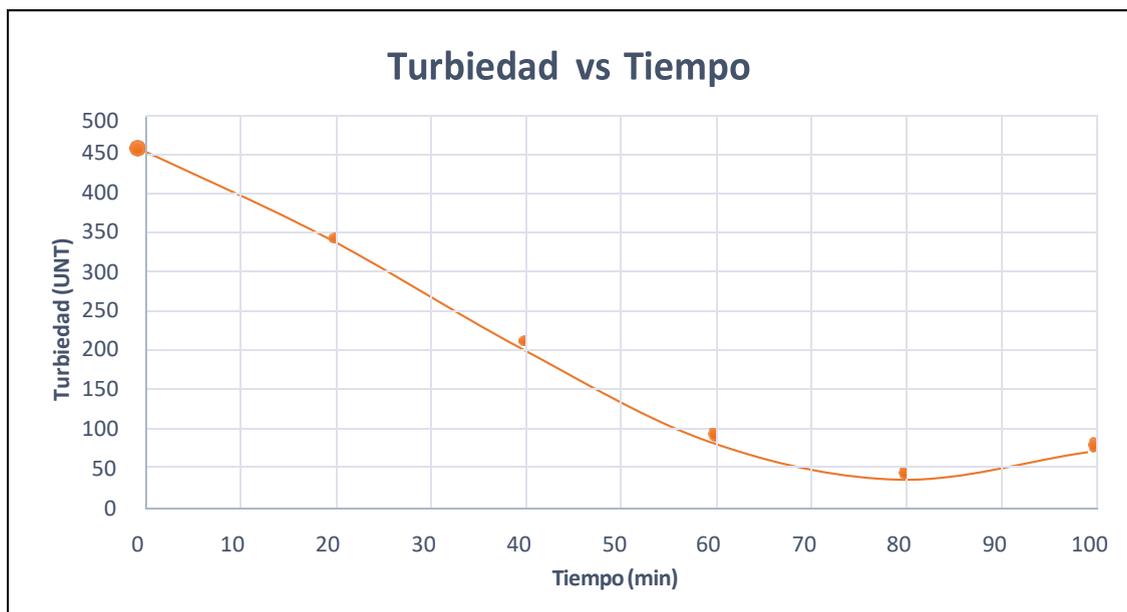


Figura 14

Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (18v-100min).



Figura 15

Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (18v-150min).

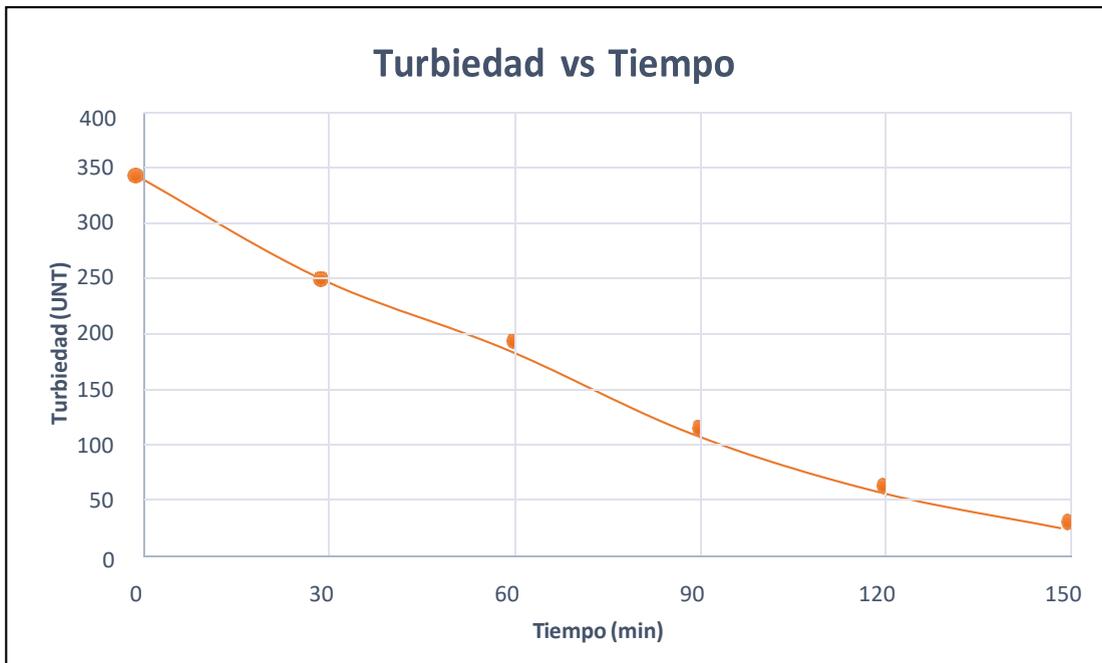


Figura 16

Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (18v-150min).



Figura 17

Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (18v-200min).

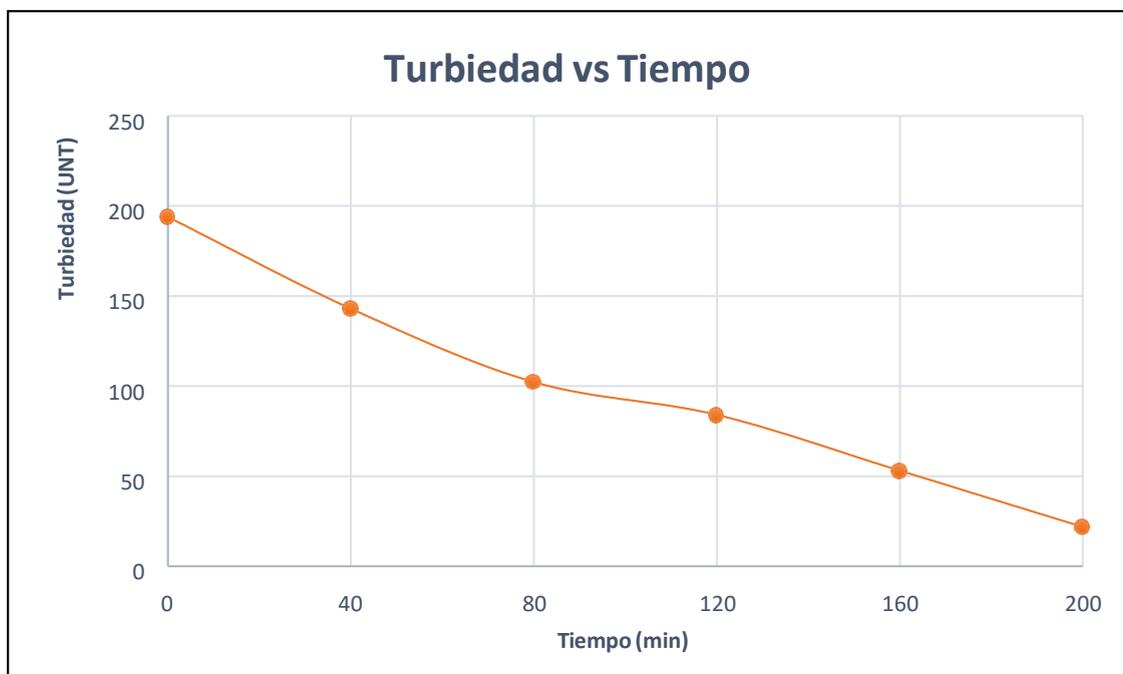


Figura 18

Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (18v-200min).

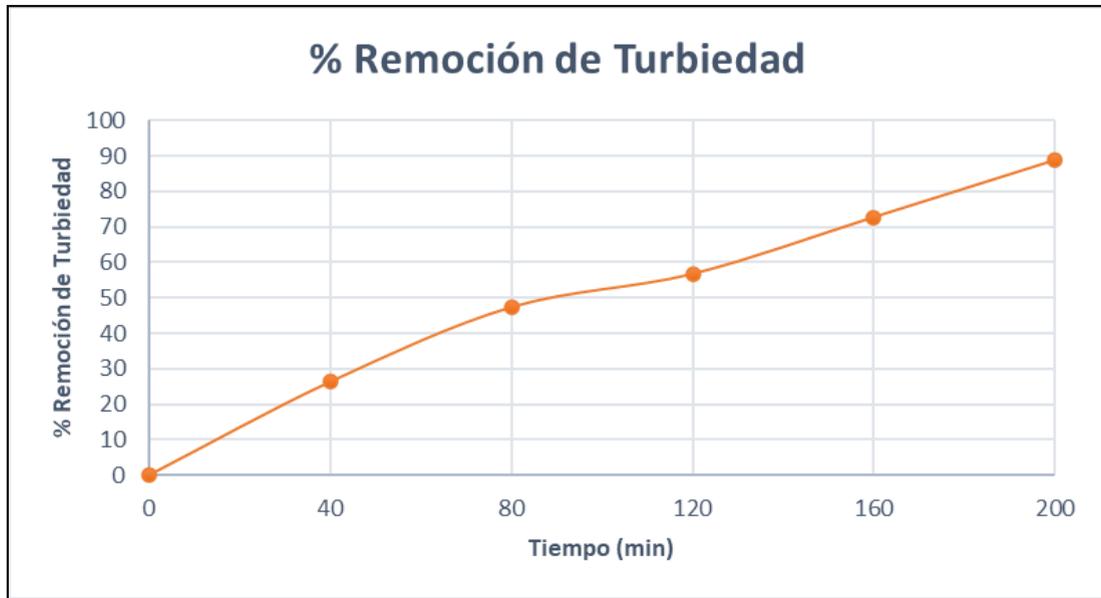


Figura 19

Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (24v-100min).



Figura 20

Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (24v-100min).

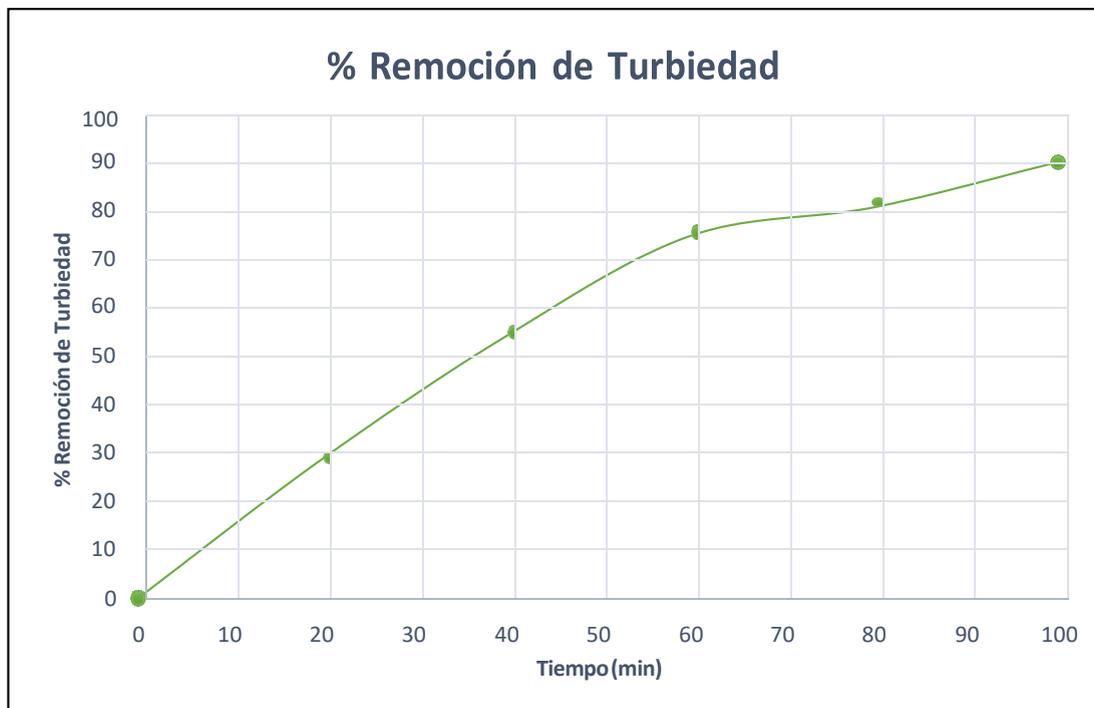


Figura 21

Variación de La Turbiedad Respecto al Tiempo A (24v-150min).

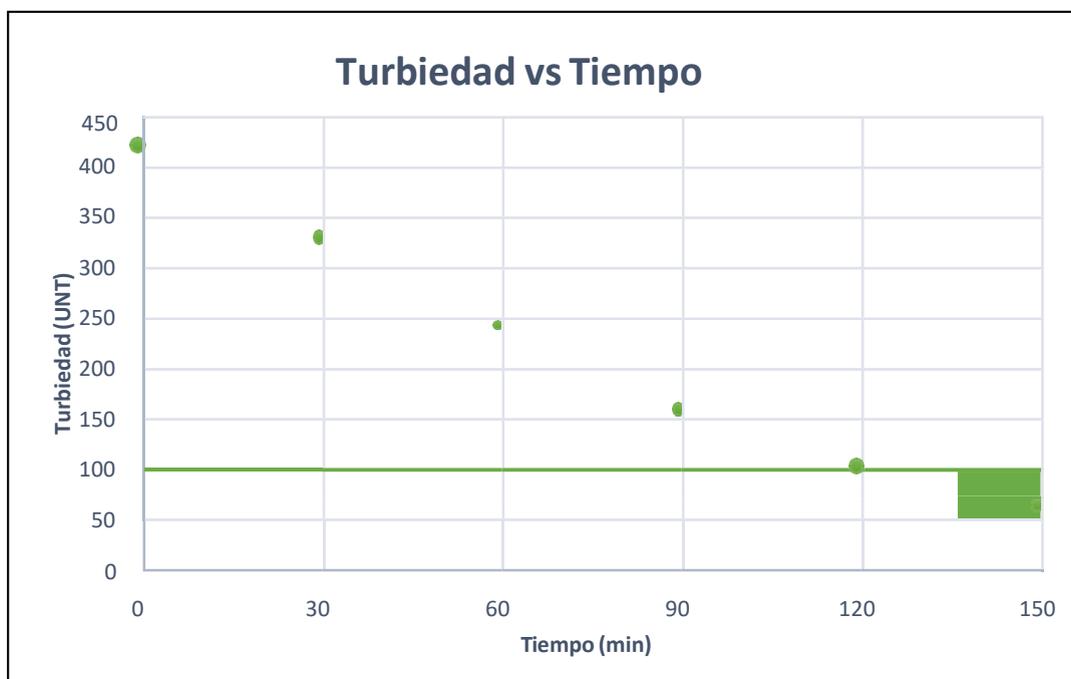


Figura 22

Porcentaje de Remoción de la Turbiedad en Función del Tiempo (24v-150min).



Figura 23

Variación de la turbiedad respecto al tiempo a (24v-200min).



Figura 24

Porcentaje de Remoción de la turbiedad en función del tiempo (24v-200min).

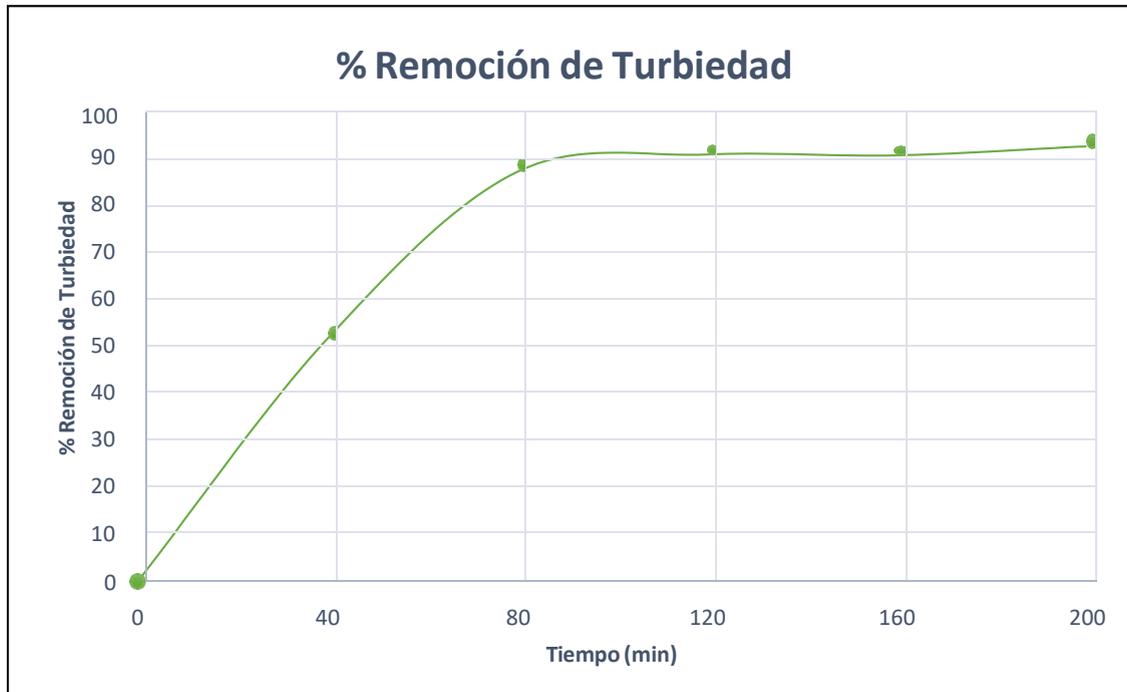


Figura 25

Comportamiento de los Sólidos Totales en Función del Tiempo.

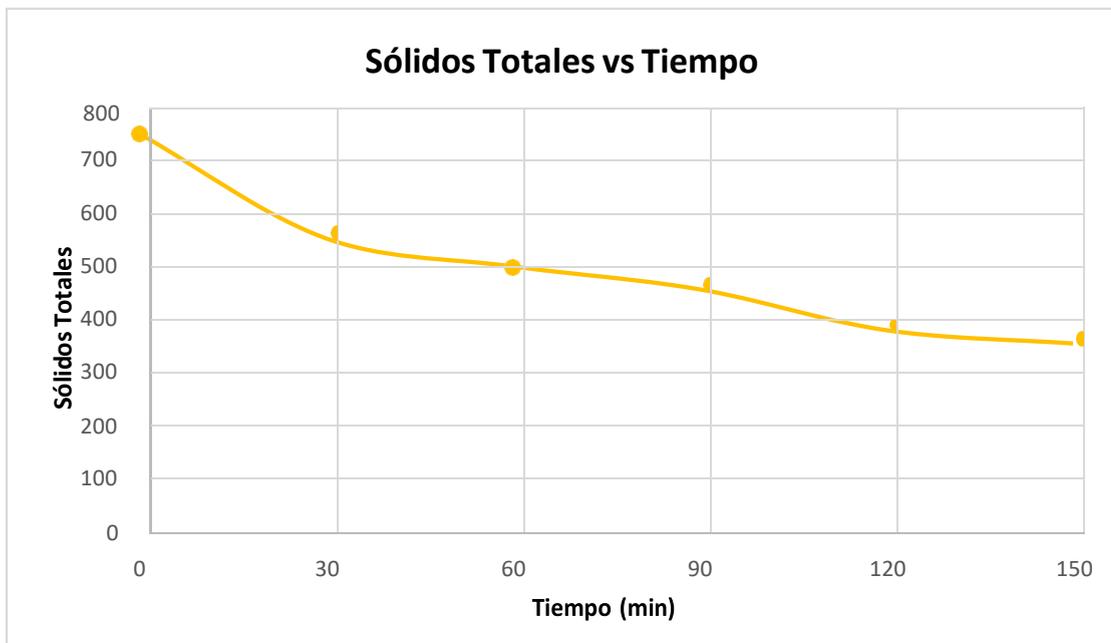


Figura 26

Comportamiento de los Sólidos Totales en Función del Tiempo.

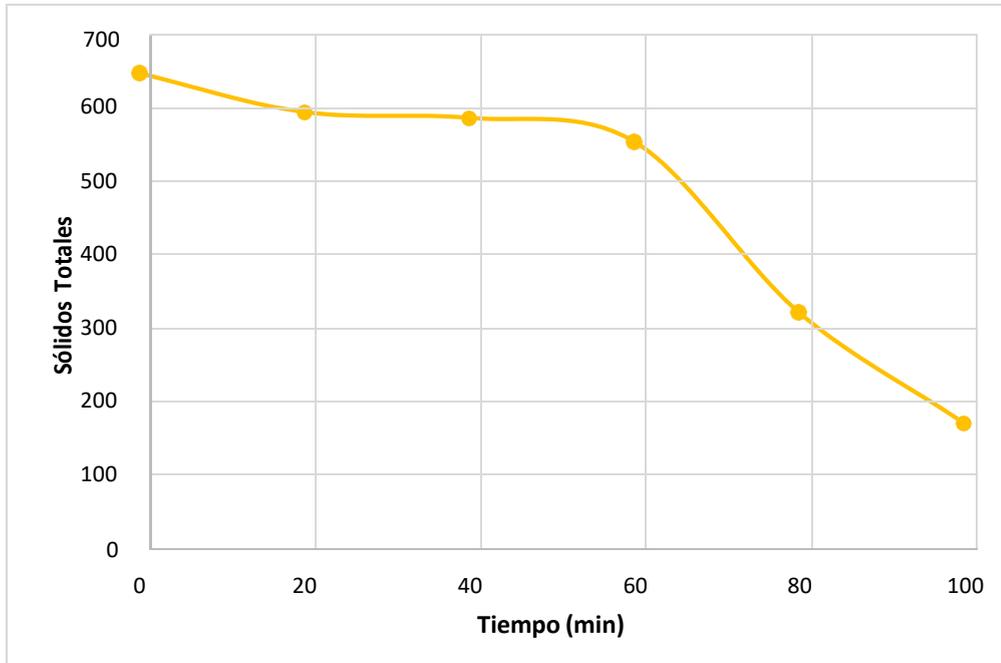


Figura 27

Comportamiento de los Sólidos Totales en Función del Tiempo.

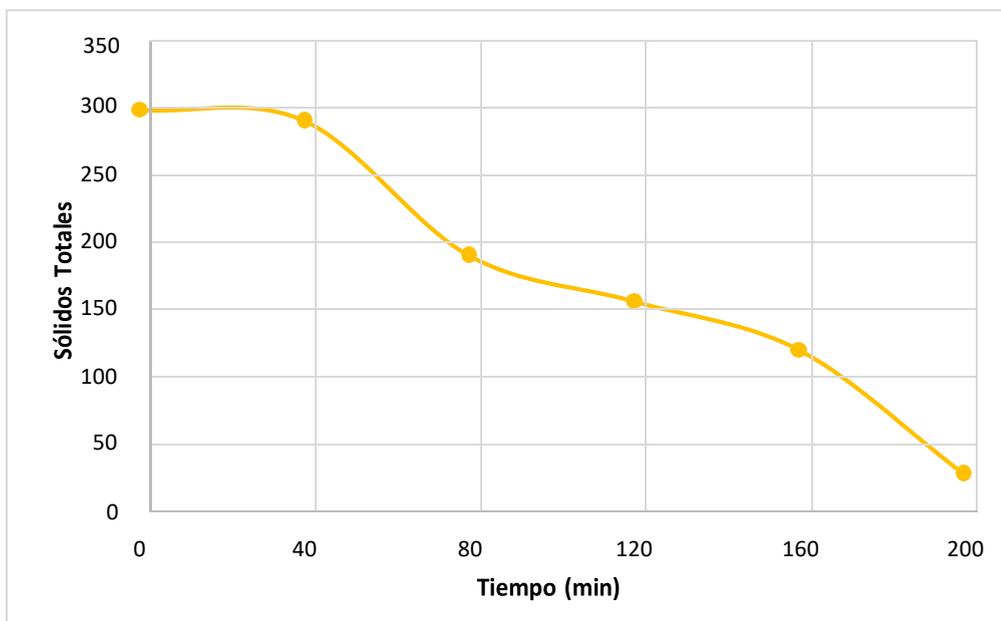


Figura 28

Comportamiento de la Intensidad, Ph, T°C en Función del Tiempo.

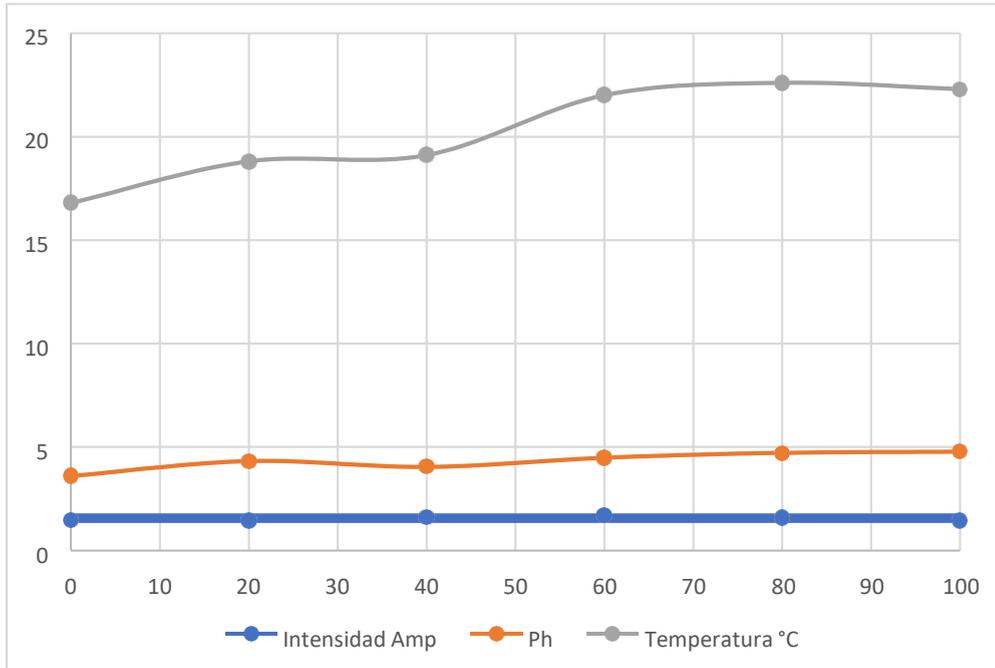


Figura 41

Comportamiento de la Intensidad, Ph, T°C en Función del Tiempo.

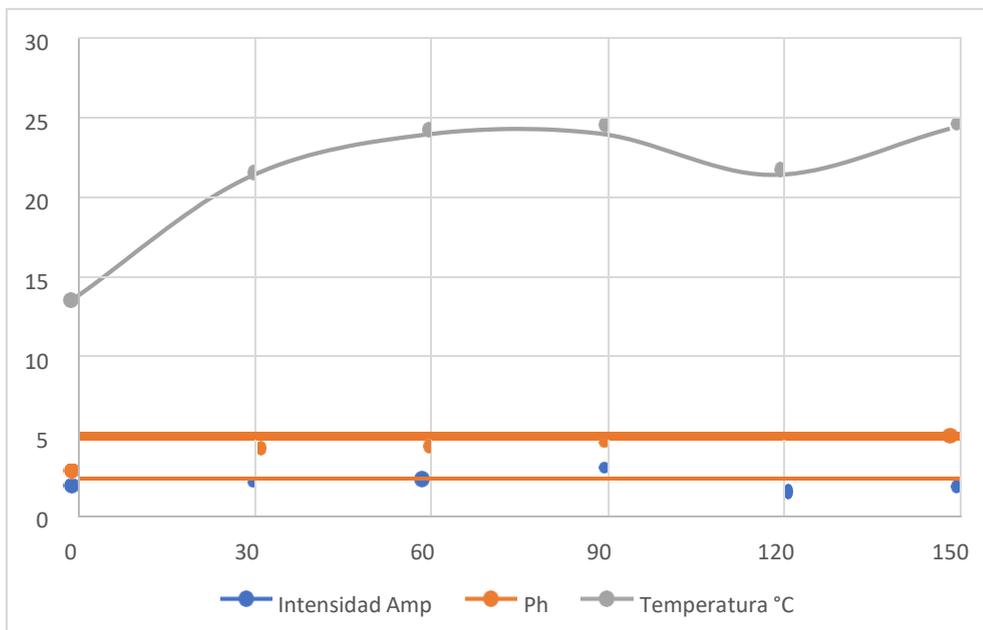


Figura 29

Comportamiento de la Intensidad, Ph, T°C en Función del Tiempo.

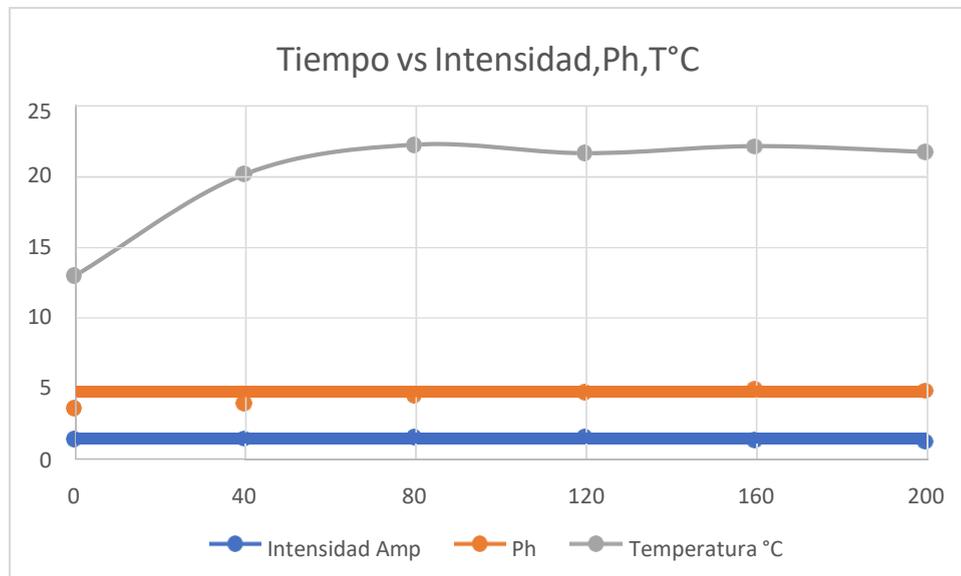
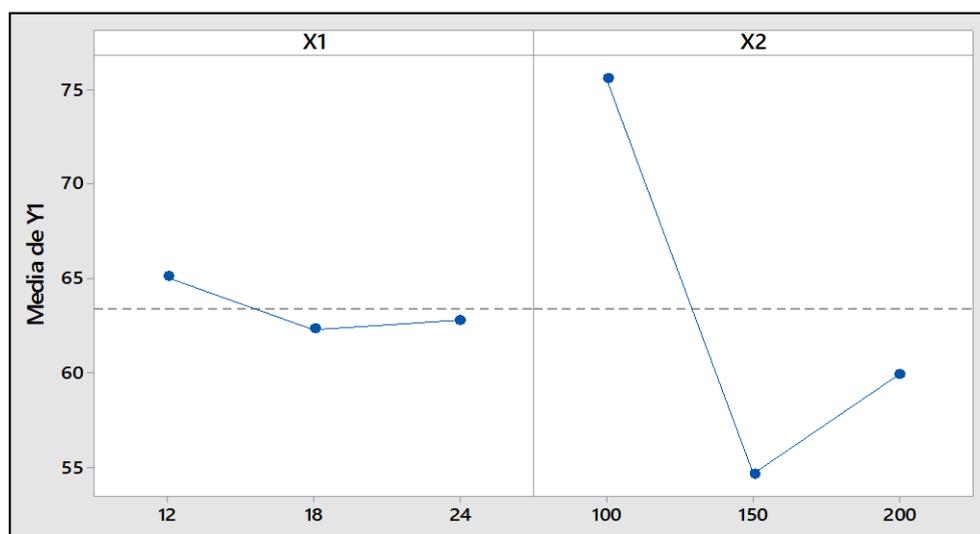


Figura 30

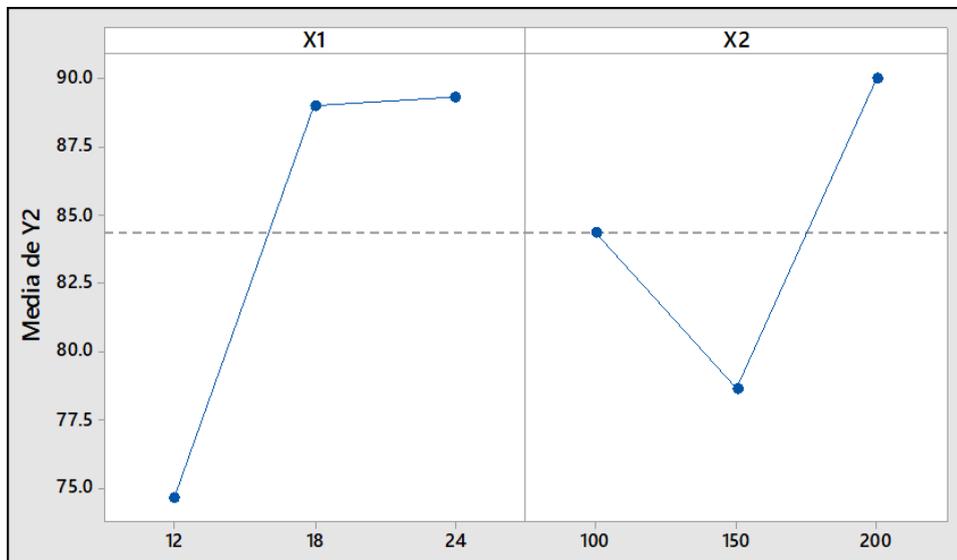
Efectos principales para Y1 (% de Remoción de DQO)



Nota: De la gráfica se puede observar que X1 representa al sistema cuando trabaja a 12, 18 y 24 voltios, la media del % de remoción se encuentra entre 60 y 65%.

Figura 31

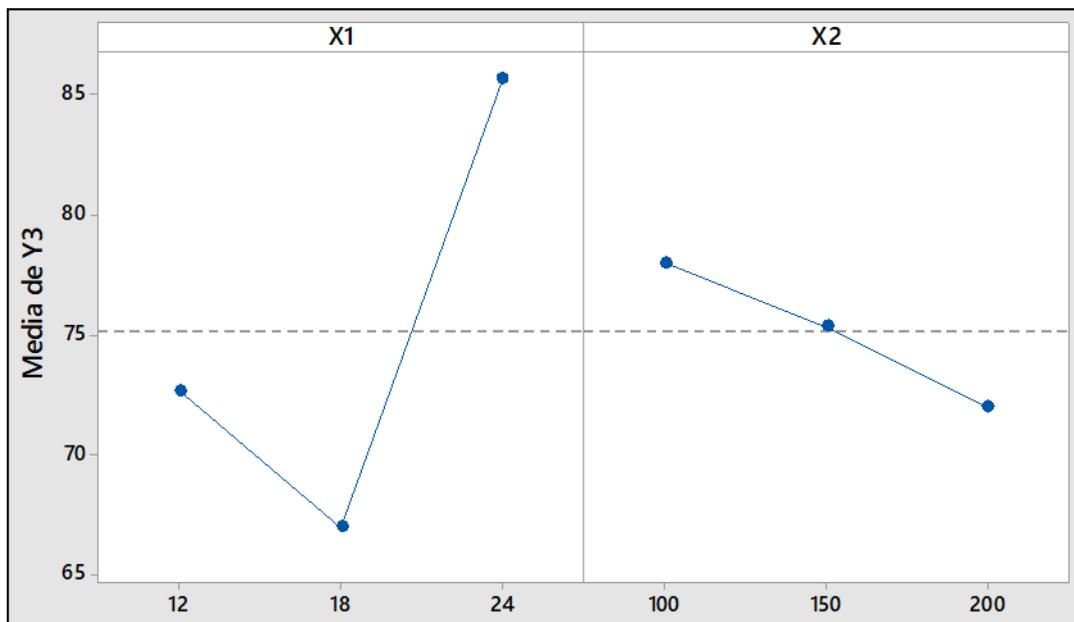
Gráfica de Efectos Principales para Y2 (% de remoción de la Turbidez)



Nota: En la presente gráfica se observa que a 24V el porcentaje de remoción es casi 90%, entre 18V y 24V la remoción es muy próxima decayendo a 12 V. Respecto al tiempo se observa que a 100min existe una remoción del 85% a 150min decae y aumenta a los 200min.

Figura 32

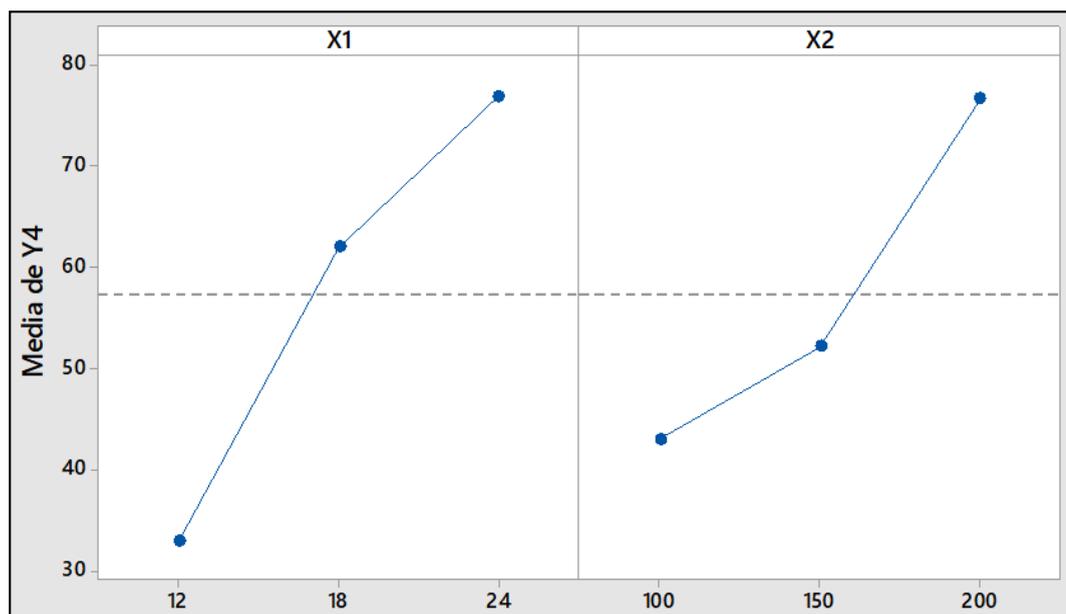
Gráfica de Medias para Y3 (% de Remoción de Sólidos Totales)



Nota: Para 100min se ha removido mayor a 75% para 150min 75% y para 200 min se observa la tendencia.

Figura 33

Gráfica de Medias para Y4 (Energía consumida)



5.2 Resultados Inferenciales

De los resultados obtenidos, se confirma que el mayor porcentaje de Remoción de DQO se da cuando se trabaja a voltaje=12, siendo este proceso de Electrocoagulación y ozonificación satisfactorio logrando reducciones del 83.7% trabajados en un tiempo de 100 minutos y se infiere su reducción total en un tiempo muy cercano a este. Asimismo, los resultados indican que el proceso de remoción de DQO, Sólidos totales y Turbidez se incrementan con la presencia del Ozono.

También se observa que la energía consumida en 12 V tiene bajo consumo incrementándose a mayor intensidad, esto se demuestra ya que el consumo de energía es Intensidad x Tiempo, a mayor voltaje mayor intensidad.

Al transcurrir el tiempo se observa que de 100 a 200min la tendencia es incrementar el consumo de energía.

VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

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

De la figura 43 Efectos principales para Y1 (% de Remoción de DQO) podemos observar que en X1 cuando trabaja a 12V su media es de 65%, a 18 V se encuentra por debajo de la media, cuando trabaja a 24V se ha incrementado ligeramente pero aún se encuentra por debajo de la media. De esta gráfica podemos concluir que con 12V se obtiene mejor % de remoción.

En X2 obtenemos una relación en función del tiempo, es decir que, en 100 min, donde nos indica que a ese tiempo se ha removido más del 75% y con 150min se encuentra por debajo de la media, incrementándose en 200 min.

A menor voltaje mayor % de degradación y a menor tiempo mayor % de remoción

Los datos experimentales obtenidos en la remoción de sólidos totales disueltos y turbidez mediante electrocoagulación y ozonificación de aguas residuales de destilería se muestran en la tabla 5 resultados experimentales, la se sometió al análisis estadístico, a fin de responder la hipótesis planteada.

El primer paso consistió en realizar un análisis de varianza con la finalidad de comprobar que las variables independientes seleccionadas correlacionan con la variable dependiente.

El modelo de diseño experimental utilizado fue el de Diseño Factorial de 2 factores con 3 niveles. La información del factor es:

Tabla 10

Regresión factorial general: Y1 vs. X1; X2

Factor	Niveles	Valores
X1	3	12; 18; 24
X2	3	100; 150; 200

El resultado se muestra en la Tabla 7:

Tabla 11*ANOVA para el modelo de primer orden-Análisis de Varianza*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	1203.87	150.483	*	*
Lineal	4	725.06	181.266	*	*
X1	2	13.29	6.645	*	*
X2	2	711.77	355.886	*	*
Interacciones de 2 términos	4	478.80	119.701	*	*
X1*X2	4	478.80	119.701	*	*
Error	0	*	*		
Total	8	1203.87			

Tabla 12*Resumen del modelo*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
*	100.00%	*	*

Tabla 13*Coefficientes*

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	63.41	*	*	*	
X1					
12	1.694	*	*	*	1.33
18	-1.096	*	*	*	1.33
X2					
100	12.20	*	*	*	1.33
150	-8.742	*	*	*	1.33
X1*X2					
12 100	6.399	*	*	*	1.78

12 150	-6.858	*	*	*	1.78
18 100	-3.251	*	*	*	1.78
18 150	12.76	*	*	*	1.78

Ecuación de regresión

$$Y1 = 63.41 + 1.694 X1_{12} - 1.096 X1_{18} - 0.5989 X1_{24} + 12.20 X2_{100} - 8.742 X2_{150} - 3.459 X2_{200} + 6.399 X1 \cdot X2_{12\ 100} - 6.858 X1 \cdot X2_{12\ 150} + 0.4589 X1 \cdot X2_{12\ 200} - 3.251 X1 \cdot X2_{18\ 100} + 12.76 X1 \cdot X2_{18\ 150} - 9.511 X1 \cdot X2_{18\ 200} - 3.148 X1 \cdot X2_{24\ 100} - 5.904 X1 \cdot X2_{24\ 150} + 9.052 X1 \cdot X2_{24\ 200}.$$

El valor p para el modelo de primer orden se encuentra con un nivel de certeza estadística del 100% se puede afirmar que el modelo describe adecuadamente el comportamiento del proceso de remoción de sólidos totales disueltos y turbidez mediante electrocoagulación y ozonificación de aguas residuales de destilería. Para validar la decisión de emplear el modelo lineal se observa que el valor del coeficiente de determinación R² y el coeficiente de determinación ajustado (R² ajustado) son muy altos, lo que indica con confianza la validez del modelo respecto a los datos pronosticados en el rango de trabajo utilizado. En conclusión, se rechaza la hipótesis nula y se arriba a la conclusión de que existe remoción de sólidos totales y turbidez mediante electrocoagulación y ozonificación de la vinaza.

6.2. Contratación de los resultados con otros estudios similares.

Los resultados de la Tabla 5 y Figura 16 indican que el tratamiento de Electrocoagulación con Ozonificación logra remover el DQO de la muestra de vinaza hasta un 83,7%, gráfica que muestra el comparativo entre los 9 experimentos. Otros autores como (Caicedo, 2010) estudiaron las eficiencias de remoción de DQO en función del pH donde se concluye que el pH natural de la vinaza (4,42) es el adecuado para aplicar una ozonización con fines de disminuir la carga orgánica en este sustrato. Para nuestra investigación la muestra problema partió con un $\text{pH}=3.52$.

De la Tabla 5 observamos que la eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la intensidad de corriente, el suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} liberados por los respectivos electrodos se acuerdo a lo estudiado por el autor (Barrera, 2014).

(Salas, 2019) también estudió el proceso híbrido de electrocoagulación / ozono para el tratamiento de aguas grises, donde se estudiaron los efectos de varios parámetros entre ellos la demanda química de oxígeno (DQO), SST y la turbiedad del agua gris. En la búsqueda de la mejor combinación de factores (variables), se realizó una serie de experimentos para obtener un efecto sobre la variable saliente dando como resultado con la intensidad de corriente de 0,5 amperios, una turbiedad de 62.22 %, en SST 85.44% y en DQO 49.59 %. Con la aplicación de la intensidad de corriente de 1.5 amperios dio como resultado la reducción de turbiedad a un 82.64 % en SST, 91.20% y en DQO 68.29 %, que está cumpliendo con la normativa establecida con resultado muy satisfactorios y demostrando las bondades de esta tecnología.

6.3. Responsabilidad Ética de acuerdo con los reglamentos vigentes.

En cumplimiento a la responsabilidad ética, como seres humanos percibimos y somos conscientes, en distinto grado, de la existencia y sus condiciones y ante tal hecho, damos respuesta, sea con acciones u omisiones. Así, si nos damos cuenta del deterioro del planeta, eso mismo nos exige una respuesta personal y colectiva, disminuyendo nuestra huella ecológica dejando de comprar productos que sabemos dañan al medio ambiente (Santillán, 2019). Esta responsabilidad ética surge de nuestro mero hecho de existir y ser conscientes del mundo en el que vivimos.

En tal sentido como autores de esta Tesis después de investigar diversas bibliografías proponemos esta Técnica de Electrocoagulación con Ozonificación para brindar una alternativa de solución a la remoción de Turbidez y sólidos totales a las aguas residuales de Destilería (Vinaza) que causan un gran daño a nuestro medio ambiente.

CONCLUSIONES

1. Para la remoción de sólidos totales disueltos, turbidez y demanda química de oxígeno del agua residual de destilería, se ha construido un equipo de electrocoagulación incorporando un generador de ozono, donde se evaluó la viabilidad del método y se comprobó que la remoción de los parámetros fisicoquímicos para la remoción de los Sólidos Totales se encuentran en el rango de 40% a 91%, para la remoción de la Turbidez se encuentran entre 58% a 93% y para la remoción del DQO se encuentran en un rango de 48.16% a 83.7%.

2. Se caracterizó el agua residual inicial de la vinaza en un laboratorio acreditado, los resultados muestran que presenta un pH ácido de 3.52, una Demanda Bioquímica de Oxígeno de 122 775 mg BOD 5/l, una concentración de DQO de 202 532.40 mg/l, en Sólidos Totales reporta 125 095 mg/l y 650 NTU de Turbidez. Dentro de la caracterización inicial también se determinaron los metales totales observándose concentraciones relativamente altas de iones calcio, fósforo, potasio, magnesio y sodio.

3. Se ha seleccionado para el estudio los parámetros más adecuados de operación del equipo de electrocoagulación y ozonificación como potencial y tiempo de operación. En el estudio se evidencia que las condiciones de operación más adecuadas fue el trabajado a un potencial eléctrico de 12 voltios y tiempo de operación del módulo de electrocoagulación de 100 min, alcanzando un porcentaje de remoción de 83.7% de Demanda Química de Oxígeno, 74% de Remoción de Sólidos totales y 78% de remoción de Turbidez. Así mismo a las condiciones de operación potencial eléctrico de 12V y tiempo de operación de 100 min se obtiene un menor consumo de energía eléctrica que es 20.60 (KWh/l).

La constante cinética de la degradación de DQO fue evaluado asumiendo un comportamiento de 1er orden obteniéndose una constante de velocidad de 0.000203 1/s a las condiciones de 18 V en 100 min y 9.16×10^{-5} 1/s a 24 V y 200 min.

De los dos parámetros analizados el potencial eléctrico contribuye en mayor grado a la remoción de DQO, turbidez y sólidos totales disueltos.

Los hallazgos del presente estudio revelan la viabilidad técnica de la electrocoagulación/ Ozonificación como una técnica confiable para la remoción de sales de ambientes acuosos.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar adecuadamente una caracterización inicial de la muestra, lo cual servirá como parámetros iniciales de evaluación.
2. Se recomienda escoger adecuadamente el diseño de operación, con lo cual se trabajará las posibles combinaciones de experimentos.
3. Se recomienda seleccionar adecuadamente con ánodos a trabajar y tomar las medidas adecuadas para el trabajo tanto para el ánodo como cátodo.
4. Seleccionar adecuadamente los instrumentos, equipos con los cuales trabajar.
5. Seleccionar adecuadamente los tiempos a trabajar, para el desarrollo del experimento.
6. Medir con precaución la Demanda Química de Oxígeno, Sólidos Totales, Turbidez antes de cada corrida y durante el proceso a analizar.
7. Contar con equipos calibrados que garanticen la confiabilidad de los resultados.
8. Efectuar estudios de tratamiento de la vinaza para la recuperación de fosforo potasio y calcio (NPK).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, O.; Sulieman, A.M.E. & Elhardallou, S.B. 2013. Physicochemical, chemical and microbiological characteristics of vinasse, A by-product from ethanol industry. *American Journal of Biochemistry*, 3(3), pp.80-83.
- Arango. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 49-56. Arango, A. y. (2008). Tratamiento de aguas residuales de la industrias por electrocoagulación. Obtenido de <https://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/458/14ARTICULOABR.pdf>
- Andía Cárdenas, Yolanda; de Vargas, Lidia Barrenechea Martel, Ada, “Tratamiento de agua: coagulación floculación”, *Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico Sedapal*, Lima, 2000.
- Aguilar Villanueva, Juan Carlos; Bazán Moya Junior, “Efecto de la intensidad eléctrica y el tiempo en la disminución de la materia orgánica y turbidez en la electrocoagulación de las aguas residuales de la ciudad universitaria UNT, 2018.
- Aristizábal Alzate, C. (2015) Caracterización físico-química de una vinaza resultante de la producción de alcohol de una industria licorera, a partir del aprovechamiento de la caña de azúcar [Investigación Científica y Tecnológica- Vol. 6 Núm. 2 (2015) - Publicado 2015-12-30, <https://doi.org/10.21500/20275846.1729>]
- Asaithambi et al. (2012). Electrocoagulación asistida por ozono para el tratamiento de efluentes de destilería [Departamento de Ingeniería Química, Instituto Nacional de Tecnología, Tiruchirappalli 620 015, Tamilnadu, India]
- Basanta, R., García, M., Cervantes, J., Mata, H. y Bustos, G. (2007). Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera: una revisión. *Ciencia y tecnología alimentaria*. 5:293-305.
- Bourzac Suárez, Verónica, Mesa Mesa, Liliana, “Obtención de inhibidores ecológicos de la corrosión por electrocoagulación a partir de la vinaza”, Trabajo de Diploma, Facultad de Ingeniería Química, 2006.
- Barrera. (2014). Aplicaciones Electroquímicas al Tratamiento de Aguas Residuales. MÉXICO: REVERTÉ.

- Bermúdez, R.; Hoyos, J.; Rodríguez, S. "Evaluación de la disminución de la carga contaminante de la vinaza de destilería por ensayo anaeróbico". Revista Internacional de contaminación ambiental. 2000, 16, 103-107. ISSN: 0188-4999
- Caballero, V. & Álvarez, D. (2013). Efecto de niveles crecientes de vinaza en el rendimiento agroindustrial de la caña de azúcar en un suelo Ultisol del departamento de Caazapá, Paraguay. Investigación Agraria. 11(2): 29-31.
- Callejas, R., Silva, A., Peppi, C & Seguel, O. (2014). Factibilidad agronómica del uso de vinaza, subproducto de la fabricación del pisco, como biofertilizante en viñedos. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 8(2): 230-241
- Castañeda Silvestre et al (2019) Influencia de la densidad de corriente y peróxido de hidrógeno en la remoción de color de efluentes de recurtido mediante electrocoagulación <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/14133>
- Chanfón, J.; Lorenzo, Y. "Alternatives for treatment of the distillery vinasse. National and international experiences".
- Revista Centro Azúcar. 2014, 41 (2), 56-67. ISSN: 2223-4861.
- Charoenlarp. K.And Choyphan W. (2019) Reuse of dye wastewater thorough color removal with electrocoagulation process. Assian Journal on Energy and Environment. 10: 250-260
- Dávila, J.; Machuca, F.; Marrianga, N. "Reducción de demanda química de oxígeno, carbono orgánico total y sólidos totales en vinazas mediante electroflotación/oxidación". Revista Ingeniería e Investigación. 2009, 29, 35-38. ISSN: 0120-5609
- Farreras, J. & Párraga, C. (2013). Evaluación de lodos de vinaza como biofertilizante en dos tipos de suelo. Unellez de Ciencia y Tecnología. 31: 26-32.
- Gamero Quijano (2011) Artículos Remoción de bacterias patógenas del agua mediante electrocoagulación con ánodos de aluminio [Removal of pathogenic microorganisms from water by electrocoagulation with aluminum electrodes- DOI: 10.24850/j-tyca-2020-04-05]

- Hing Cortón, Romelia; Ojeda Armaignac, Elaine Tratamiento De La Vinaza Por Electrocoagulación Tecnología Química, Vol. XXVIII, Núm. 2, Mayo-Agosto, 2008, Pp. 5-10 Universidad De Oriente, Santiago De Cuba, Cuba.
- Ibarra Camacho, R. (2019). Caracterización fisico-química de vinazas de destilerías [Revista Cubana de Química VOL. 31 NÚM. 2, 246-257 (2019), <https://cubanaquimica.uo.edu.cu/index.php/cq/article/view/4899>]
- Roberto Ibarra-Camacho, MSc. Leandro León-Duharte, Lic. Aylin Osoria-Leyva “Caracterización Fisico-química de vinazas de destilerías”.
- Jimenez, J. (2013). Depuración electroquímica de aguas residuales provenientes de una planta de tratamiento de vinazas . Mexico: Centro de investigación y asistencia y diseño de tecnología del estado de Jalisco.
- Larrahondo, J. “La vinaza: Caracterización de la vinaza, usos y aprovechamientos potenciales” Memorias Seminario internacional de Fertilización y Nutrición de la Caña de Azúcar, Tecnicaña. Cali, Colombia, pp. 69 - 90, Noviembre 2009.
- Lugo S.: “Evaluación del Tratamiento de las Aguas Residuales de una Destilería mediante Lodos Activados”, Tesis de Grado, U.L.A., 2001. 2. Singh D.S. and Nigam P., “Disposal and Treatment of Distillery Effluent”. In Environmental Biotechnology. Principles and Applications. Edited by M. Moo-Young. Kluwer Academic Publishers, Holland, 1995.
- Morante, Gonzalo G., "Electrocoagulación de aguas residuales", Revista colombiana de física, vol. 34, Nº 2, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2002. Disponible en: <http://calima.univalle.edu.co/revista/vol342/articulos/pdf/3402484.pdf>.
- Madejon, E.; Lopez, R.; Murillo, J.M. & Cabrera Francisco, 2001a. Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). Agriculture, Ecosystems & Environment, 84(1), pp.55-65.

- Madejon, E.; Diaz, M.J.; Lopez, R. & Cabrera, F. 2001b. Co-composting of sugarbeet vinasse: influence of the organic matter nature of the bulking agents used. *Bioresource Technology*, 76(3), pp.275-278.
- Morales G. Barrera C. Balderas P. Zaldumbide F. Reyes H. And Bilyeu B. (2014). Rmoval of Color and Chemical Oxygen Demand Using a Coupled Coagulation-Electrocoagulation-Ozone treatment of Industrial Wastewater the containing offset Printing Dyes. *Journal Mexican Chemical Society* 58: 352-368
- Ojeda, E. H. (2010). Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de hierro. Cuba: Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente.
- Ojeda, E. H.-C. (2012). Estudio comparativo del uso de electrodos de hierro y aluminio en el proceso de electrocoagulación de la vinaza . cuba : Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente.
- Pávlov K. F., Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnologías químicas, Editorial Mir, Moscú, 1981.
- Perry J. H., Chilton C. H., *Chemical Engineers Handbook*, 6ta edición, t. I, McGrae Hill, New York, 1973.
- P. Asaithambi, Modepalli Susree, R Saravanathamizhan, Manickam Matheswaran, “Electrocoagulación asistida por ozono para el tratamiento de efluentes de destilería” 2012.
- Salas Vizcarra, Cristian Joel 2019 “Optimización de los Parámetros Operacionales en Procesos Híbridos de Electrocoagulación y Ozono en la Remoción de la Turbiedad en Efluentes provenientes de aguas grises, en la provincia de Huánuco” - 2019 <http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/2690>
- Samaniego, A. (2015). Aplicación de tratamiento a efluentes de industria textil mediante electrocoagulación.
- Singh D.S. and Nigam P., “Disposal and Treatment of Distillery Effluent”. In *Environmental Biotechnology. Principles and Applications*. Edited by M. Moo-Young. Kluwer Academic Publishers, Holland, 1995.

- Soares O. Faria P. Orfao J. And Pereira M. (2017). Ozonation of textile Effluents and Dye Solutions in the Presence of Activated Carbon under Continuous Operation Separation Science and Technology, 42: 1477-1492
- Torres, A., Lopez S. De La Rosa C. Vega M. Santoyo M. And Peralta J. (2014) Electrocoagulation Process Coupled with Advanced Oxidation Techniques to Ireatment of Dairy Industry Wastewater. International Jornal of Electrochemical Science 9: 6103-6112
- Villanueva Salazar, C (2020) Optimización en la Eliminación De La Turbiedad Utilizando El Método Taguchi En Aguas Residuales de lavado de Autos “Mi Kahomy”, Mediante El Módulo De Electrocoagulación Asistida Con Poas, Distrito Amarilis - Provincia Huanuco - 2020 [Universidad De Huánuco, Repositorio Udh- Institucional- [Http://Repositorio.Udh.Edu.Pe/123456789/2855](http://Repositorio.Udh.Edu.Pe/123456789/2855)]

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

Tabla 14

Matriz de consistencia

"Remoción de sólidos totales disueltos y turbidez mediante electrocoagulación y ozonificación de aguas residuales de destilería".					
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
<p>GENERAL: ¿Como remover los sólidos totales disueltos y turbidez mediante electrocoagulación y ozonificación en las aguas residuales de destilería?</p>	<p>GENERAL: Determinar el grado de remoción de los sólidos totales disueltos y la turbidez mediante el proceso de electrocoagulación y ozonificación presentes en las aguas residuales de destilería.</p>	<p>GENERAL: El sistema de tratamiento por electrocoagulación y ozonificación logran la mayor remoción de sólidos totales disueltos y turbidez presentes en las aguas residuales de destilería.</p>	<p>DEPENDIENTE: G(y)= grado de remoción de solidos totales y disminución de turbidez.</p>	<p>y₁= % de sólidos y₂= % de Turbidez y₃= Características del agua tratada.</p>	<p>y_{1.1}. Turbidez y_{2.1}. Solidos totales y_{3.1}. Concentración y_{4.1}. pH</p>
<p>ESPECIFICA: ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua residual de destilería para seleccionar las mejores condiciones de remoción?</p>	<p>ESPECIFICA: Analizar los parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua residual de destilería.</p>	<p>ESPECIFICA: El alto contenido de solidos totales y la turbidez son características del agua residual de destilería para seleccionar las mejores condiciones de remoción.</p>	<p>INDEPENDIENTE: F(x₁) = Condiciones de remoción de demanda Química de Oxígeno sólidos totales y disminución de la turbidez en aguas</p>	<p>x₁. Aguas Residuales x₂. Electrocoagulación</p>	<p>x_{1.1}. Características Fisicoquímicas. x_{1.2}. Flujo de agua residual x_{2.1}. Intensidad de corriente x_{2.2}. Distancia de electrodos</p>

<p>ESPECÍFICA: ¿Cuáles serán los parámetros de operación más adecuados del proceso de electrocoagulación y ozonificación para lograr altos valores de remoción de sólidos totales, turbidez y demanda química de oxígeno presente en el agua residual de destilería?</p>	<p>ESPECÍFICA: Determinar los parámetros más adecuados de operación del equipo de electrocoagulación y ozonificación para lograr altos valores de remoción de sólidos totales y turbidez presente en el agua residual de destilería.</p>	<p>ESPECÍFICA: Una mejor relación entre el proceso de electrocoagulación y la ozonificación logran altos valores de remoción de la demanda Química de Oxígeno, sólidos totales y la turbidez presente en el agua residual de destilería.</p>	<p>residuales de destilería.</p>	<p>x₃. Ozonificación x₄. Electrocoagulación/ Ozonificación</p>	<p>x_{2.3} Potencial eléctrico x_{2.4} Tiempo x_{3.1} (mg/h) Ozono x_{4.1} Tiempo x_{4.2} pH x_{4.3} % sólidos/Tiempo</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Anexo 2 : Fotografías de la Prueba Experimental

Figura 34

Desarrollo de pruebas experimentales en el Laboratorio FAINGENIEROS SAC



Figura 35

Pruebas experimentales midiendo el DQO, SST y TURBIDEZ de la Vinaza.



Figura 36

Corridas experimentales (EC) en los diversos tiempos.



Nota: Pruebas experimentales antes del uso de los viales.

Figura 37

Corridas experimentales (EC) en los diversos tiempos.



Nota: Pruebas experimentales (EC) con el uso de viales.

Figura 38

Diversas corridas en tiempo y voltaje.



Anexo 3: Equipos y Materiales

Figura 39

Pruebas con Viales



Figura 40

Colorímetro



Figura 41

Equipo de Ozono empleado.

