



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**REMOCIÓN DE CONTAMINANTES
REFRACTARIOS DE LAS VINAZAS
TEQUILERAS POR ELECTROCOAGULACIÓN**

TESIS

Que para obtener el grado de
**MAESTRO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

Presenta:

ING. CIVIL JOSÉ EDUARDO JIMÉNEZ LÓPEZ

Director de tesis:

DR. JORGE DEL REAL OLVERA

Puebla, Pue.

Junio 2016

Derechos de Propiedad Intelectual

Este trabajo de Tesis se desarrolló en el seno de la Unidad de Investigación de Tecnología Ambiental del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), en el marco del proyecto de Fondo Mixto denominado **“Desarrollo e Implantación de Modelos de Gestión Ambiental bajo Criterios Internacionales para los Sectores Productivos del Estado de Jalisco”**, contando con el apoyo financiero del Consejo de Ciencia y Tecnología bajo el número de proyecto **187562** sometido en la Convocatoria 2012-02 “Medio Ambiente” del Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Jalisco. La dirección de esta tesis estuvo a cargo del **Dr. Jorge del Real Olvera**, así como la responsabilidad técnica del proyecto aquí mencionado y quien es el autor de la idea original de dicho proyecto de investigación. Esta Tesis contiene extractos e ideas originales de los informes técnicos del proyecto arriba mencionado, los cuales fueron aprobados satisfactoriamente por el CONACYT. Por lo anterior, cualquier uso total o parcial de la información contenida en esta tesis con fines no académicos, queda condicionado a la autorización por escrito y previa autorización del CIATEJ.

CIATEJ

Dedicatorias

Dedico este trabajo a mi familia por su apoyo.

A ti Diego por tu ejemplo de constancia.

Agradecimientos

A mi asesor Dr. Jorge del Real Olvera por su apoyo y confianza.

A CIATEJ, Jorge, Dra. Lucy, Valentín y Ramiro por ayudarme a crecer con su conocimiento.

A mi esposa por su paciencia y apoyo.

Índice

Contenido

INTRODUCCION	1
OBJETIVOS	4
Objetivo General	4
Objetivos Particulares	4
HIPÓTESIS.....	4
CAPÍTULO I	5
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.0 Generalidades de	5
las vinazas	5
1.1 El agave	5
1.2 Ecología del cultivo de agave	6
1.3 Usos del agave	8
1.4 Proceso de producción de tequila:.....	8
1.5 Fuente de producción.....	11
1.6 Características principales de las vinazas	15
1.7 Sistemas de Tratamiento de Vinazas Tequileras	16
CAPÍTULO II	18
PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA.....	18
2.1. Tecnologías electroquímicas	19
2.2 Electrocoagulación	21
2.3 Fundamento teórico del proceso de electrocoagulación	21
2.4 Factores que afectan a la electrocoagulación.....	27
2.5 Ventajas y desventajas de la Electrocoagulación.....	29
2.6 Efluentes tratados con electrocoagulación.....	31
CAPÍTULO III	34
MÉTODOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES.....	34
3.1 Metodología.....	34
3.2 Origen de la muestra	35

3.3	Metodología analítica	35
3.4	Descripción instrumental	35
3.4.1	Determinación de la Demanda Química de Oxígeno	35
3.4.2	Determinación de Turbiedad	36
3.4.3	Determinación de pH, Solidos Disueltos Totales y Conductividad	36
3.4.4	Determinación de Color	36
3.4.5	Escaneo de longitud de onda.....	36
3.4.6	Reactor de electrocoagulación.....	36
3.4.7	Fuente de poder	38
3.4.8	Baño recirculador.....	39
3.5	Metodología experimental	39
3.6	Investigación preliminar	40
3.7	Matriz Experimental	40
3.8	Análisis Anova	42
3.9	Desgaste de los electrodos	43
4.1	Resultados:	44
4.1.1	Resultados de la Investigación preliminar	44
4.2	Magnitud de los factores de diseño.....	56
4.3	Origen y Caracterización de la muestra.....	57
4.4	Resultados del diseño 3^K.....	57
4.4.4.	Análisis conjunto de la remoción de DQO, Color y turbiedad.	63
4.5	Análisis estadístico inferencial.	65
4.5.1	Remoción de DQO.....	66
4.5.2	Análisis ANOVA DQO.....	66
4.5.3	Diferencia de medias para DQO.	67
4.5.4	Estimación puntual de la media para DQO.....	68
4.5.5	Remoción de turbiedad.....	69
4.5.6	Análisis ANOVA Turbiedad.....	69
4.5.7	Diferencia de medias.....	71
4.5.8	Estimación puntual de la media para Turbiedad.....	71
4.5.9	Remoción de Color.....	72
4.5.10	Análisis ANOVA para la variable color	72
4.5.11	Análisis de medias diferentes para variable Color	73

4.6	Análisis gráfico de los supuestos de distribución.	74
4.7	Análisis General Inferencial	74
4.8	Desgaste de placas.....	75
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones		82
Bibliografía		84

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Physicochemical characteristics of Tequila vinasses (Lopez & et al. 2010)	16
Tabla 2 Potenciales de oxidación en medio ácido de oxidantes químicos	19
Tabla 3 Análisis de agua metodología analítica	35
Tabla 4 Diseño factorial 3 ^k	40
Tabla 5 Matriz de diseño factorial	41
Tabla 6 Factores experimentales.....	44
Tabla 7 Porcentaje de remoción de las variables de salida.....	45
Tabla 8 Experimento exploratorio de significancia del tiempo para la remoción de color y DQO.....	48
Tabla 9 Valores de salida del experimento exploratorio.....	49
Tabla 10 % de remoción de Color y DQO.....	49
Tabla 11 Factores a controlar para observar la significancia del pH, densidad y Temperatura.....	52
Tabla 12 Factor de remoción de DQO con respecto al tiempo.....	52
Tabla 13 Factor de remoción de Color con respecto al tiempo.....	53
Tabla 14 Diseño factorial 3 ^k	56
Tabla 15 Caracterización inicial de la muestra.....	57
Tabla 16 Remociones más significativas de DQO.....	57
Tabla 17 Remociones más significativas de Color.....	61
Tabla 18 Fotografías experimentales.....	64
Tabla 19 Análisis de varianza para DQO- Suma de cuadrados tipo III	67
Tabla 20 Método: 95.0% LSD para DQO por pH	68
Tabla 21 Método 95%porcentaje LSD para DQO por temperatura.....	68
Tabla 22 Análisis de varianza para turbiedad-Suma de cuadrados tipo III	69
Tabla 23 Prueba de múltiple rango para Turbiedad Método: 95% porcentaje LSD Turbiedad.....	71
Tabla 24 Análisis de varianza para Color – Suma de cuadrados tipo III.....	72
Tabla 25 Prueba de múltiple rango para Color por pH: Método 95% LSD	73
Tabla 26 Desgaste de placas (ánodo y cátodo) por experimento.....	76
Tabla 27 Contenido de aluminio diluido.....	78

INDICE DE GRAFICAS E IMAGENES

Gráfica 1 Distribución de plantas agaváceas	5
Gráfica 4 Empresas que producen tequila a nivel nacional (2012)	13
Gráfica 5 Registro del Consejo Regulador del Tequila	13
Ilustración 6 Proporción de empresas tequileras en Jalisco.....	¡Error! Marcador no definido.
Gráfica 7 Empresas tequileras por municipio en Jalisco.....	13
Gráfica 8 Producción de Tequila (40% Alc. Vol) fuente: Consejo Regulador del Tequila	15
Gráfico 16 Factor de Remoción de DQO por número de experimento	45
Gráfica 17 Gráfica de puntos para factores de remoción de DQO	46
Gráfica 18 Efecto de la densidad de corriente.....	46
Gráfica 19 Grafico de caja y brazos para la remoción de DQO.....	47
Gráfica 20 Efecto de Densidad de Corriente y el pH.....	47
Gráfica 21 Remoción de DQO con respecto al tiempo	50
Gráfica 22 Remoción del color con respecto al tiempo.....	50
Gráfica 23 Comportamiento del pH de la solución respecto al tiempo	51
Gráfica 24 Comportamiento de la conductividad del sistema respecto al tiempo	51
Gráfica 25 Remoción de la DQO respecto al tiempo cuando se controla pH, densidad de corriente y temperatura.....	53
Gráfica 26 Remoción del color respecto al tiempo cuando se controla pH, densidad de corriente y temperatura	54
Gráfica 27 Remoción de DQO ordenado por periodos de muestreo	54
Gráfica 28 Remoción de color ordenado por periodos de muestreo	55
Gráfica 29 Remoción de DQO respecto al tiempo	58
Gráfica 30 Gráfico de Caja y Bigotes para el % de remoción de DQO	59
Ilustración 31 Histograma % de remoción de DQO	59
Gráfica 32 Remoción de Color respecto al tiempo	60
Gráfica 33 Gráfico de Caja y Bigotes para el % de remoción de Color	60
Gráfica 34 Remoción de la turbiedad respecto al tiempo	62
Gráfica 35 Gráfica Radial para remoción de las variables de salida	63
Gráfica 36 Remoción de DQO de mayor a menor	66
Gráfica 37 Gráfico de interacciones pH-Temperatura.....	67
Gráfica 38 Remoción de Turbiedad de mayor a menor.....	69
Gráfica 39 Gráfica de interacciones para los factores pH-Temperatura	70
Gráfica 40 Remoción de Color de mayor a menor.....	72
Gráfica 41 Gráfica de interacciones de pH y Temperatura.....	73
Gráfica 42 Escaneo de Longitud de Onda del Experimento 17.....	75
Gráfica 43 Diagrama de barras del desgaste de placas	77
Imagen 1 Etapa de generación de vinazas tequileras.....	10
Imagen 2 Proceso tradicional fuente: Martinez J. 2012	11

Imagen 3 Territorio de la Denominación Origen Tequila	12
Imagen 4 Sistema de tratamiento de vinazas tequileras instalados	17
Imagen 5 Tecnologías Electroquímicas (Barrera, 2014)	20
Imagen 6 Proceso de oxidación - reducción (Borckris & a, 2003)	26
Imagen 7 Esquema General de laboratorio	34
Imagen 8 Vista Lateral. Superior y detalle de placas del Reactor de Electrocoagulación	37
Imagen 9 Reactor para Electrocoagulación	37
Imagen 10 Fuente de poder	38
Imagen 11 Esquema de significancia ANOVA (Gutiérrez, 2012).....	43
Imagen 12 Placas Cátodo y Ánodo.....	79
Imagen 13 Desgaste de ánodo (1)	80
Imagen 14 Ilustración de ánodo (2)	80
Imagen 15 Desgaste de ánodo (3)	81
Imagen 16 Arreglo de especies formadas sobre el ánodo.....	81

RESUMEN

En todo el mundo, la industria de las bebidas y los alimentos es de gran relevancia y México no puede ser la excepción, específicamente en Jalisco con la industria tequilera. Esta industria ha ido en crecimiento a lo largo del tiempo con dos importantes problemas que resolver en el ámbito ambiental, el primero es el manejo del residuo líquido denominado “*Vinazas*” (producto de la destilación) y el segundo, el manejo del residuo sólido denominado “*Bagazo*”. Se estima que por cada litro de tequila en el proceso se generan entre 10-12 L de vinazas, las cuales contienen altas concentraciones de materia orgánica (DQO=35-60 g/L), pH ácido (3–4.5), color café (6,000–12,000 Pt-Co) y alta turbiedad (600–4,000 NTU). De acuerdo con la Cámara Nacional de la Industria Tequilera, de la generación total de vinazas, 30% se descarga a ríos y afluentes, de lo cual, 30% está saneada, el 3% lo tiene de forma parcial y 37% no tiene ningún control en la alcalinidad y la temperatura. El objetivo de este trabajo fue analizar la eficiencia de remoción de color, turbiedad y materia recalcitrante de los efluentes de una planta de tratamiento de vinazas cuando se emplea la tecnología de electrocoagulación como proceso de adsorción avanzado. El mejor control del proceso electroquímico se obtiene con pH 7, densidad de corriente de 148.57 A/m² y temperatura de 25°C, bajo estas condiciones la remoción fue para DQO, Color y Turbiedad de 84.21%, 63.12% y 74.87% respectivamente. El análisis estadístico de los resultados experimentales generó evidencia de remoción de refractarios con un nivel de confianza del 95%, los cuales se ubicaron en promedio para DQO entre 67-77%, para la turbiedad entre 73-74% y para el color entre 67-77%. Basados en los resultados se puede afirmar que la Electrocoagulación es una excelente alternativa para la remoción de refractarios de los efluentes de una planta de tratamiento de vinazas.

ABSTRACT

In worldwide, the beverage industry and food is highly relevant and Mexico cannot be the exception, specifically in Jalisco with the tequila industry. This industry has been growing over time with two important problems to solve in the environmental field; the first is the management of liquid waste called "Vinasses" (product of distillation) and the second, the management of solid waste called "Bagasse". It is estimated that for every liter of Tequila in the process is generate 10-12 L of vinasses, which contain high concentrations of organic matter (COD=35-60 g/L), pH (3-4.5), brown color (6,000-12,000 Pt-Co) and high turbidity (600-4,000 NTU). According to the National Chamber of the Tequila Industry, of the generation total of vinasses, 30% is discharged into rivers and streams, of this 30% is depurated, 3% has partial depuration and 37% have no control alkalinity and temperature. The objective of this study was to evaluate the efficiency of removal of color, turbidity and recalcitrant matter of effluents from treatment plant of vinasses, when an Electrocoagulation technology is used as advanced adsorption process. The better control of the electrochemical process is obtained with pH 7, current density of 148.57 A/m² and temperature of 25 °C, under these conditions the removal was for COD, Color and Turbidity of 84.21%, 63.12% and 74.87% respectively. A statistical analysis of experimental results, generated evidence for removal of matter refractories with a confidence level of 95%, which were located on average between 67-77% for COD, for turbidity between 73-74%, and for color between 67 -77%. Based on the results we can say that electrocoagulation is an excellent alternative for the removal of refractory of effluents from treatment plant of vinasse.

INTRODUCCION

Es mundialmente conocida la importancia que tiene la industria del tequila en México, principalmente en el Estado de Jalisco. Su desarrollo ha ido en crecimiento a lo largo del tiempo con dos importantes problemas que resolver en el ámbito ambiental, siendo el primero el manejo del residuo líquido denominado “Vinazas” (producto líquido de la destilación) y el segundo el manejo del residuo sólido denominado “Bagazo”, producto de la extracción de los azúcares fermentables de las cabezas de las plantas.

Las vinazas generalmente son descargadas a los cuerpos hídricos sin tratamiento previo, lo cual representa un grave problema ambiental por ser éste un residuo de efectos altamente contaminantes por contener componentes tales como: sales, alta carga orgánica (alcoholes, azúcares, éteres, esteroides, etc.), además de temperatura elevada y pH ácido, que al momento de su descarga representa un peligro al entorno, generando así un desequilibrio ecológico en el medio hídrico.

Es habitual que en las grandes Empresas Tequileras las vinazas sean tratadas mediante un proceso biológico anaerobio, debido a que durante su tratamiento se obtiene un beneficio energético (biogás). No obstante, en el efluente aún existen contaminantes orgánicos recalcitrantes, los cuales representan una amenaza para el medio ambiente acuático debido a sus varias características perjudiciales. Estos contaminantes no pueden ser tratados eficazmente por métodos biológicos convencionales, por lo que se recomiendan los procesos de oxidación avanzada, los cuales han demostrado ser eficaces en la adsorción o mineralización de dichos compuestos. El efecto de estos materiales se refleja principalmente como color, turbiedad y DQO remanente, generado por la presencia de material húmico (Hall, 1965), además de otros compuestos, que aún en bajas concentraciones son capaces de bioacumularse en los sedimentos de los cuerpos hídricos.

La Electrocoagulación (EC) es una tecnología emergente, empleada en el tratamiento de aguas residuales de diversas fuentes como un proceso avanzado de depuración. Los

contaminantes presentes en distintos vertidos son removidos exitosamente aplicando el principio de coagulación, con la ventaja de que para este proceso no es necesario el uso de reactivos químicos adicionales, ya que la aparición de estos elementos es originada por el paso de la corriente eléctrica a través del medio líquido contaminado formando dichos reactivos “in situ”.

En el presente trabajo se pretende demostrar la factibilidad de emplear la tecnología de la Electrocoagulación (EC) para remover color, turbiedad y carga orgánica del efluente de un sistema de tratamiento biológico anaerobio de vinazas tequileras, bajo diferentes condiciones de pH, intensidad de corriente y temperatura.

Para esto en el capítulo 1, se hace una revisión bibliográfica de las generalidades sobre materia prima para el Tequila del proceso de producción del Tequila y la generación de vinazas. Se analizan aspectos como las diversas fuentes de procedencia de las vinazas y sus principales características fisicoquímicas. Así también se mencionan algunos aspectos normativos y legales en el ámbito de los vertidos residuales industriales.

Posteriormente en el capítulo 2, se hace una revisión de los diversos Procesos de Oxidación Avanzada (POA's) empleados en el tratamiento de efluentes industriales. También se analizan las diversas tecnologías Electroquímicas disponibles actualmente y se proporcionan los fundamentos y la aplicación de la Electrocoagulación en el tratamiento de vertidos industriales, analizando sus ventajas y desventajas con respecto a los procesos tradicionales de tratamiento.

En el capítulo 3, se presentan los métodos y las técnicas experimentales empleadas para evaluar el desarrollo de la Electrocoagulación en la depuración del color, turbiedad y materia orgánica de los efluentes del tratamiento de vinazas tequileras apegado a la normatividad ambiental vigente.

Finalmente en el capítulo 4, se hace el análisis y la discusión de los resultados obtenidos experimentalmente del proceso electroquímico realizado bajo diferentes condiciones de

operación, obteniendo con esto las características óptimas en las que se propone se deben realizar los procesos de depuración electroquímica para que funcionen de manera eficiente bajo las condiciones propuestas. Además de lo anterior, se logró hacer un análisis estadístico de los resultados experimentales con lo cual se generó evidencia de remoción de refractarios con un nivel de confianza del 95%.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar la eficiencia de remoción de los contaminantes refractarios presentes en las vinazas tratadas anaeróbicamente de una industria tequilera mediante la técnica de electrocoagulación (EC), analizando la disminución de color, turbiedad y carga orgánica (DQO), cuando se emplean electrodos de aluminio en un sistema discontinuo bajo diferentes condiciones de operación.

Objetivos Particulares

- Muestreo y caracterización del efluente de una planta de tratamiento anaerobia de vinazas Tequileras
- Obtener y analizar la eficiencia de remoción del material recalcitrante presente en los efluentes anaerobios, empleando la técnica de electrocoagulación bajo distintas condiciones de operación: pH (5,7 y 12), intensidad de corriente (74.3, 148.6 y 222.8 A/m²) y temperatura (15,25 y 40°C) en una celda tipo batch con electrodos de aluminio.
- Comparar la eficiencia de remoción de turbiedad, color y demanda química de oxígeno (DQO) con las distintas condiciones de operación propuestas mediante estadística diferencial.
- Identificar los factores que afectan la capacidad de remoción a través de los análisis estadísticos, determinando el nivel de cada factor donde se obtenga la mayor remoción.

HIPÓTESIS

La depuración a través del proceso de Electrocoagulación es una alternativa viable de tratamiento para remover los contaminantes recalcitrantes presentes en los efluentes de un sistema de tratamiento biológico anaerobio de vinazas tequileras.

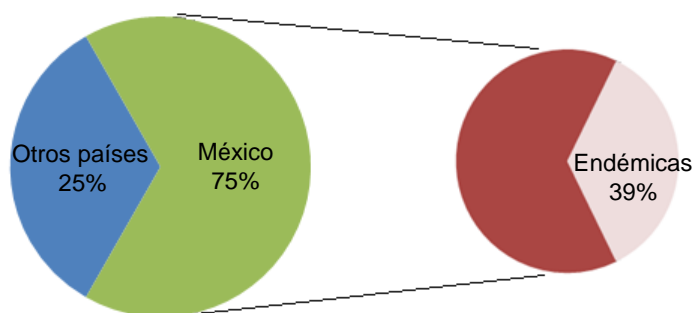
CAPÍTULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.0 Generalidades de las vinazas

1.1 El agave

El género Agave forma parte de la familia de plantas agaváceas o agavaceae (por su nombre científico) y pertenece a la clase de las monocotiledóneas. México es el centro de origen de la familia Agavaceae ya que de las 308 especies descritas en ésta familia (gráfica 1), en México se localizan 232 (75%), de las cuales 151 son endémicas, siendo Oaxaca, Chihuahua, Sonora, Coahuila, Durango y Jalisco los estados con mayor número de especies (Censo Agropecuario 2007, INEGI).



Gráfica 1 Distribución de plantas agaváceas

Las plantas de agave comúnmente conocidos en México como magueyes o mezcales, son endémicas del continente Americano y son abundantes en zonas áridas y semiáridas, templadas y extremosas.

De acuerdo a estudios realizados por García Mendoza en 2004, sobre la biodiversidad de Oaxaca, revela que tan sólo en esta entidad existen 30 especies del género *Agave*, por lo que es considerada la de mayor diversidad en el país. No obstante, con 28 especies, de las cuales se ha confirmado que 25 crecen en forma silvestre, Jalisco es el estado con el mayor número de especies de agave en el occidente de México y el segundo en el país (Vázquez-García, et al. 2007).

En Jalisco, las provincias fisiográficas que presentan la mayor riqueza de especies, son el Eje Neovolcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur, conformadas principalmente por rocas ígneas, las cuales son reportadas como una condición favorable para estas plantas. Entre los tipos de vegetación con mayor número de especies de *Agave* están el bosque de encino y el bosque tropical caducifolio. Algunas de las especies de *Agave* más abundantes que crecen en forma silvestre en el estado de Jalisco son: *Agave angustifolia*, *A. colimana*, *A. inaequidens*, *A. maximiliana*, *A. pedunculifera* y *A. schidigera*. Las especies frecuentemente cultivadas son *Agave americana*, *A. mapisaga* y *A. tequilana*. De estas tres, la única que es cultivada en grandes superficies para aprovechar su piña o cabeza en la elaboración de tequila, es *Agave tequilana* Weber variedad azul.

1.2 Ecología del cultivo de agave

Las plantas de agave se encuentran distribuidas en casi todo el territorio mexicano y crecen en diferentes hábitats. Las condiciones propicias para el perfecto desarrollo de los agaves incluyen un clima templado o subhúmedo cálido, un terreno árido y rocoso y una altitud que va desde el nivel del mar hasta los 3,400 metros de altitud sobre el nivel del mar. No obstante, son más abundantes entre 1,000 y 2,000 metros de altitud, siempre bajo condiciones de exposición total al sol. Al conjugarse estos factores se logran agaves con altos contenidos de azúcar, lo cual permite elaborar mezcales y tequilas de gran calidad. Por el contrario, en lugares bajos o en cañadas, las condiciones de temperatura y de humedad favorecen que las hojas basales envejezcan prematuramente y propicien un producto de baja calidad.

Los agaves pueden crecer en cualquier terreno, pueden desarrollarse en suelos rocosos, áridos e incluso desérticos; pero dan un mayor rendimiento en suelos arenosos, ricos en cal y de fácil drenaje, con rápido escurrimiento de las aguas. Los agaves son resistentes a las sequías, sin embargo, la falta de lluvia retarda el desarrollo de la planta. De acuerdo con la Academia Mexicana del Tequila, A.C., el Agave tequilana requiere de una pluviosidad de 1 000 mm anuales, por lo que el clima de Jalisco resulta ideal, ya que cuenta con una precipitación total media de alrededor de 850 mm anuales.

Los agaves son capaces de soportar temperaturas inferiores a cero grados (siempre y cuando no lleguen a la congelación) y por encima de los 40°C, pero la temperatura ideal para su buen desarrollo debe oscilar alrededor de los 20°C. En las zonas de producción de fibras de henequén en Yucatán, por ejemplo, la temperatura mínima promedio es de 30°C y la máxima es 40°C.

Los suelos en que se cultiva el agave en el estado de Jalisco, de acuerdo con la clasificación científica de la FAO se agrupan en suelos luvisoles, cambisoles y litosoles, y entre las principales características son su color ocre o rojizo. Las condiciones de una textura media o franca son las adecuadas para un balance hídrico adecuado al agave, conservando la humedad de las lluvias sin encharcarse. También son ideales los suelos con cierta profundidad (un mínimo de 40 cm) que no presenten capas endurecidas.

Según investigaciones, este cultivo tiene cierta tolerancia a la acidez del suelo. Sin embargo, la neutralidad de suelos (pH 7) es la preferida por el agave (Macías & Valenzuela, Junio 2009). La experiencia señala que el “agave tequilero” no debe plantarse en suelos arenosos, arcillosos, grises, negros, salinos, muy delgados, con mantos freáticos poco profundos o con tepetates superficiales. Se debe evitar laderas pedregosas muy pronunciadas, a menos de que el agave se utilice como sistema de recuperación en la conservación de suelos.

En cuanto al clima, el Agave tequilana es un cultivo de temporal. Soporta la falta de lluvias por casi medio año, considerando la humedad retenida en el suelo. Sin embargo se han observado síntomas de sequía en plantaciones donde la precipitación pluvial es menor a 600 mm y en suelos poco profundos con deficiencias en materia orgánica.

En climas cálidos se ha observado que la floración de este cultivo se presenta de manera precoz, en un periodo de 6 a 7 años, pero en estas condiciones el rendimiento de azúcares es limitado. Mientras que en los climas templados se favorece la concentración de azúcares, pero la planta prolonga su floración hasta la edad de 8 a 9 años.

1.3 Usos del agave

La explotación y uso del agave se puede generalizar a partir de dos formas principales practicadas actualmente en Jalisco: la obtención de fibras para la producción de diferentes artículos y la elaboración de bebidas alcohólicas. Esta última de mayor importancia que la primera, en consideración de la derrama económica que genera en la entidad.

En la obra *Agaves del Occidente de México* (Vázquez-García, y otros, Jun 2013), se mencionan entre las especies aprovechadas en Jalisco para la obtención de fibras, el maguey “espadín” (*Agave angustifolia*). Sus hojas son aprovechadas como amarres en la elaboración de equipales en el municipio de Zacoalco de Torres y en la región huichola. Además, los huicholes de Mezquitic usan la parte inferior de las hojas como escobetas para limpiar utensilios domésticos. El escapo floral o “quiote” y algunas fibras del *Agave* son utilizados como nido de aves. El bagazo del *Agave* tequilana es utilizado como material de relleno en muebles, en la elaboración de ladrillo de lama, como abono, entre otros.

En cuanto a la elaboración de bebidas, el aprovechamiento del “*Agave azul*” o “*Agave tequilero*” (*Agave tequilana* Weber), es el más importante en el estado. Sin embargo, hay otras especies en Jalisco, como es el *Agave americana* variedad expansa (la cual es muy escasa en el occidente del país), que son utilizadas en la elaboración de diferentes bebidas. Esta planta es cultivada en los municipios de Atemajac de Brizuela y Zacoalco de Torres para la elaboración de aguamiel y pulque. Otro tipo de agaves utilizados en la elaboración del pulque, son el *A. inaequidens* y el *A. hookeri*

1.4 Proceso de producción de tequila:

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-006-SCFI-2005, el Tequila es una bebida alcohólica regional obtenida por destilación de mostos, preparados directa y originalmente del material extraído, en las instalaciones de la fábrica de un Productor Autorizado la cual debe estar ubicada en el territorio comprendido en la Declaración (Protección a la Denominación de

Origen “Tequila”), derivados de las cabezas de Agave tequilana weber variedad azul, previa o posteriormente hidrolizadas o cocidas, y sometidos a fermentación alcohólica con levaduras, cultivadas o no, siendo susceptibles los mostos de ser enriquecidos y mezclados conjuntamente en la formulación con otros azúcares hasta en una proporción no mayor de 49% de azúcares reductores totales expresados en unidades de masa, en los términos establecidos por esta NOM y en la inteligencia que no están permitidas las mezclas en frío. El Tequila es un líquido que, de acuerdo a su clase, es incoloro o coloreado cuando es madurado o cuando es abocado sin madurarlo.

La única especie admitida para los efectos de esta NOM, es Agave tequilana weber variedad azul, cultivada dentro del territorio comprendido en la Declaración General de Protección a la Denominación de Origen “Tequila”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de octubre de 1977 y sus subsecuentes modificaciones y adiciones.

Asimismo, la NOM-006-SCFI-2005, define al Agave como la planta de la familia de las Agavaceas, de hojas largas y fibrosas, de forma lanceolada, de color azulado, cuya parte aprovechable para la elaboración de Tequila es la piña o cabeza. Publicaciones de (Sanchez, 1953) determinaron que el agave tequilana Weber variedad azul contiene principalmente agua (60.00%), inulina (24.00%), fibras (11.00%), azúcares reductores (1.50%), proteínas (0.02%) y cenizas (2.70%), sin embargo éste varía con la edad del agave y la estación del año.

En términos generales la NOM-006-SCFI-2005, BEBIDAS ALCOHÓLICAS-TEQUILA ESPECIFICACIONES; tiene como objetivo establecer las características y especificaciones que deben cumplir todos los elementos y etapas de la cadena productiva, industrial y comercial del Tequila, conforme al proceso que más adelante se señala. La certificación y la verificación en el cumplimiento de dicha norma están a cargo del Consejo Regulador del Tequila (CRT).

El proceso productivo de tequila consiste en realizar cambios físicos, químicos o bioquímicos al agave Tequilana Weber Variedad Azul, estos cambios se llevan a cabo a través de las siguientes operaciones unitarias.

- a) Jima, actividad que consiste en separar las piñas de las pencas del agave.
- b) Hidrólisis, operación que se realiza por procedimientos químicos, enzimáticos o térmicos.
- c) Extracción, en este proceso se busca la separación los azúcares de las fibras de la piña
- d) Formulación, en este punto productivo se revisa el grado Brix requerido al inicio de la fermentación.
- e) Fermentación, operación donde los azúcares reductores son transformados por acción de levaduras en alcohol etílico y dióxido de carbono.
- f) Destilación, operación donde se logra la separación de los componentes de una mezcla compleja por vaporización parcial.
- g) Maduración, es la transformación fisicoquímica del producto de destilación al contacto con la madera de roble o encino.



Imagen 1 Etapa de generación de vinazas tequileras

En el proceso de destilación, puntualmente en la primera etapa llamada destrozamiento se obtienen subproductos que se extraen del fondo, los cuales son conocidos con el nombre de vinazas.

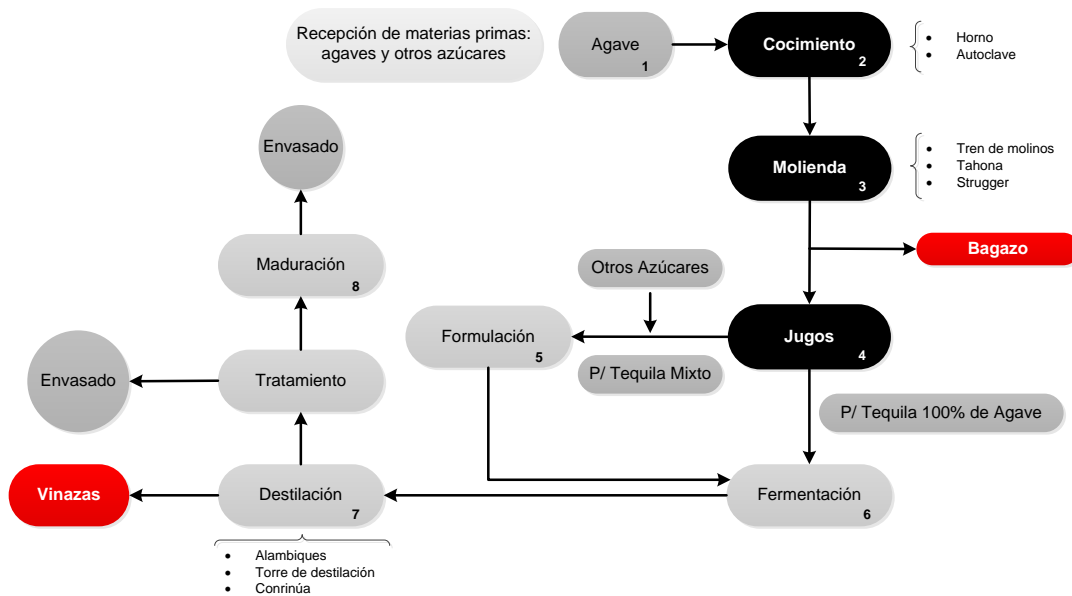


Imagen 2 Proceso tradicional fuente: (Martinez J. 2012)

1.5 Fuente de producción

En la Declaración General de Protección a la Denominación de Origen, se establece que el tequila sólo puede elaborarse en los municipios protegidos por la Denominación de Origen Tequila (DOT) (Ilustración 3). El territorio de origen comprende los 125 municipios del estado de Jalisco; los municipios de Abasolo, Ciudad Manuel Doblado, Cuerámara, Huanimaro, Pénjamo y Purísima del Rincón del Estado de Guanajuato; los municipio de Briseñas de Matamoros, Chavinda, Chilchota, Churintzio, Cotija, Encuandureo, Jacona, Jiquilpan, Maravatío, Nuevo Parangaricutiro, Numarán, Pajacuaran, Peribán, La Piedad, Régules, Los Reyes, Sahuayo, Tancítaro, Tangamandapio, Tangacícuaru, Tanhuato, Tingüindín, Tocumbo, Venustiano Carranza, Villamar, Vista Hermosa, Yurécuaru, Zamora y Zináparo,

Del estado de Michoacán; los municipios de Ahuacatlán, Amatlán de Cañas, Ixtlán del Río, Jala, Jalisco, San Pedro de Lagunillas, Santa María del Oro. Mientras que del estado de Nayarit, solo es Tepic. Los municipios de Aldama, Altamira, Antiguo de Morelos, Gómez Farías, González, Llera, Mante, Nuevo Morelos, Ocampo, Tula y Xicoténcatl del estado de Tamaulipas.

El territorio protegido tiene una superficie de casi 12 millones de hectáreas, que representan 6% del territorio nacional. Del área protegida, aproximadamente son 3.6 millones de hectáreas de superficie agrícola, de las cuales sólo se están utilizando 105 mil hectáreas, es decir, alrededor de 3%.

Por denominación de origen se entiende el nombre dado a una región geográfica de un país que permite identificar a un producto como originario de la misma, la cual determina la calidad y características exclusivas al involucrar factores naturales y humanos, como ocurre con la producción del tequila en Jalisco.

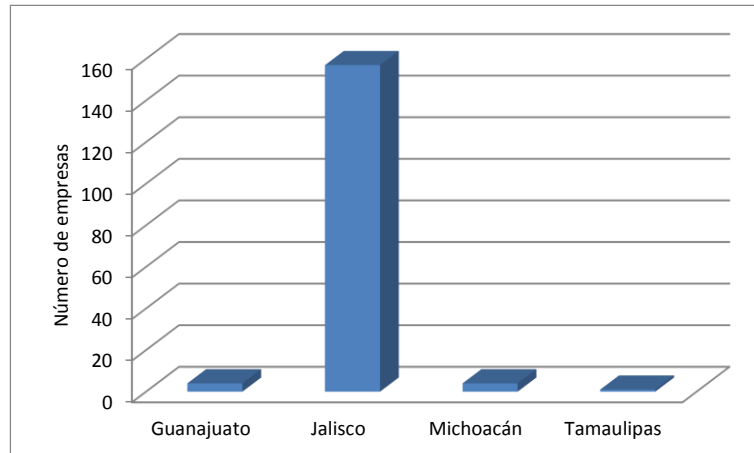


Imagen 3 Territorio de la Denominación Origen Tequila

Por otra parte, con respecto a la calidad del tequila, la Norma Oficial Mexicana NOM-006-SCFI-2005, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 2006, establece dos categorías para la clasificación del tequila de acuerdo con el porcentaje de azúcares provenientes del agave que se utilicen en su elaboración:

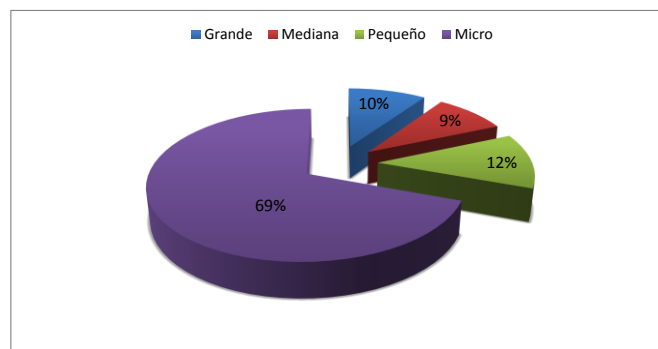
- (1) *Tequila 100% de agave.* Es el producto no susceptible de enriquecerse con azúcares distintos a los obtenidos del Agave tequilana Weber variedad Azul, cultivado en territorio de la DOT. Para que este producto sea considerado “Tequila 100%” señala la NOM, debe ser envasado por el propio productor y en territorio de la DOT
- (2) *Tequila.* Producto en que los mostos son susceptibles de ser enriquecidos y mezclados conjuntamente con otros azúcares en una proporción que no exceda el 49%, mientras debe contener por lo menos 51% de azúcares provenientes de Agave tequilana Weber variedad Azul.

De acuerdo al Consejo Regulador del Tequila en el 2012 se tuvo un registro de 166 empresas tequileras Gráfica 4 siendo Jalisco el mayor productor de tequila (157 empresas), seguido de Guanajuato (4 empresas), Michoacán (4 empresas) y Tamaulipas (1 empresa).

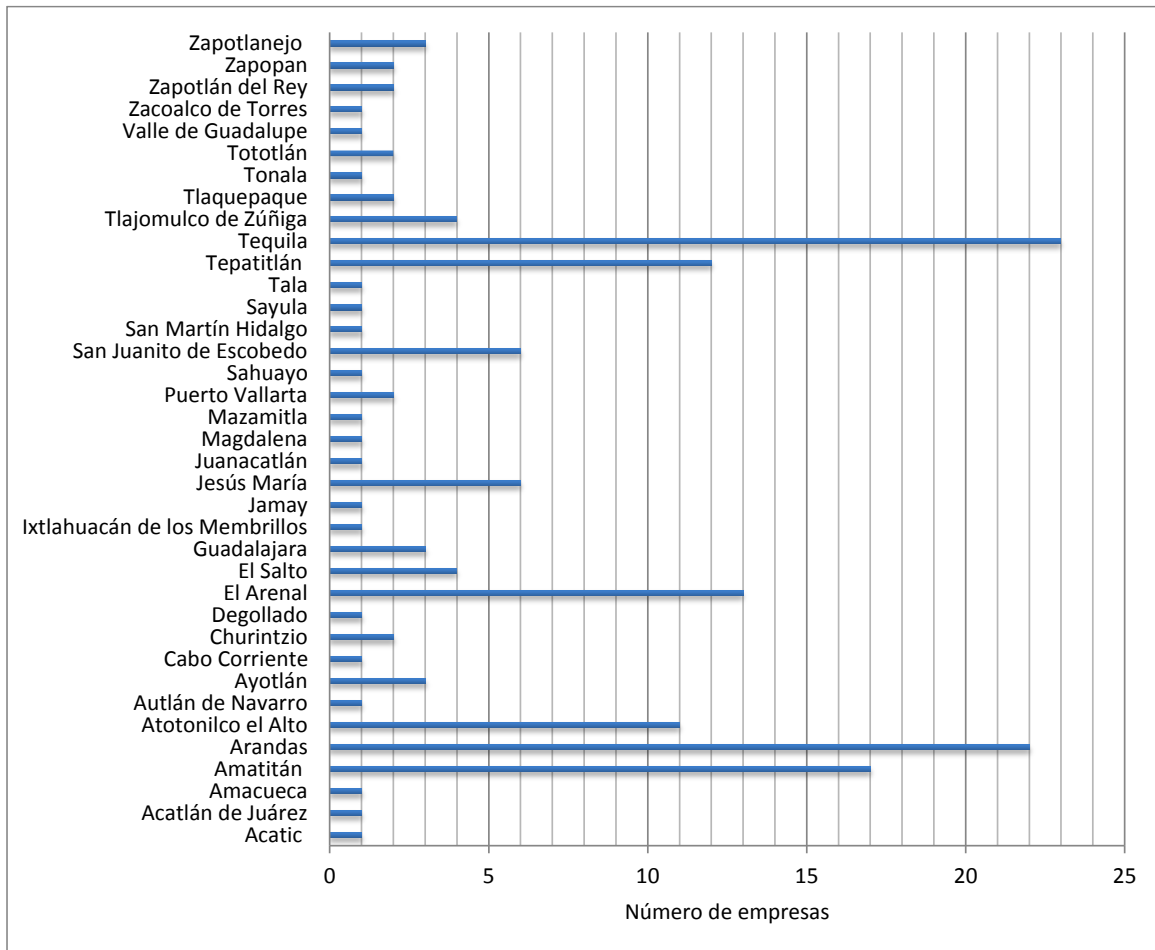


Gráfica 2 Empresas que producen tequila a nivel nacional (2012)

De dicho registro del Consejo Regulador del Tequila se consideran las micro (109 empresas), pequeñas (19 empresas), medianas (14 empresas) y grandes empresas (15) (Figura III.47). En Jalisco la mayor producción de tequila se encuentra en los municipios de Tequila (23 empresas), Arandas (22 empresas), Amatitán (17 empresas), El Arenal (13 empresas), Tepatitlán (12 empresas), Atotonilco el Alto (11 empresas), Jesús María (6 empresas) y San Juanito de Escobedo (6 empresas) Gráfica 3.



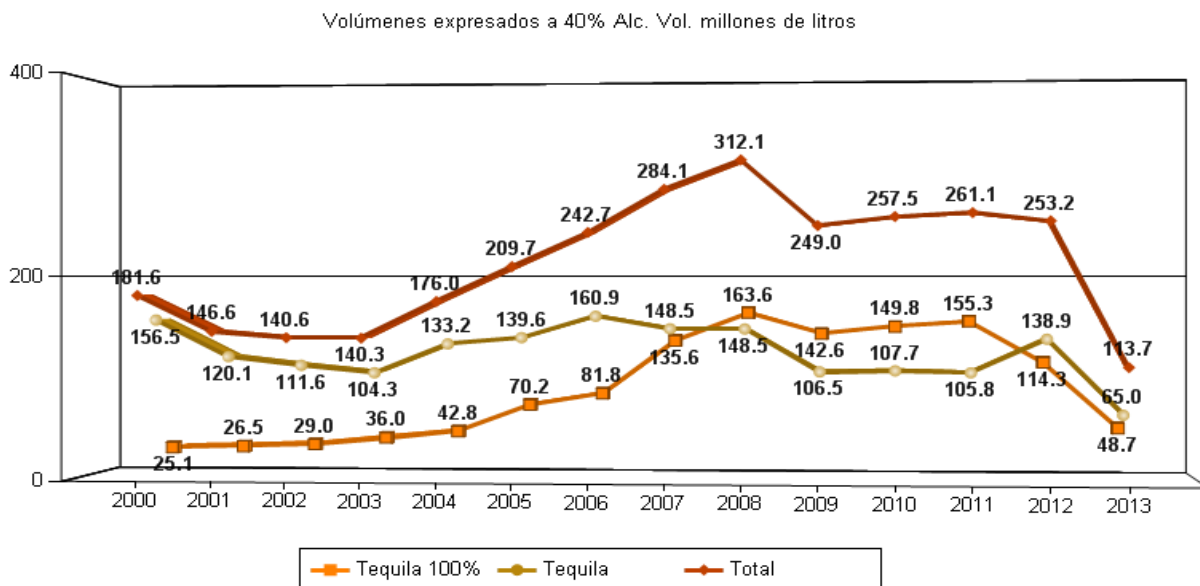
Gráfica 3 Registro del Consejo Regulador del Tequila



Gráfica 5 Proporción de empresas tequileras en Jalisco

La industria del tequila genera grandes cantidades de bagazo y vinazas, el bagazo es residuo generado durante la extracción de jugos de las cabezas posterior a su cocción. Por otro lado las vinazas son un líquido residual que es generado durante la primera destilación conocida como destrozamiento; las vinazas presentan un color café oscuro, color característico debido a contenidos fenólicos, melanoidinas polímeros de bajo y alto peso molecular que generan saborizantes, aromatizantes y pigmentos de color pardo (Herrera, Bolaños, & Lutz, 2003) formados como producto final de la reacción Maillard, reacción de pardeamiento no enzimático (Satyawali & Balakrishnan, 2008).

Se estima que por cada litro de tequila se producen, 1.4 Kg de bagazo y entre 10 a 12 litros de vinaza. Tomando en cuenta las estadísticas de producción de tequila anualizada a 2012 se puede estimar el volumen generado de vinazas por año (Del Real, 2012).



Gráfica 6 Producción de Tequila (40% Alc. Vol) fuente: Consejo Regulador del Tequila

Para el año 2012 la producción acumulada anual total fue de 253.2 millones de litros de tequila; entonces se puede estimar que se produjeron 365 Toneladas de bagazo y 2.6 millones de metros cúbicos de vinazas.

Generalmente, las vinazas son descargadas directamente a los cuerpos de agua. Debido a las condiciones fisicoquímicas que poseen en su pH, color y alta carga orgánica generan problemas ambientales serios a los cuerpos de agua naturales.

1.6 Características principales de las vinazas

Las vinazas caracterizan por presentar un pH entre 3.2 a 3.5 y una Demanda Química de Oxígeno (DQO) de hasta 60,000 mg/L las características de vinazas generadas en procesos de producción de Tequila se muestran en la tabla (Lopez-Lopez et al., 2009).

Tabla 1 Physicochemical characteristics of Tequila vinasses (Lopez & et al. 2010)

Parameter	Value
pH	3.4–4.5
Oils and fats (mg/l)	10-100
Total COD (mg/l)	60,000-100,000
Soluble COD (mg/l)	40,000-80,000
Total BOD (mg/l)	35,000-60,000
Soluble BOD (mg/l)	25,000-50,000
Total solids (mg/l)	25,000-50,000
Total suspended solids (mg/l)	2,000-8,000
Fixed suspended solids (mg/l)	10-500
Volatile suspended solids (mg/l)	1,990-7,500
Total dissolved solids (mg/l)	23,000-42,000
Settleable solids (ml/l)	10-900
Total alkalinity (mg/l)	<6.00
Total acidity (mg/l)	1,500-6,000
Fixed acidity (mg/l)	1,480-5,800
Volatile acidity (mg/l)	20-200
Ca (mg/l)	200-1,100
Mg (mg/l)	100-300
K (mg/l)	150-650
Phosphates (mg/l)	100-700
Total nitrogen (mg/l)	20-50
NH4-nitrogen (mg/l)	15-40
Organic nitrogen (mg/l)	5.0-1.0
Total reducing sugars (% w)	0.5-2.0
Direct sugars (% w)	0.4-1.0
Cu (mg/l)	<3.0
Fe (mg/l)	<45
Ni (mg/l)	<0.02
Zn (mg/l)	<1.0

1.7 Sistemas de Tratamiento de Vinazas Tequileras

Actualmente, existen diversos sistemas de tratamiento de vinazas tequileras que resultan de la combinación de algunos de los métodos, lo cual tiene como ventaja generar una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes. En la imagen 4 se presentan los sistemas empleados expuestos en (López, Davila, León, Villegas, & Gallardo, Junio 2010).

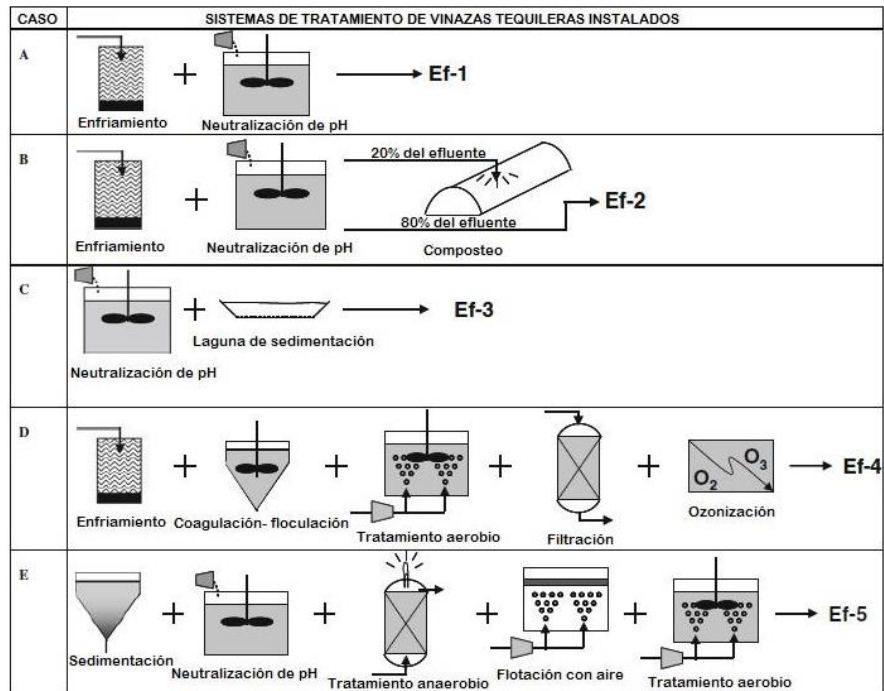


Imagen 4 Sistema de tratamiento de vinazas tequileras instalados

CAPÍTULO II

PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA

2.0 Procesos de Oxidación avanzada

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's) pueden aplicarse a la remediación y destoxificación de aguas especiales, generalmente en pequeña o mediana escala. Los métodos pueden usarse solos o combinados entre ellos o con métodos convencionales. Permiten incluso la desinfección por inactivación de bacterias y virus. (Doménech, Jardim, & Litter, 2004).

Los procesos de oxidación avanzada (POA's) se basan en la generación de iones hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), los cuales se caracterizan por ser agentes con un alto potencial de oxidación (tabla 2) (Bacardit, 2007) además de no ser selectivas, logrando tratar a una gran cantidad de contaminantes orgánicos. (García-Gómez & Drogui, 2011) (Cañizares, y otros, 2012) (Primo, 2008).

Tabla 2 Potenciales de oxidación en medio ácido de oxidantes químicos

Oxidante	E° (V)
Fluoruro (F)	3.03
Radical hidroxilo (OH·)	2.80
Oxidante	E° (V)
Oxígeno atómico (O ₂)	2.42
Ozono (O ₃)	2.07
Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)	1.77
Permanganato de potasio (KMnO ₄)	1.67
Ácido hipobromoso (HBrO)	1.59
Dioxido de cloro (ClO ₂)	1.50
Acido hipocloroso	1.49
Cloro (Cl ₂)	1.36
Bromo (Br ₂)	1.09

Los principales objetivos de la aplicación de POA´s son (Primo, 2008):

- ❖ Mineralización de los contaminantes, especialmente los orgánicos recalcitrantes, hasta su completa transformación en dióxido de carbono, agua y aniones inorgánicos, evitando la formación de subproductos o residuos (procesos de carácter destructivo)
- ❖ Degradación de contaminantes orgánicos en compuestos más biodegradables y/o menos tóxicos (pretratamiento antes de un proceso biológico).
- ❖ Eliminación de color y/u olor.
- ❖ Desinfección.

2.1. Tecnologías electroquímicas

De las tecnologías electroquímicas la electrodeposición no es aplicada a aguas residuales con alta carga orgánica, en comparación a las demás que si han tratado materia orgánica (Primo, 2008). En la siguiente imagen 5 se presenta un breve resumen de estas tecnologías (Parsons, 2004), (Barrera, 2014)

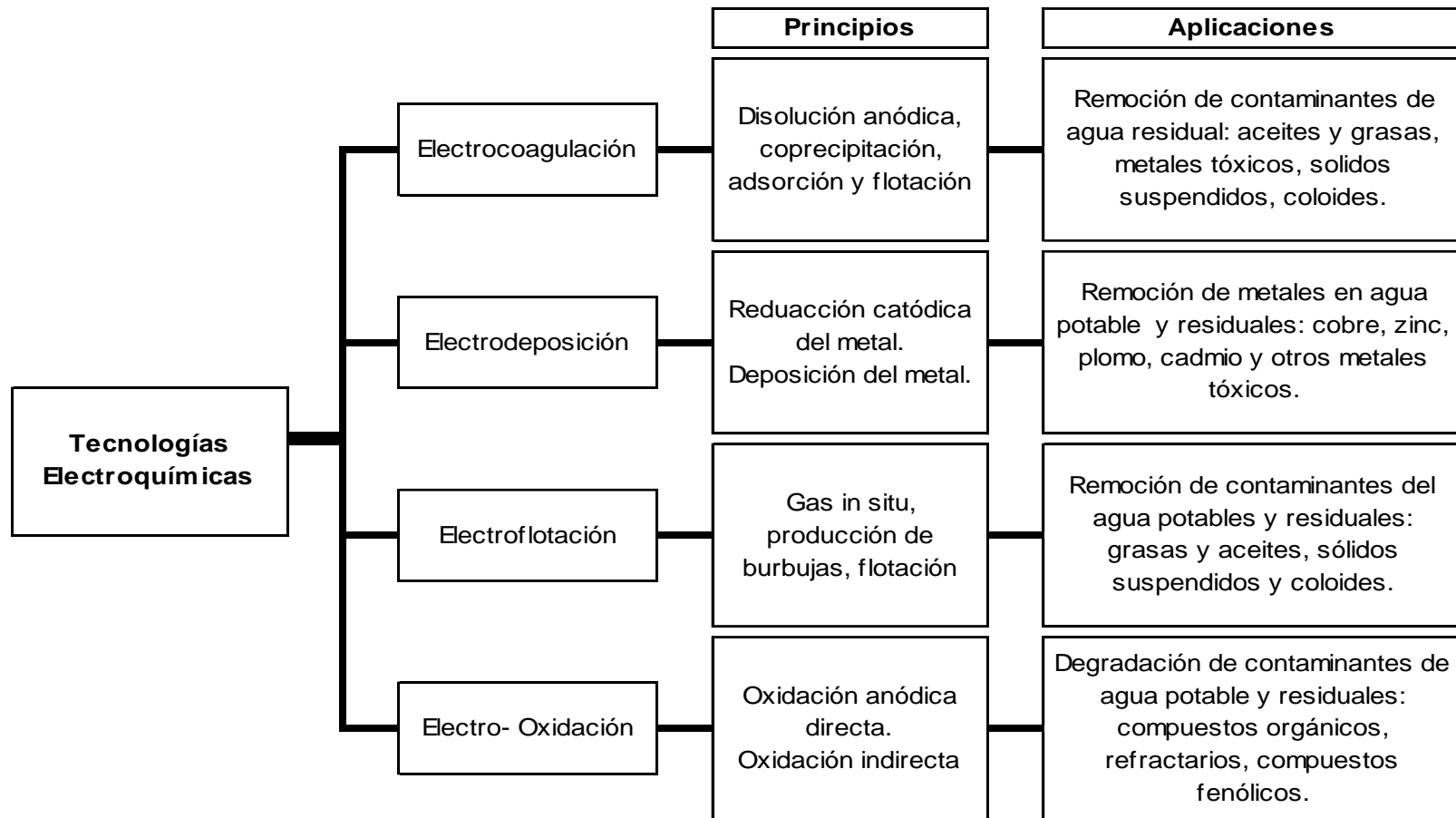


Imagen 5 Tecnologías Electroquímicas (Barrera, 2014)

2.2 Electrocoagulación

La electroquímica tiene importantes aplicaciones en la ingeniería ambiental considerando la relación que hay entre los fenómenos eléctricos y químicos además de la interrelación que hay entre electrolitos y electrodos sumergidos en solución a los cuales se les induce corriente eléctrica.

Específicamente esta técnica en el ámbito de la ingeniería ambiental se le conoce como “Electrocoagulación” donde se busca la desestabilización de contaminantes suspendidos, disueltos o emulsionados en un medio acuoso induciendo corriente eléctrica en el electrolito a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, comúnmente hierro o aluminio (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006). La desestabilización o más bien los cambios químicos que ocurren al tener un flujo de corriente a través de la solución al introducir los electrodos dependen en gran medida de la composición de la solución, la naturaleza de los electrodos y la magnitud de la fuerza electromotriz impuesta.

2.3 Fundamento teórico del proceso de electrocoagulación

1.- Los electrolitos son sustancias que careciendo de carácter metálico y en disolución, son capaces de conducir la corriente eléctrica. No todos los electrolitos presentan la misma oposición al paso de la corriente eléctrica. La conducción de corriente eléctrica va acompañada de cambios químicos que tiene lugar en los extremos del conductor introducido en la disolución. Estos cambios dependen del polo de la corriente (Borckris & A., 2003).

2.- Se define la electrólisis como la reacción química de descomposición del electrolito al paso de la corriente continua cuando introducimos dos electrodos en una disolución electrolítica o en un producto iónico fundido y aplicamos una diferencia de potencial continua entre ellos. La reacción química producida por la corriente eléctrica tiene lugar en la superficie de los electrodos, que son los conductores metálicos introducidos en la disolución (Borckris & A., 2003).

3.- La conductividad eléctrica de la disolución electrolítica y las reacciones químicas que se producen en los electrodos, son fenómenos perfectamente relacionados entre sí. Esta relación

fue deducida por Faraday de forma experimental y expresada mediante las leyes que llevan su nombre, las cuales cuantifican los procesos electrolíticos (Borckris & A., 2003).

4.- La cantidad de electrolito descompuesto en una cuba electrolítica, al paso de la corriente electrolítica es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado a través de dicha disolución (Borckris & A., 2003):

Ecuación 1

$$m = K_1 \cdot Q$$

5.- Cuando circula la misma cantidad de electricidad ($Q = I \cdot t$) por varias cubas electrolíticas conectadas en serie, las cantidades de electrolitos descompuestos son directamente proporcionales a los equivalentes químicos de dichos electrolitos (Borckris & A., 2003):

Ecuación 2

$$\frac{m_A}{E_{qA}} = \frac{m_B}{E_{qB}} = \frac{m_C}{E_{qC}} = K_2 \rightarrow m = K_2 E q$$

6.- La cantidad de electricidad que ha de circular por la cuba electrolítica para que en los electrodos se deposite o desprenda un equivalente químico de cualquier sustancia es constante e igual a 96.480 culombios, denominándose a este como valor Faraday (Borckris & A., 2003).

Ecuación 3

$$1F = 96.480 \text{ C}$$

Luego un Faraday es la cantidad de electricidad que contiene un mol de electrones.

Puesto que las sustancias que reaccionan en los electrodos son iones, el equivalente será igual a un mol de sustancia dividido por el número de cargas del ion correspondiente (Borckris & A., 2003).

Estas tres leyes se pueden recopilar bajo la siguiente expresión (Borckris & A., 2003):

Ecuación 4

$$m = \frac{1}{F} \cdot I \cdot t \cdot E_q$$

Dónde:

M= masa depositada o desprendida en cada electrodo (gramos)

I= intensidad de la corriente eléctrica aplicada (amperios)

T= tiempo de actuación de la corriente eléctrica (segundos)

Eq= equivalente electroquímico ($E_q = M/v$; M = masa molecular; v = valencia)

F = Faraday (96.480 culombios)

Así como la conductividad metálica consiste en un flujo de electrones a través del conductor metálico, la conductividad de una disolución electrolítica consiste en un transporte de carga eléctrica por los iones existentes en la disolución, que equivale al transporte de electrones desde el electrodo negativo al positivo (Borckris & A., 2003).

Por consiguiente, y como consecuencia de las leyes de Faraday, ya que son descargados en ambos electrodos cantidades equivalentes de ambos iones, el número de electrones tomados por el catión, en el electrodo negativo, ha de ser igual al de electrones depositados simultáneamente por el anión en el electrodo positivo. Ese mismo número habrá

de ser los que circulan por el conductor metálico, externo a la celda, que forma parte del circuito eléctrico.

En general:

Al electrodo donde los aniones depositan los electrones, es decir, del que salen los electrones hacia el circuito exterior se denomina ánodo.

Al electrodo donde los cationes captan los electrones, es decir, al que llegan los electrones por el circuito exterior se denomina cátodo.

Indudablemente las reacciones que tienen lugar en ambos electrodos son:

En el cátodo: $Mn^{+} + ne^{-} \rightarrow M$

En el ánodo: $xn^{-} \rightarrow ne^{-} + X$

Puesto que el proceso de captación de electrones se denomina reducción y el de donación de electrones se denomina oxidación, podemos concluir:

Cátodo es el electrodo en el que tiene lugar la reducción

Ánodo es el electrodo en el que tiene lugar la oxidación

De forma reducida, podemos concluir que cuando se ejecuta un procedimiento electroquímico, se producen simultáneamente seis funciones básicas entre los electrodos y en la solución electrolítica:

1. Oxidación: Se proporcionan electrones al ánodo para oxidar las impurezas presentes en la solución.

2. Reducción: se proporcionan electrones por el cátodo para reducir las impurezas presentes en la solución.
3. Electroforesis: Los iones con carga o cargas positivas se mueven desde el ánodo al cátodo; mientras que los iones con carga o cargas negativas se mueven desde el cátodo al ánodo.
4. Ataque electroquímico: Si el ánodo esta hecho de un metal barato, el ánodo se somete a una ionización de modo de oxidación para liberar cationes mediante la aplicación de un voltaje adecuado entre los dos electrodo, para hacer que la solución tenga la conductividad apropiada.
5. Electrolisis: El agua se descompone en hidrógeno y oxígeno.
6. Polarización: Las impurezas y las moléculas de agua se polarizan en respuesta a la aplicación del campo eléctrico formado entre los dos electrodos cuando se aplica el voltaje adecuado, de forma que los iones con carga o cargas negativas se acumulan cerca del ánodo y los iones con carga o cargas positivas se acumulan cerca del cátodo (Borckris & A., 2003).

Las reacciones electroquímicas son la causa de las transformaciones químicas que sufren las sustancias cuando se trabaja en un proceso de electrólisis, con paso de corriente eléctrica a través de los electrodos (Borckris & A., 2003).

Las transformaciones químicas generadas consisten en una ganancia o pérdida de electrones (reducción u oxidación) mediante la intervención de un electrodo, que hace de soporte de electrones y de la disolución electrolítica, que permite el transporte de sustancias que se van a electrolizar desde la disolución hasta los electrones. En la siguiente imagen se puede observar que la interface 1 se produce una reacción electroquímica de oxidación o anódica, y en la interface 2 se produce una reacción electroquímica o catódica (Borckris & A., 2003).



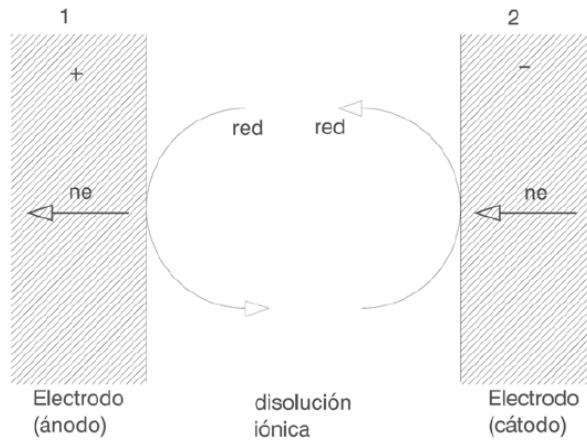


Imagen 6 Proceso de oxidación - reducción (Borckris & a, 2003)

Para la aparición de estas reacciones electroquímicas, se necesitan los siguientes elementos: célula electrolítica, electrodos, generador de energía eléctrica, conductores y aparatos de control o de medida, además de las disoluciones de electrolito y las sustancias que se van a electrolizar (Borckris & A., 2003).

Por otro lado para que ocurra el flujo de sustancias desde la disolución hacia el electrodo, o viceversa en el caso de los productos de la reacción, necesita de la existencia de un gradiente de concentración a través de una capa de difusión (Borckris & A., 2003).

El flujo de corriente a través de metales y electrolitos tiene diferencias importantes resumidas como sigue (Borckris & A., 2003):

Características del flujo de corriente a través de un metal:

1. Las propiedades químicas del metal no se alteran.
2. La corriente es transportada por electrones.
3. Si la temperatura se incrementa, entonces se incrementa la resistencia.

Características del flujo de corriente a través de una solución:

1. Ocurren cambios químicos en la solución.

2. La corriente es transportada por iones.
3. Si se incrementa la temperatura la resistencia decrece.
4. La resistencia es mayor que en los metales.

Una característica significativa del flujo de corriente a través de la solución es que la corriente es conducida por iones que se mueven hacia los electrodos inmersos en la solución electrolítica.

La conductividad eléctrica de una solución es la medición de la capacidad de conducir corriente eléctrica a través de ésta y varía según el número y tipo de iones que contiene la solución.

La medición de la conductividad se utiliza frecuentemente en análisis de agua residual y ayuda a una estimación aproximada de los sólidos disueltos de una muestra de agua.

La conductividad eléctrica de la dilución electrolítica y las reacciones químicas que se producen en los electrodos, son fenómenos relacionados entre sí. Esta relación fue deducida por Faraday de forma experimental la cual dice que la cantidad de electrolito descompuesto al paso de una corriente eléctrica es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado a través de una solución.

Los conductores electrónicos que funcionan como la fuente y sumidero de los electrones en las reacciones de transferencia de electrones entre las fases se llaman electrodos, estos según su naturaleza afectan la velocidad de las reacciones. En la superficie de metales se conoce que la velocidad es considerablemente grande ya que tales superficies catalizan la reacción sin que la misma superficie experimente variación después de la reacción (Borckris & A., 2003).

2.4 Factores que afectan a la electrocoagulación

- **Naturaleza de las placas.**

En la superficie de los electrodos cuando existe una diferencia de potencial se generan reacciones conocidas como reacciones heterogéneas, en las cuales existe dependencia entre la velocidad de reacción y la naturaleza de la superficie.

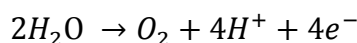
Los electrodos son la fuente y el sumidero de los electrones en las reacciones de transferencia de electrones entre las fases y es importante la selección del material.

Al utilizar electrodos de aluminio se busca un proceso de coagulación electroquímica donde es importante la disolución del metal, además de la oxidación y reducción del agua; lo cual ocurre en el contexto de las siguientes ecuaciones (Cañizares, Carmona, Lobato, Martínez, & Rodrigo, 2005).

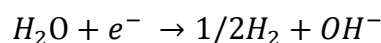
Ecuación 5



Ecuación 6

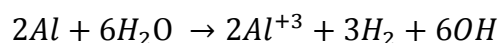


Ecuación 7



Adicional a estas reacciones es de interés el proceso químico que ocurre como una coagulación asistida electroquímicamente. Al solubilizarse el aluminio, ocurre la oxidación de éste; y en conjunto con la reducción de las moléculas de agua a hidrogeno molecular se establece la siguiente ecuación que resume el proceso (Cañizares, Carmona, Lobato, Martínez, & Rodrigo, 2005).

Ecuación 8



- **Condiciones de pH**

Para la reacción anterior es importante la influencia del pH en el proceso de disolución del metal, observándose que el valor de este parámetro se incrementa alcanzando valores alcalinos durante el proceso. Además una vez que el aluminio se solubiliza se genera un proceso importante definido como especiación de los coagulantes en donde diferentes especies se forman dependiendo del pH de la solución (Cañizares, Carmona, Lobato, Martínez, & Rodrigo, 2005).

En cada electrodo (ánodo y cátodo) existen condiciones de pH independientes alrededor de cada celda; en el ánodo debido al proceso de oxidación del agua se genera una alta concentración de protones lo que induce a un pH bajo, por otro lado en el cátodo un proceso de reducción del agua forma iones hidroxilo y por tal un pH más alto que afecta la velocidad de disolución del metal. (Cañizares, Carmona, Lobato, Martínez, & Rodrigo, 2005).

- **Polarización**

Próxima a la superficie de cada electrodo o en delgadas películas contiguas a estos en donde se generan los procesos electroquímicos, la descarga de un ion en el cátodo generara una reducción en los iones en la película que envuelve dicho electrodo. En consecuencia, el potencial de éste, tiende a acentuar su valor negativo, empezando la polarización catódica. Si aumenta el valor de la densidad de corriente, la concentración de iones en la película que envuelve al cátodo tenderá a disminuir, mediante la agitación mecánica se reduce la polarización de la concentración (MANTELL, 1980).

Si aumenta la intensidad de corriente, de modo que la concentración de iones de metal en la superficie del cátodo prácticamente quede anulada, no podrá circular ya una corriente de intensidad máxima y depende de la concentración de la solución, la temperatura y la velocidad de agitación de la solución.

La polarización puede ser considerada como resistencia óhmica que forma parte del circuito y que hay que evitarla ya que si llega a ser suficientemente alta puede modificar y originar nuevos y nocivos procesos (MANTELL, 1980).

2.5 Ventajas y desventajas de la Electrocoagulación

La electrocoagulación ofrece en principio una serie de ventajas que se mencionan a continuación (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006):

1. Pueden ser tratadas las cargas coloidales más pequeñas, debido a que pueden moverse más fácilmente que sus homólogos más grandes dentro de un campo eléctrico, esto facilita la coagulación. Además, tal movimiento evita la necesidad de

agitación mecánica, el cual si es incontrolado puede destruir los precipitados tan pronto como son formados.

2. La cantidad de productos químicos requeridos es mucho más baja (del orden de 1/10). Por ejemplo, en el proceso convencional de neutralización por cal, se incrementa la dureza del agua. Con el proceso de electrocoagulación la dosis de cal es inferior, mejorando el proceso y la calidad de las aguas.
3. Se producen pequeñas cantidades de lodo en su acción de coagulación, debido al alto contenido de sólidos secos. Además, el lodo producido por tratamiento electroquímico es más hidrófobo, lo que origina residuos más compactos, igualmente se reducen los tiempos de decantación.
4. No se requiere mezcla de productos químicos.
5. La durabilidad de los electrodos reduce los bajos tiempos improductivos para el mantenimiento o sustitución.
6. La reducción de materia orgánica, incluyendo materia orgánica no biodegradable, es más efectiva, esto facilita el tratamiento biológico siguiente.
7. La dosificación de coagulante, así como el sobre potencial necesario, puede ser fácilmente calculado y controlado.
8. Estos procesos son apropiados para pequeñas plantas de tratamiento.
9. Se observa normalmente un aumento de pH, el cual ayuda en la eliminación de iones de metales pesados por su precipitación como hidróxidos o por la adsorción en otros flóculos o precipitados.
10. A menudo, no es necesario el control de Ph, a menos que éste parámetro adquiera valores externos.
11. Con el sistema de electrocoagulación puede conseguirse una alta reducción de sólidos, altas eficiencias (aproximadamente 90%) en sistemas bien diseñados.
12. Se requieren tiempos de retención cortos. Por ejemplo, son suficientes 8 minutos para el tratamiento de la decoloración de aguas residuales procedentes de la industria textil.
13. Los costos de operación son mucho más bajos comparados con tecnologías convencionales equivalentes, que garanticen los mismos resultados.

Los problemas más importantes a considerar en los procesos de electrocoagulación, son los siguientes (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006):

1. La producción de H₂ en el cátodo, puede impedir la decantación apropiada de la materia coagulada.
2. La concentración de iones aluminio o hierro en el efluente muy probablemente se incrementará. Un cuidadoso control de pH sería necesario, si el contenido de Al o Fe se saliese de los límites admisibles.
3. Estos procesos con corriente continua, pueden agruparse entre los electrodos, dificultando su producción adicional. Las alternativas, como solución a este problema, incluyen el uso de un ánodo móvil, provocando una alta turbulencia, introducción de gas, o agitación mecánica. Los electrodos de lecho fluidizado han sido utilizados para limpiar las superficies de los electrodos con una corriente erosiva moderada.
4. Estos procesos con corriente continua están frecuentemente acompañados de la pasivación del ánodo y la deposición de lodo sobre los electrodos. Para prevenir esto, se puede usar corriente alterna con impulsos inversos controlados, o la activación del ánodo por la adición de iones como cloruro con el fin de bajar considerablemente la polarización anódica requerida y facilitar continuamente la renovación de la superficie de los electrodos del metal oxidado en el impulso siguiente. Por otro lado, la generación de hidrógeno provoca el debilitamiento de adherencia entre el lodo y el electrodo, permitiendo su desprendimiento y separación. Este procedimiento tiene la ventaja adicional de duplicar el tiempo requerido para la sustitución del electrodo.
5. Los costos de inversión son relativamente altos, aunque los costos de operación tienden ser más bajos que otras técnicas.

2.6 Efluentes tratados con electrocoagulación

Es en la remoción del color y turbiedad donde la electrocoagulación juega un papel muy importante ya que el propio proceso REDOX ayuda a la eliminación de contaminantes

refractarios, por ejemplo en resultados obtenidos en la aplicación de la electrocoagulación a contaminantes persistentes en aguas residuales industriales en donde los resultados de la aplicación de la electrocoagulación llegan a porcentajes de remoción de hasta un 99% de la DQO, 99% en color y 97% en turbiedad en condiciones de un pH 7 con tiempos de tratamiento hasta de 150 minutos, la remoción de partículas coloidales y suspendidas llevan a afirmar que los métodos electroquímicos resultan ser aplicables y eficientes en la degradación de compuestos refractarios (Linares, y otros, 2011).

En el tratamiento de vinazas generadas en destilerías de etanol que reportan una DQO de 130,000 mg/L tratadas por la técnica de electrocoagulación se obtuvieron resultados óptimos donde el pH y el tipo de electrolito son determinantes al trabajar con electrodos de acero galvanizado (Dávila, Machuca, & Marriaga, 2009).

Al aplicar la técnica de electrocoagulación en aguas residuales se registran variables de salida como sulfatos, nitratos, DQO y eliminación de microorganismos, reportes indican que obtienen resultados en el orden de 52 y 60% para nitratos, , con lo que respecta a microorganismos como E.coli con una eliminación del 83% y para coliformes fecales en un 82%. Resultados donde la influencia de parámetros físicos pH, y conductividad son significativos (Hernandez, 2011).

Para la aplicación de la electrocoagulación se establece que el pH óptimo se encuentra en el rango de 4-9 ya que se reporta que los flóculos formados usando electrodos de aluminio o hierro son más estables y la conductividad que mide el contenido de iones puede ser disminuida según el orden y número de placas, respecto a la temperatura durante el proceso ésta se incrementa, mejorando la remoción de contaminantes, se reporta que los flóculos formados presentaban una textura esponjosa según incrementaba la temperatura y esta condición afecta el tiempo de decantación (Hernandez, 2011).

En la remoción de colorantes por medio de electrocoagulación, específicamente del colorante azoico amaranto, en donde la contaminación por colorantes causa efectos como disminución de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua, forma compuestos recalcitrantes y tóxicos para las células, obstaculización de la luz así como su deterioro estético (Arango A. G., 2009). Las variables controladas fueron pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento, y como variables de salida o de respuesta DQO y Color; Se obtienen resultados de remoción

para la DQO del orden de 98.3% y de color 99.3% con densidad de corriente a 40.86 A/cm², pH 4, tiempo de 15 minutos de tratamiento (Arango A. G., 2009).

Otros reportes donde se estudia la importancia de la conductividad aplicando la electrocoagulación a aguas residuales de la industria láctea controlando la conductividad, densidad de corriente y tiempo, y como variable de respuesta la DQO.

Se recopilaron experiencias que en resumen establecen que en el rango de 3.5 S-cm⁻¹ de conductividad el sistema deja de ser efectivo para la remoción de DQO así para una conductividad de 1.5 S-cm⁻¹ se obtienen remociones próximas al 90% y para una conductividad de 3.5 S-cm⁻¹ baja la eficiencia de remoción a 67% aproximadamente (Arango A. , 2009).

CAPÍTULO III

MÉTODOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

3.1 Metodología

En base al objetivo general para evaluar la remoción de los contaminantes refractarios presentes en las vinazas tratadas anaeróbicamente a través de los objetivos particulares, se establece en la gráfica 11 un esquema general que resume el proceso a seguir para lograr dichos objetivos.

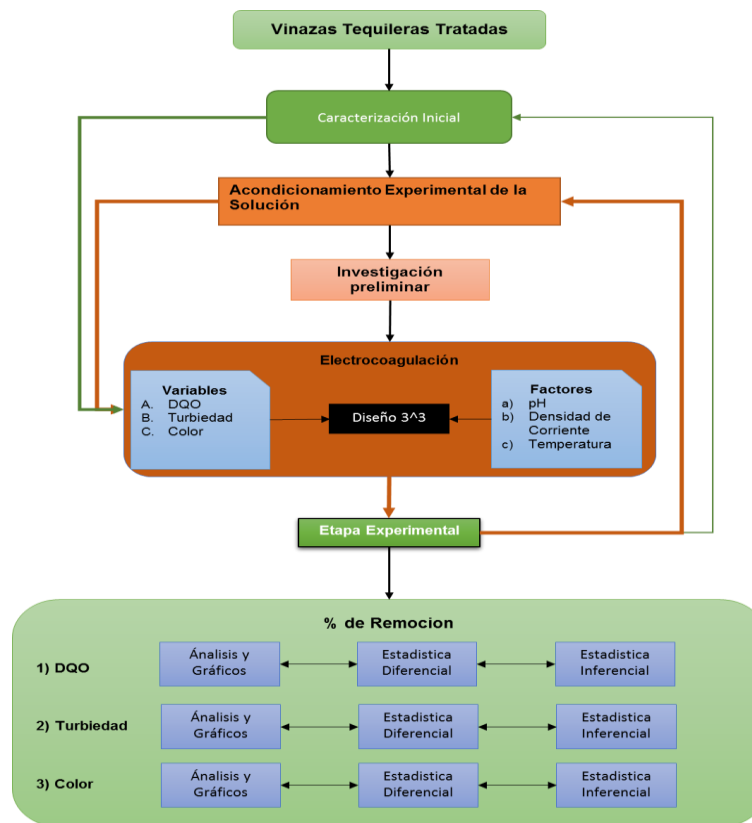


Imagen 7 Esquema General de laboratorio

3.2 Origen de la muestra

La muestra de vinazas tratadas de una empresa reconocida en la producción de tequila, fue colectada al salir del tren de tratamiento anaerobio. La muestra se almacenó en cuarto frío a 4 grados C° hasta ejecutar los experimentos.

3.3 Metodología analítica

Las técnicas aplicadas para los diferentes parámetros están reportadas en normas mexicanas en la tabla 3 se indica el parámetro y norma de referencia.

Tabla 3 Análisis de agua metodología analítica

Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-030-SCFI-2001
Determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-045-SCFI-2001
Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-038-SCFI-2001
Determinación del pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-034-SCFI-2001
Determinación de la conductividad electrolítica.	NMX-AA-093-SCFI-2000

3.4 Descripción instrumental

3.4.1 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno

La determinación de DQO se realizó utilizando un digestor marca Hach modelo DRB 150 y las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro marca Hach modelo DR 2800. En la figura 2 se muestra una fotografía de los equipos.

3.4.2 Determinación de Turbiedad

La determinación de Turbiedad se realizó utilizando un turbidímetro marca Hach modelo 2100 AN en la figura 3 se muestra una fotografía del equipo.

3.4.3 Determinación de pH, Solidos Disueltos Totales y Conductividad

Para determinación de pH, Solidos Disueltos Totales y conductividad se utilizó un equipo multiparámetro marca OAKTON serie 350 Modelo 35631-60, en la figura 4 se muestra una fotografía del equipo.

3.4.4 Determinación de Color

Para la determinación de color se utilizó un espectrofotómetro marca Hach modelo DR 2800 en la figura 5 se muestra una fotografía del equipo.

3.4.5 Escaneo de longitud de onda

Para el escaneo de longitud onda se usó un espectrofotómetro de laboratorio marca Hach modelo DR 5000 como el mostrado en la figura 5.

El propósito del escaneo de longitud de onda es el de observar en periodos de tiempo fijos la formación o eliminación de especies químicas en la solución de estudio.

3.4.6 Reactor de electrocoagulación

El reactor está fabricado en vidrio con una capacidad total de 1.2 litros cuenta con una tapa que sostiene dos placas de aluminio cada una con dimensiones de 5.3 cm de ancho por 14.5 cm de largo, una vez colocadas en reactor ofrecen una sección de 12.70 cm de largo y 5.3 cm de ancho es decir un área de contacto con la muestra de 67.31 cm² y entre ellas una separación de 0.5 cm. La tapa cuenta con orificios para la toma de muestra y la introducción del termómetro en las imágenes 8 y 9 se muestran los detalles de su estructura.

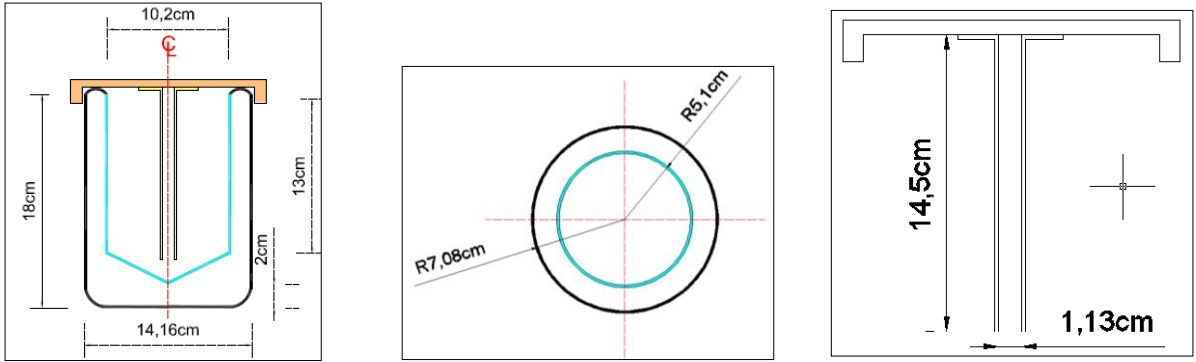


Imagen 8 Vista Lateral. Superior y detalle de placas del Reactor de Electrocoagulación

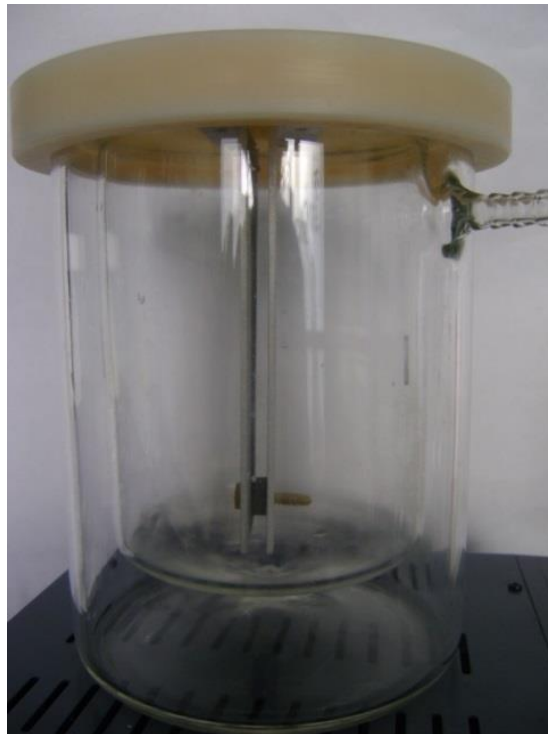


Imagen 9 Reactor para Electrocoagulación

3.4.7 Fuente de poder

La aplicación de voltaje se realizó con la ayuda de una fuente de poder marca Extech modelo 382153 que se muestra en la imagen 10, con las siguientes características:

- 1.-Tensión de salida ajustable 0-30 Volts
- 2.-Corriente de salida ajustable 0-3 amperes
- 3.-Salida de voltaje constante de 5 Volts y 12 Volts
- 4.-Indicador LED para límite de corriente
- 5.-Protección contra sobrecarga y cortocircuito
- 6.-Terminales de poste de variable



Imagen 10 Fuente de poder

3.4.8 Baño recirculador.

Para mantener la temperatura constante del sistema, se utilizó un Baño recirculador marca LAUDA modelo ALPHA RA8, se muestra una fotografía con las siguientes características:

Intervalo de temperatura de -25 ° C a 100 ° C

Control de temperatura $\pm 0,05$ ° C

Potencia del calentador 1,5 kW

Capacidad de refrigeración a 20 ° C 0.225 kW

Presión máxima de la bomba 0,2 bar

Flujo máximo 15 L / min

Volumen máximo. 7.5 L

Baño de apertura (ancho x profundidad x alto) 165 x 190 x 160 mm

Dimensiones totales (ancho x profundidad x alto) 235 x 500 x 605 mm

3.5 Metodología experimental

- 1.- El procedimiento realizado durante la experimentación se describe a continuación:
- 2.- Datos y experiencias se anotan en la bitácora
- 3.- Para cada muestra se afora un 1 litro de muestra y se lleva a un pH predeterminado para cada experimento.
- 4.- Las placas de aluminio se lijan y sumergen en solución ácido nítrico para activarlas. Se enciende la fuente de poder y se mantiene constante la densidad de corriente verificando el amperaje y el voltaje.
- 5.- Durante el tiempo de tratamiento se toman muestras a cada 20 minutos para conocer en estos lapsos de tiempo el comportamiento de las variables de salida DQO, color y turbiedad.
- 6.- En la medición de pH si fuese necesario se corregirá el mismo para mantenerlo constante durante el experimento y en el mismo momento se hará simultáneamente la medición de la conductividad.
- 7.- Al término del tiempo de residencia que es de 120 minutos a cada muestra se le mide DQO, Color, Turbidez; y se realiza un Escaneo de longitud de onda.

3.6 Investigación preliminar

Con el fin de realizar una planeación experimental objetiva se realiza una investigación preliminar buscando que los resultados conduzcan a entender y delimitar las condiciones experimentales del sistema.

Para realizar esta etapa la muestra es caracterizada y es expuesta a diferentes condiciones experimentales y como resultado se obtendrán los valores analíticos descritos, resumidos en una tabla donde se ordenarán los resultados experimentales con el objetivo de generar un análisis de resultados que ayudará a sustentar la planeación experimental de manera objetiva.

3.7 Matriz Experimental

El diseño corresponde a todas las posibles maneras en las que se pueden combinar los factores con sus respectivos niveles generando puntos de diseño (Gutierrez, 2012, pág. 211).

La matriz factorial con los valores para cada factor inferior central y superior (-1,0,1) tabla 4.

Tabla 4 Diseño factorial 3^k

Nivel \ Factor	Ph	Temperatura (°C)	Densidad de corriente ($A - m^{-2}$)
1	-1	-1	-1
2	0	0	0
3	1	1	1

Considerando aleatoriedad para cada factor se realiza el diseño 3^3 para los 27 experimentos, esto se observa en la tabla 5.

Tabla 5 Matriz de diseño factorial

Experimento	pH	Temperatura	Densidad corriente
		°C	A/m ²
1	-1	1	-1
2	1	1	0
3	1	0	1
4	-1	0	-1
5	-1	-1	-1
6	-1	1	1
7	1	1	1
8	1	-1	-1
9	1	-1	1
10	0	0	1
11	-1	-1	0
12	0	0	-1
13	0	0	0
14	1	0	0
15	0	1	1
16	-1	0	1
17	-1	1	0
18	0	-1	0
19	0	-1	-1
20	0	-1	1
21	1	-1	0
22	1	1	-1
23	-1	0	0
24	-1	-1	1
25	1	0	-1
26	0	1	-1
27	0	1	0

Los valores -1, 0 y 1 corresponden a los valores límite experimental inferior, central y superior para cada factor.

3.8 Análisis Anova

Cuando se quiere investigar la influencia de tres factores (A, B y C) sobre una o más variables de respuesta, el número de niveles de prueba en cada uno de los factores es a, b y c, respectivamente, con esto puede construirse el arreglo factorial $a \times b \times c$, que consiste de $a \times b \times c$ tratamientos o puntos experimentales. Entre arreglos de este tipo que se utilizan con frecuencia en aplicaciones diversas, se encuentran: el factorial 2^3 , el factorial 3^3 y factoriales mixtos.

En un diseño factorial $a \times b \times c$ se supone que el comportamiento de la respuesta Y puede describirse mediante el modelo de efectos dado por.

El estudio factorial de tres factores (A, B, C) permite investigar los efectos A, B, C, AB, AC, BC y ABC, donde el nivel de desglose o detalle con el que pueden estudiarse depende del número de niveles utilizado en cada factor.

La hipótesis de interés lleva al efecto cuyo valor p-value sea menor que el valor especificado para alfa y de esta manera se declara estadísticamente significativo o se dice que está activo.

Las interacciones entre factores se interpretan basándose en las gráficas de interacción de factores en donde interpreta tanto la pendiente como la curvatura de las mismas.

El diagnóstico de los residuos es importante para los análisis factorial comprobarse los supuestos de normalidad, varianzas iguales, independencia y ausencia de valores atípicos a través de gráficos predichos-residuos y residuos-porcentaje o estadísticos de prueba.

Con la idea de llegar al mejor ANOVA los efectos menos significantes o importantes se pueden eliminar. Se llama mejor ANOVA debido a que detecta de manera contundente los efectos significativos en otras palabras es el modelo más simple posible para explicar el comportamiento del rendimiento durante las pruebas.

ANOVA o análisis de varianza es la técnica en el análisis de datos experimentales, ésta técnica separa la variación total en las partes con las que contribuyen cada fuente de variación en el experimento y se separan la variabilidad debida a los tratamientos y la debida al error,

cuando la primera predomina claramente sobre la segunda se concluye que los tratamientos tienen efecto.

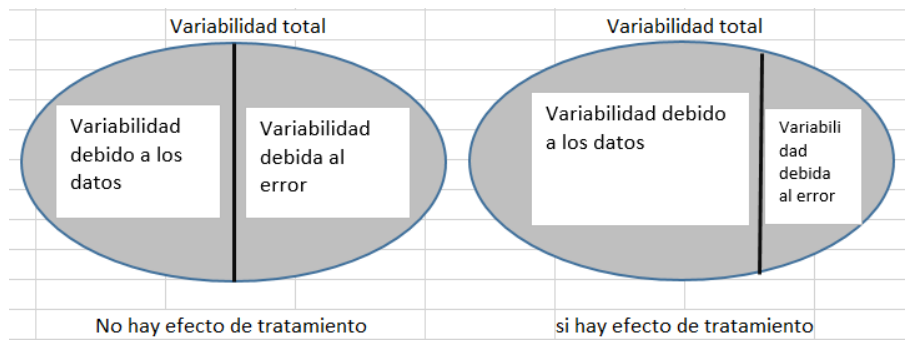


Imagen 11 Esquema de significancia ANOVA (Gutiérrez, 2012)

En base a lo anterior los resultados reflejados en las variables DQO, Color y Turbiedad se analizan en base a los efectos y sus interacciones a través de diseño de experimentos y observar los efectos predominantes que presenten significancia estadística.

3.9 Desgaste de los electrodos

En cada experimento después de activar los electrodos y al final de cada experimento después de lavar los mismos se pesarán con una balanza analítica para conocer el desgaste aproximado.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados:

4.1.1 Resultados de la Investigación preliminar

4.1.1.1 Obtención de respuestas preliminares

En la tabla 4 se muestran los factores con valores experimentales con las magnitudes específicas de pH, densidad de corriente, temperatura (las cuales se mantienen constantes de inicio a fin) y tiempo de residencia, las variables de salida son Demanda química de oxígeno (DQO) y Color, los resultados de cada experimento se muestran en la tabla 6 y tabla 7.

Tabla 6 Factores experimentales.

Experimento	pH inicial	Tiempo (min)	Densidad de corriente($A - m^{-2}$)	Temperatura(°C)
1	3	40	74.28	25
2	12	40	74.28	25
3	7	40	74.28	25
4	3	40	148.57	25
5	12	40	148.57	25
6	7	40	148.57	25
7	5	40	222.85	25
8	7	40	222.85	25
9	12	40	222.85	25
10	3	40	74.28	40
11	3	40	148.57	40

Tabla 7 Porcentaje de remoción de las variables de salida.

Experimento	pH final	DQO % de remoción	Color % de remoción
1	5	72%	0.00
2	10.65	35%	0.00
3	7	14%	0.00
4	4	22%	0.00
5	11.62	27%	0.00
6	7.73	13%	0.00
7	5.5	68%	9.00%
8	7.41	22%	0.00
9	11.8	30%	1.00%
10	4.87	38%	22.0%
11	5.66	49%	62.0%

Para la variable de salida DQO se obtienen remociones donde la máxima se encuentra en el experimento 1. Para la variable de salida Color se obtiene una remoción del 62% en el experimento 11 con una solución de pH ácido. Los datos son presentados gráficamente en la figura 16.

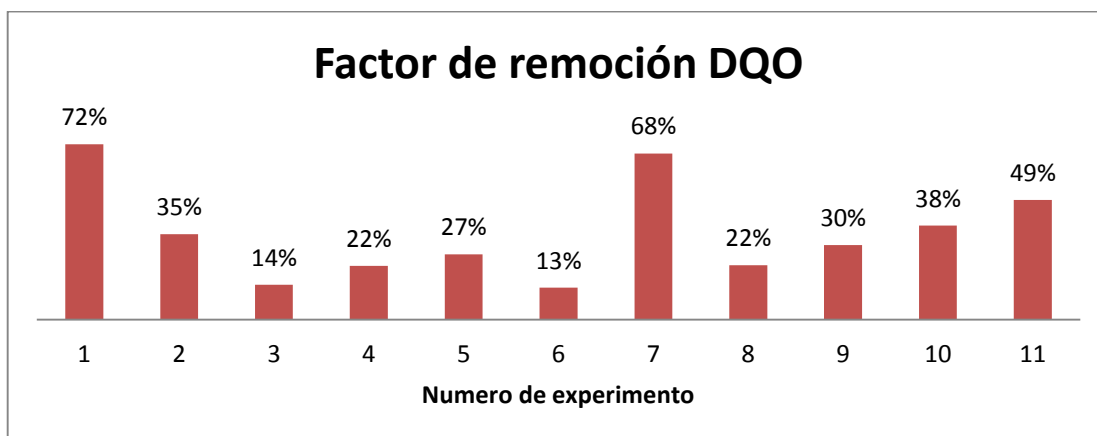
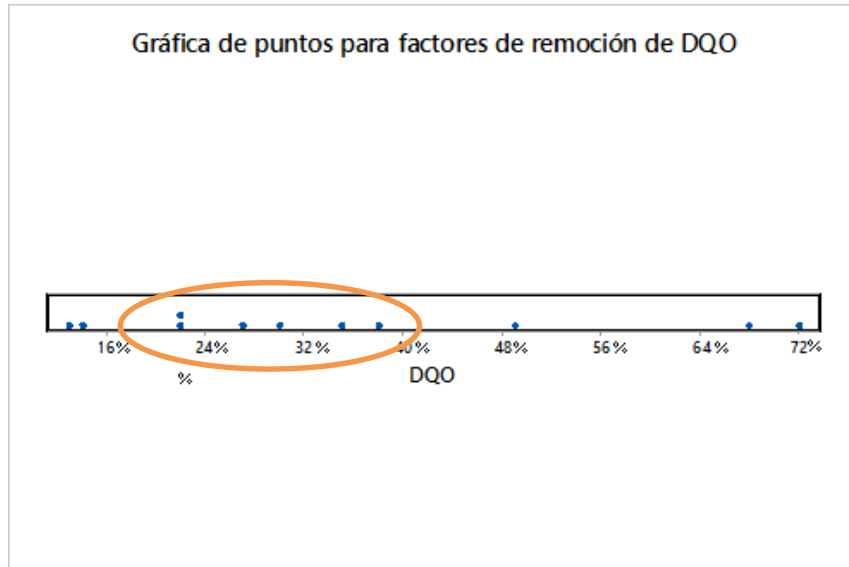


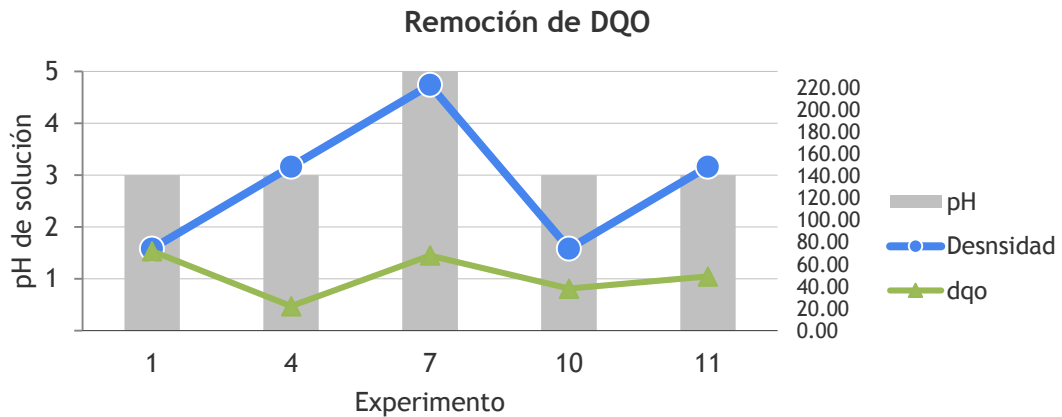
Gráfico 7 Factor de Remoción de DQO por número de experimento

En el diagrama de barras de la gráfico 7 se representan los porcentajes de remoción de DQO en donde se observa que los experimentos 1 y 7 en donde la solución es acida se obtienen remociones de hasta un 72% y 68% respectivamente.



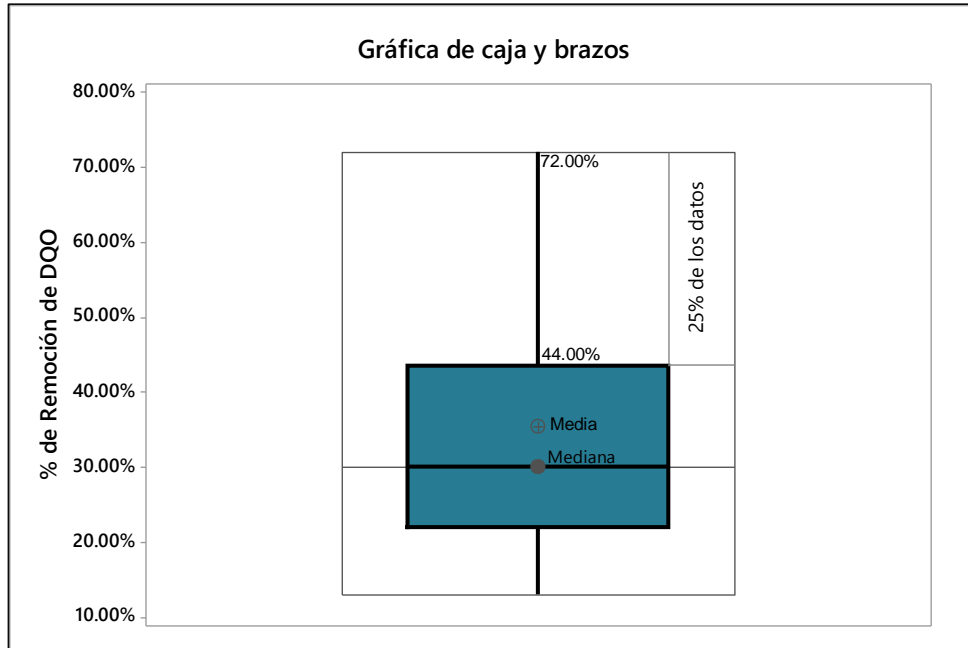
Gráfica 8 Gráfica de puntos para factores de remoción de DQO

En la gráfica 8 se observa que los valores de la remoción obtenidos se concentran entre el 16% y 40% de remoción, las mejores remociones se obtienen en donde la solución tiene un pH de 3 a 5 y presenta una remoción del 70%.



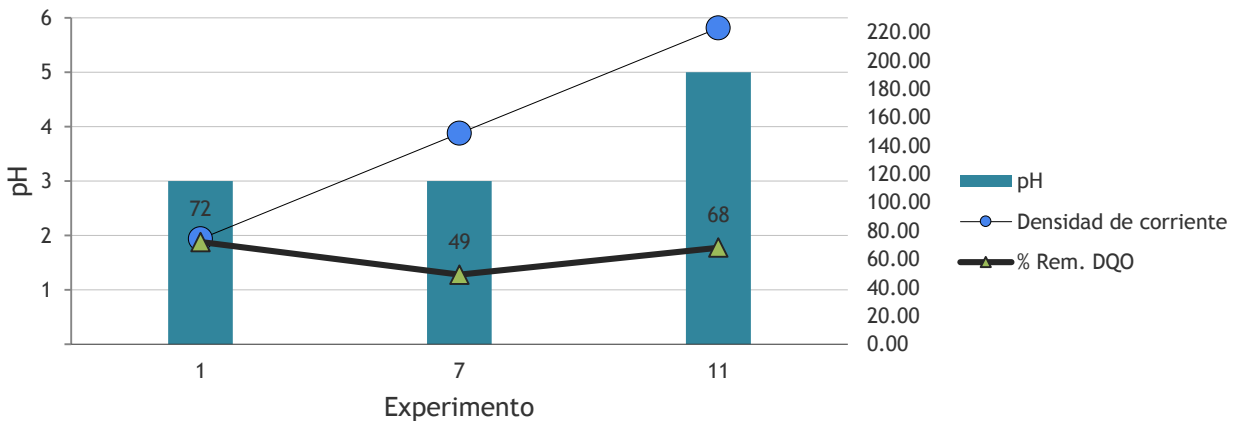
Gráfica 9 Efecto de la densidad de corriente.

En la gráfica 9 se observa que los experimentos 1 y 4 que son similares en pH y Temperatura, no así en densidad de corriente la cual al aumentar se observa que la remoción de DQO disminuye, esto sucede en los experimentos 10 y 11 también.



Gráfica 10 Grafico de caja y brazos para la remoción de DQO

Si los datos se grafican en la gráfica 10 se observa que un 25% de los datos presentan remociones de DQO que van desde el 50% al 70% y esto que sucede en los experimentos con soluciones acidas.



Gráfica 11 Efecto de Densidad de Corriente y el pH

En la gráfica 11 se grafican los experimentos con soluciones acidas y se observa el efecto de la densidad de corriente, al aumentar ésta la remoción de DQO disminuye considerablemente. Por otra parte al pasar de un pH 3 a uno de 5 el porcentaje de remoción aumenta. El efecto tanto de pH y la densidad de corriente sobre el porcentaje de remoción aparenta a ser significativo.

Considerando que la solución contiene materiales refractarios difíciles de degradar se puede afirmar que se obtiene una importante remoción de DQO, sin embargo con lo que respecta al color se obtuvieron remociones bajas.

4.1.1.2 Significancia del tiempo en la remoción de color

Para poder analizar la importancia del tiempo de tratamiento en la remoción de color y DQO se establecen mantener los factores controlados con valores mostrados en la tabla 8 en donde el pH es el factor que no será controlado. El pH inicial de la solución es 3.

Tabla 8 Experimento exploratorio de significancia del tiempo para la remoción de color y DQO

Temperatura °C	Densidad de corriente ($A - m^{-2}$)	Tiempo (min)
40	148.57	180

Durante la ejecución del experimento con el fin de monitorear a las variables de salida se tomaron muestras cada 45 minutos.

Basados en los datos de los experimentos anteriores se miden los cambios en la conductividad en cada muestra.

Los valores de DQO en cada lapso de toma de muestra se reportan en la tabla 9.

Tabla 9 Valores de salida del experimento exploratorio.

Tiempo (min)	pH	Conductividad (μS)	Color(PtCo)	DQO (mg/L)
0	3	3.59	736	315
45	6.16	5.66	154	192
90	6.4	5.32	114	126
135	7.55	5.17	203	127
180	9.42	3.14	168	114

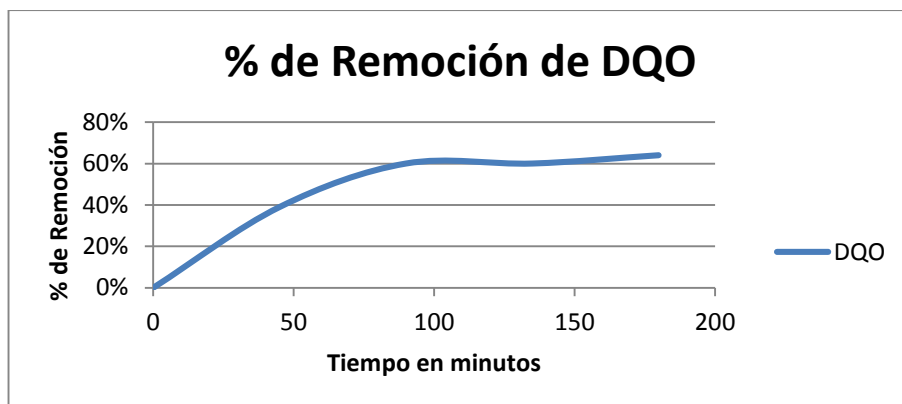
Reportando los valores de DQO y color como porcentaje de remoción se tienen los valores reportados en la tabla 10.

Tabla 10 % de remoción de Color y DQO

Tiempo (min)	pH	Conductividad	Color	DQO
0	3	5.66	0%	0%
45	6.16	5.66	79%	39%
90	6.4	5.32	85%	60%
135	7.55	5.17	72%	60%
180	9.42	3.14	77%	64%

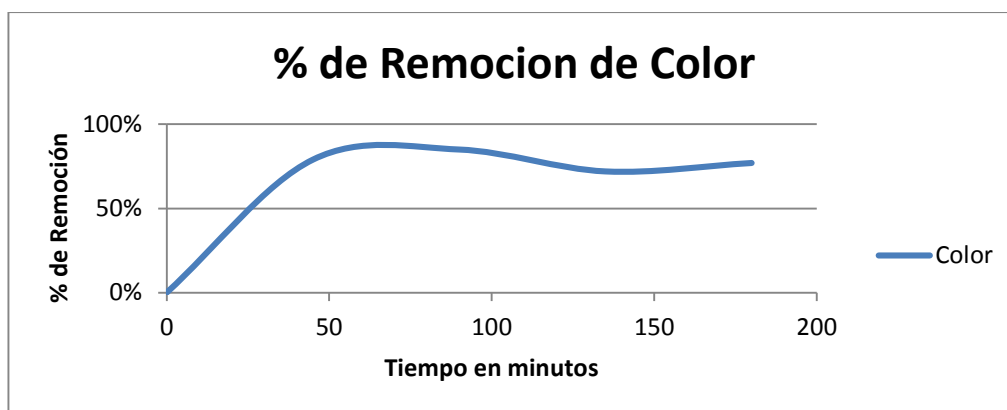
En la tabla 10 se observa que el pH inicial va aumentando conforme avanza el tiempo, por otra parte la conductividad va disminuyendo y esto va afectando el porcentaje de remoción tanto de Color como de DQO.

La remoción de DQO con respecto al tiempo se presenta en la gráfica 12 en donde tiende a ser continua, sin embargo tiene pocos cambios entre el minuto 90 y 180.



Gráfica 12 Remoción de DQO con respecto al tiempo

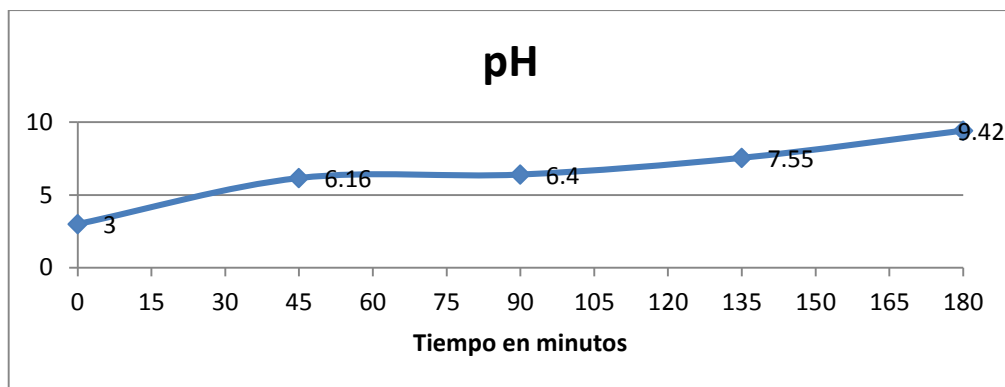
En la gráfica 13 se observan los cambios de la remoción de color con respecto al tiempo. A los 90 minutos la remoción llega hasta un 85%, posteriormente se tienen un decremento en el porcentaje de remoción entre los minutos 90 y 180 en donde el pH también presenta cambios.



Gráfica 13 Remoción del color con respecto al tiempo

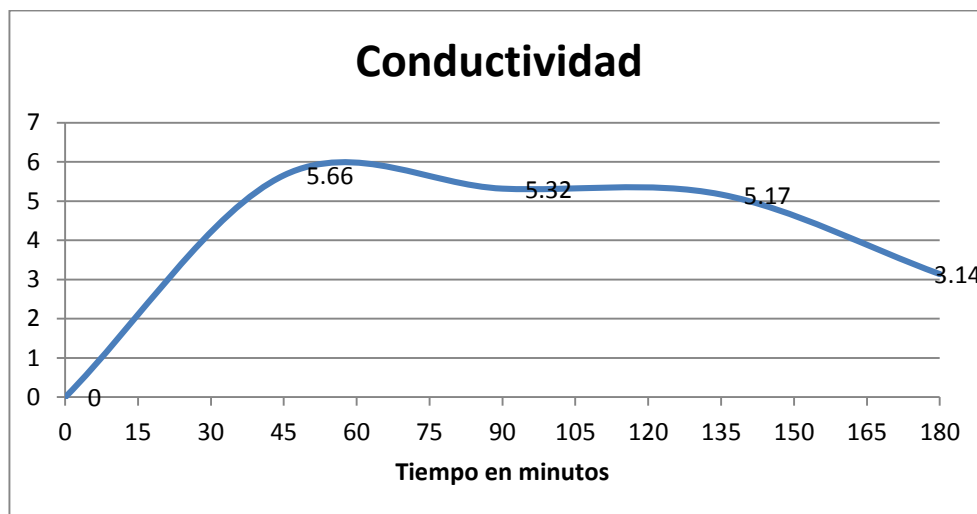
En la gráfica 13 se aprecia un pico máximo a los 90 minutos sin embargo al término de este experimento se observa una remoción del orden del 85% máxima y una final de 77%.

En la Gráfica 14 se observa que los cambios del pH con respecto al tiempo este inicia con un valor de 3 y durante el tiempo de tratamiento va aumentando aparentemente de forma constante llegando a un valor final de 9.42.



Gráfica 14 Comportamiento del pH de la solución respecto al tiempo

En la gráfica 24 son presentadas las mediciones de la conductividad con respecto al tiempo.



Gráfica 15 Comportamiento de la conductividad del sistema respecto al tiempo

En la gráfica 14 se observa que conforme pasa el tiempo el pH presenta valores más alcalinos y con eso la solución presenta más resistencia al paso de la corriente eléctrica afectando a la conductividad y esto genera una menor remoción de DQO.

Es importante considerar que en soluciones acidas la conductividad se mantiene constante y que por otro lado si la solución tienen pH alcalinos la conductividad se ve afectada y en consecuencia el porcentaje de remoción de DQO y Color tiende a reducirse.

4.1.1.3 Importancia de controlar las variables pH, densidad de corriente y temperatura en la electrocoagulación.

Para poder observar el comportamiento de las variables de salida durante el tiempo se mantendrán el pH, densidad y temperatura constantes durante el tratamiento. La configuración experimental se muestra a continuación en la tabla 11.

Tabla 11 Factores a controlar para observar la significancia del pH, densidad y Temperatura.

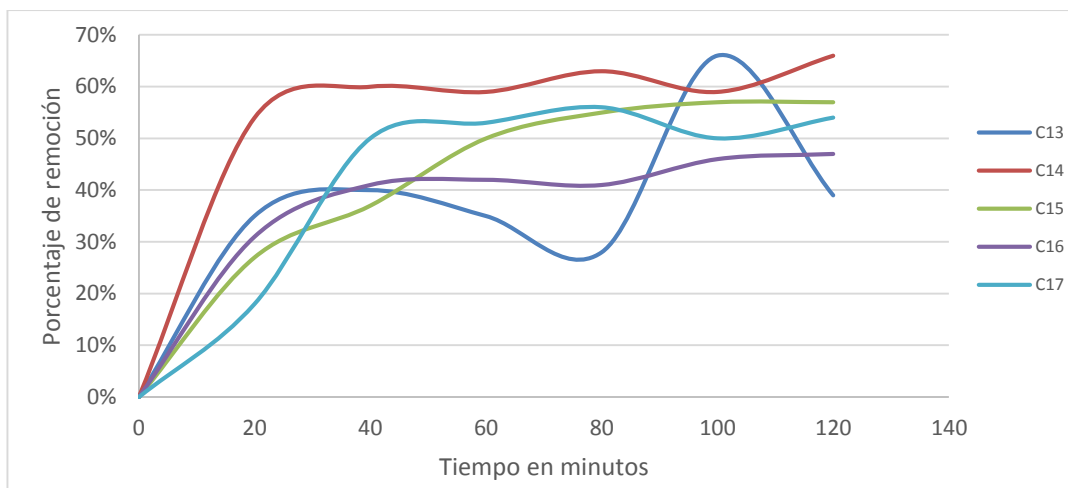
Experimento	Variables de entrada		
	pH	Densidad de corriente A-m ⁻²	Temperatura
13	3	222.85	40
14	5	222.85	40
15	7	222.85	40
16	7	222.85	15
17	5	222.85	15

La remoción de DQO con respecto al tiempo, expresada en porcentaje, se muestra en la tabla 12 y su comportamiento en la gráfica 16.

Tabla 12 Factor de remoción de DQO con respecto al tiempo.

Factor de remoción obtenido en cada corrida.					
	C13	C14	C15	C16	C17
Tiempo	DQO	DQO	DQO	DQO	DQO
0	0	0	0	0	0
20	35%	54%	27%	31%	18%
40	40%	60%	37%	41%	50%
60	35%	59%	50%	42%	53%
80	28%	63%	55%	41%	56%
100	66%	59%	57%	46%	50%
120	39%	66%	57%	47%	54%

En el experimento C14 presenta una remoción de DQO constante y más controlada no así las soluciones con pH 7 que la cantidad de remoción tiene un comportamiento menos constante.



Gráfica 16 Remoción de la DQO respecto al tiempo cuando se controla pH, densidad de corriente y temperatura

En la gráfica 16 se observa que la remoción de DQO a los 120 minutos es del orden de 40 al 60% con una solución con pH 3 aparentemente la temperatura afecta la remoción de DQO este efecto se observa en las soluciones con pH 7 en donde la de menor temperatura (15°C) tiene una remoción baja con respecto a la solución con temperatura de 40°C.

Las soluciones con pH 5 son las que presentan una mejor remoción. La densidad de corriente tiene su valor experimental más alto y se observa que las remociones de DQO se ven afectadas, inclusive la temperatura aparentemente afecta la remoción de contaminantes.

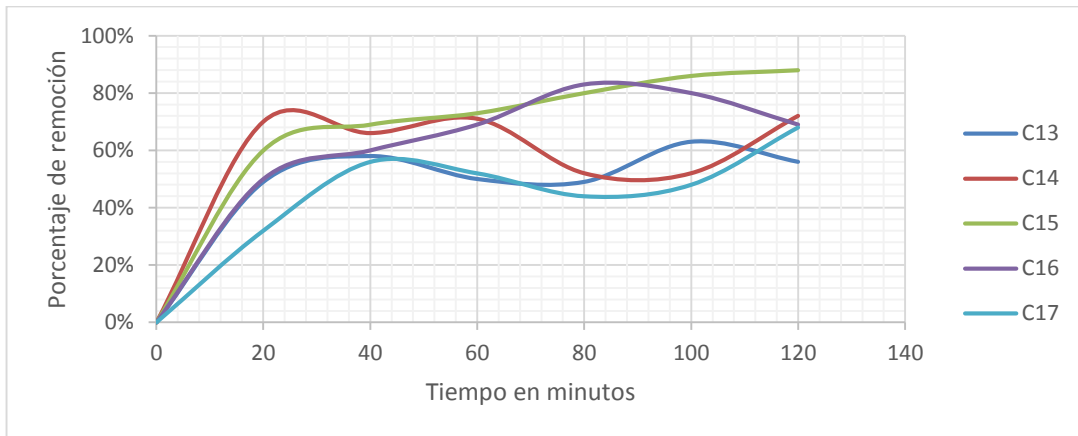
Para la variable de salida Color los factores de remoción se muestran en la tabla 13.

Tabla 13 Factor de remoción de Color con respecto al tiempo

Factor de remoción obtenido en cada corrida.					
	C13	C14	C15	C16	C17
Tiempo	Color	Color	Color	Color	Color
0	0	0	0	0	0
20	49%	70%	60%	50%	32%
40	58%	66%	69%	60%	56%
60	50%	71%	73%	69%	52%
80	49%	52%	80%	83%	44%
100	63%	52%	86%	80%	48%
120	56%	72%	88%	69%	68%

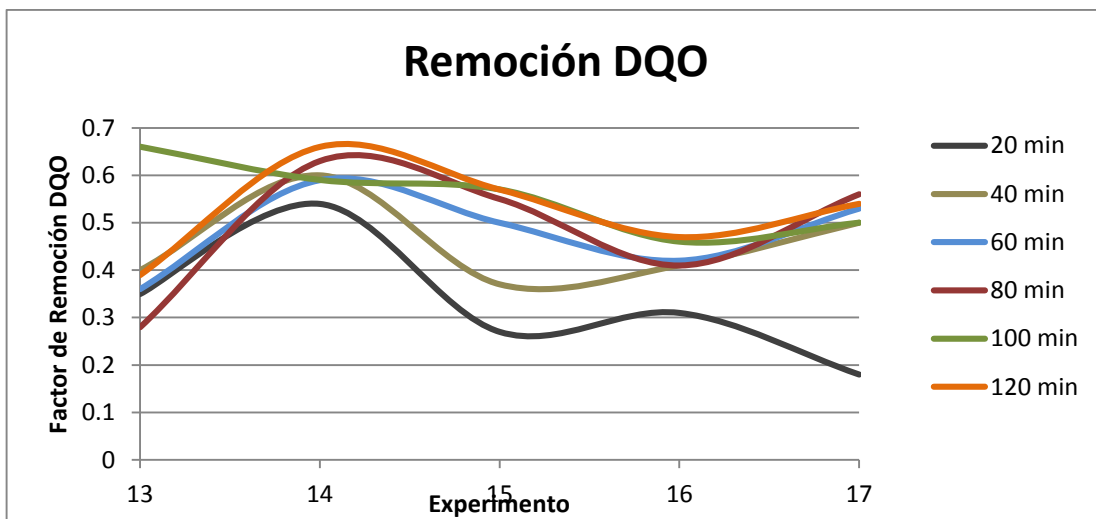
En esta tabla se observa que en los primeros 20 minutos la mayor remoción del color se obtuvo en la solución que tiene un pH 5; conforme pasa el tiempo las mejores remociones se van presentando en las soluciones donde el pH es neutro.

En la gráfica 17 se observa que la mejor remoción se obtiene cuando la solución tiene un pH 7 a una temperatura de 40 grados centígrados.



Gráfica 17 Remoción del color respecto al tiempo cuando se controla pH, densidad de corriente y temperatura

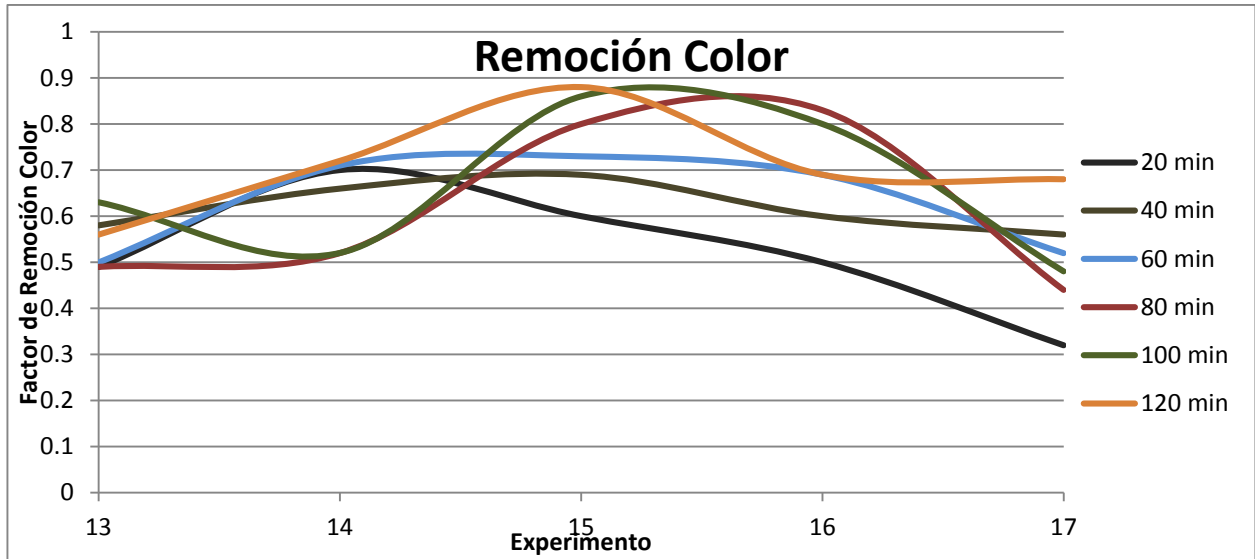
Al ordenar los datos de la remoción de DQO en periodos de muestreo se obtiene la tabla 12 (ver en anexos) y estos datos graficados se observan en la gráfica 18.



Gráfica 18 Remoción de DQO ordenado por periodos de muestreo

En la gráfica anterior se observa que al disminuir la temperatura la remoción de la DQO se ve afectada y que por el contrario al aumentar la temperatura esta mejora.

Aplicando el mismo formato a los datos para la variable de salida Color se obtiene la tabla (ver en anexos).



Gráfica 19 Remoción de color ordenado por periodos de muestreo

En la gráfica 19 se encuentran graficados los datos de la tabla de anexos en esta se observa que las mejores remociones se presentan en pH neutros con una temperatura de 40°C a los 120 minutos de tratamiento. A los 80 y 100 minutos se obtienen remociones cercanas al 80% a temperatura de 15 °C lo cual indica que para la remoción de color las soluciones con pH neutro muestran los mejores resultados y que la temperatura afecta estas remociones.

La mejor remoción de DQO se logran en soluciones con un pH ácido y las mejores remociones de Color se obtienen en soluciones de pH neutro donde la temperatura posiblemente tiene un papel importante.

En base a la bibliografía y en los experimentos realizados, se establece que los factores que presentan influencia en el proceso de electrocoagulación son. pH que aparentemente en medios ácidos mejora la remoción de DQO ya que es en estas magnitudes donde se obtuvieron remociones más significativas. Al controlar el pH se observa un control de la conductividad la cual se mantiene más estable durante el tiempo de experimentación, por otra parte la densidad de corriente en diferentes valores experimentales afecta la remoción de contaminantes, inclusive el efecto se observa claramente en los experimentos 13, 14, 15 ,16 y 17 donde la significancia de esta variable da como resultado un comportamiento que tiende a ser parecido a lo largo del tiempo de tratamiento. Se observaron tendencias de remoción a temperaturas que van de 15 °C a 40°C por tal motivo se considera estudiar más a detalle el efecto de la temperatura en las variables de salida.

4.2 Magnitud de los factores de diseño

Con los resultados obtenidos se delimitan las magnitudes para cada factor experimental del diseño 3^k como se observa en la tabla 14.

Tabla 14 Diseño factorial 3^k

Nivel \ Factor	pH	Temperatura (°C)	Densidad de corriente ($A - m^{-2}$)
1	5	15	74.28
2	7	25	148.57
3	12	40	222.85

Con estas magnitudes se define la matriz experimental que nos permite realizar el conjunto de pruebas o experimentos que tienen como objetivo que los datos obtenidos puedan ser analizados y proporcionen evidencias del proceso.

4.3 Origen y Caracterización de la muestra.

La muestra proviene de una empresa reconocida en la producción de tequila, fue colectada en el efluente de su tren de tratamiento que incluye tratamiento biológico anaerobio.

La caracterización de la muestra de las vinazas tratadas se muestra en la tabla 15.

Tabla 15 Caracterización inicial de la muestra

Análisis	Unidad	Valor
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/lit	304
Color	Pt Co	507
Turbiedad	NTU	15.6
pH	pH	8.19

4.4 Resultados del diseño 3^K

Los resultados obtenidos en los experimentos basados en el diseño de la matriz experimental se pueden consultar en anexos.

4.4.1 Remoción de DQO

Los experimentos que presentan una mejor remoción de DQO se muestran en la tabla 16.

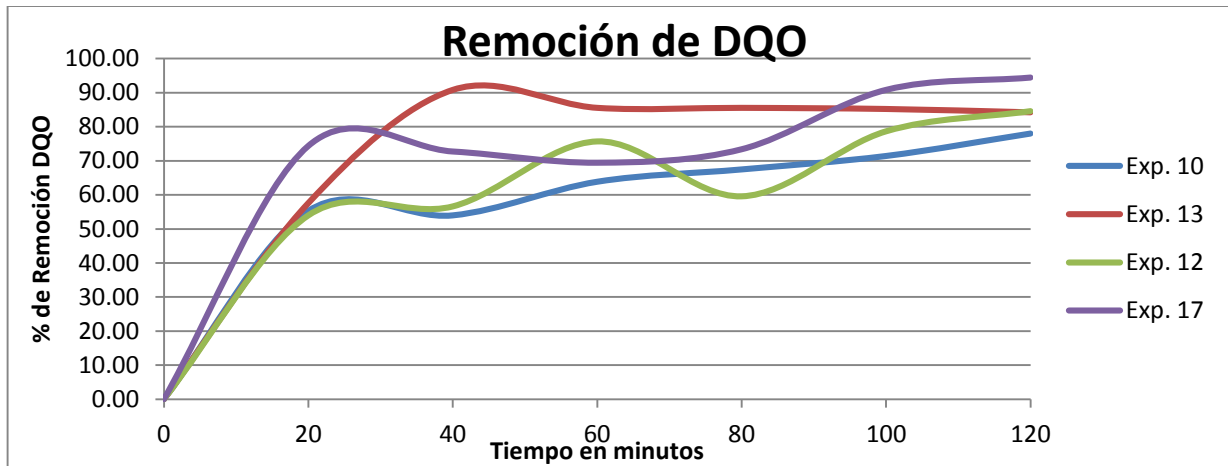
Tabla 16 Remociones más significativas de DQO.

Experimentos con resultados % Remoción de DQO					
Experimento	Densidad de corriente	Ampere	pH	Temperatura °C	%Remoción
10	222.85	1.5	7	25	77.96
13	148.57	1	7	25	84.21
12	74.28	0.5	7	25	84.54
17	148.57	1	5	40	94.41

La solución ácida presenta una remoción significativa más alta de DQO en combinación con una densidad de corriente de $148.57 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$, en este experimento probablemente la temperatura contribuya a la reacción electroquímica del proceso, sin embargo las soluciones

con pH neutro a una temperatura de 25° en los tres niveles del factor densidad de corriente tienen un porcentaje de remoción muy parecido y concentrado.

En la gráfica 20 se observa el porcentaje de remoción de DQO con respecto al tiempo para los experimentos 10, 13, 12, 17.

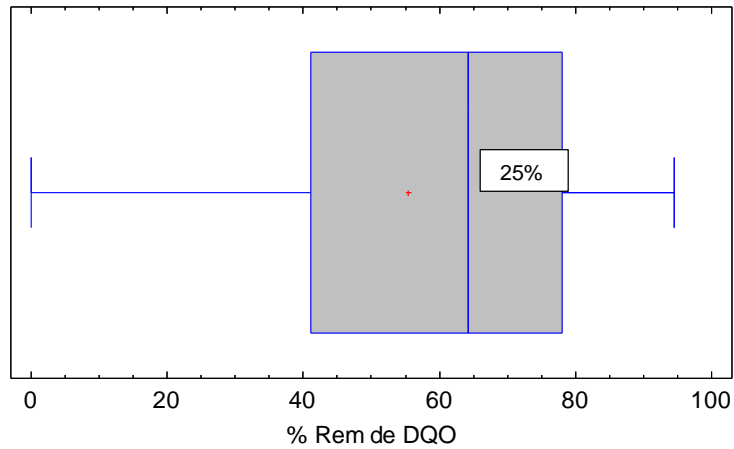


Gráfica 20 Remoción de DQO respecto al tiempo

La remoción es constante durante el tiempo de tratamiento; como ya se había observado anteriormente los tres factores tienen efecto sobre la remoción de contaminantes y que el incremento o decremento en la magnitud de alguno de estos genera que la eficiencia de remoción se vea afectada, en particular el experimento 13 es en donde se va obteniendo la mejor remoción de DQO, sin embargo a los cuarenta minutos tienen un decremento en la eficiencia; por otra parte en donde se obtiene una remoción alrededor del 95% es en el experimento 17 en donde la solución tiene un pH ácido y una temperatura de 40°C la aportación de energía al sistema, es alto y desde un punto de vista práctico sería costoso mantener esos niveles en cada factor.

Los estadísticos de la muestra para DQO indican que la remoción promedio obtenida es del 55%, la mediana de la muestra se encuentra en el rango del 64% de remoción, con una desviación estándar de 29.3934.

Gráfico de Caja y Bigotes para el % de remoción de DQO



Gráfica 21 Gráfico de Caja y Bigotes para el % de remoción de DQO

En la gráfica 21 se observa que un 25% de los datos presentan remoción de DQO del 65 al 80% esto se obtienen principalmente en pH neutros y ácidos.

Histograma

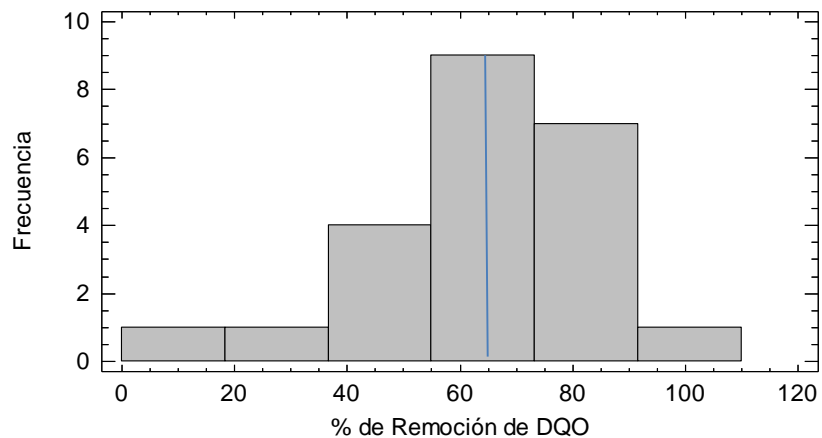


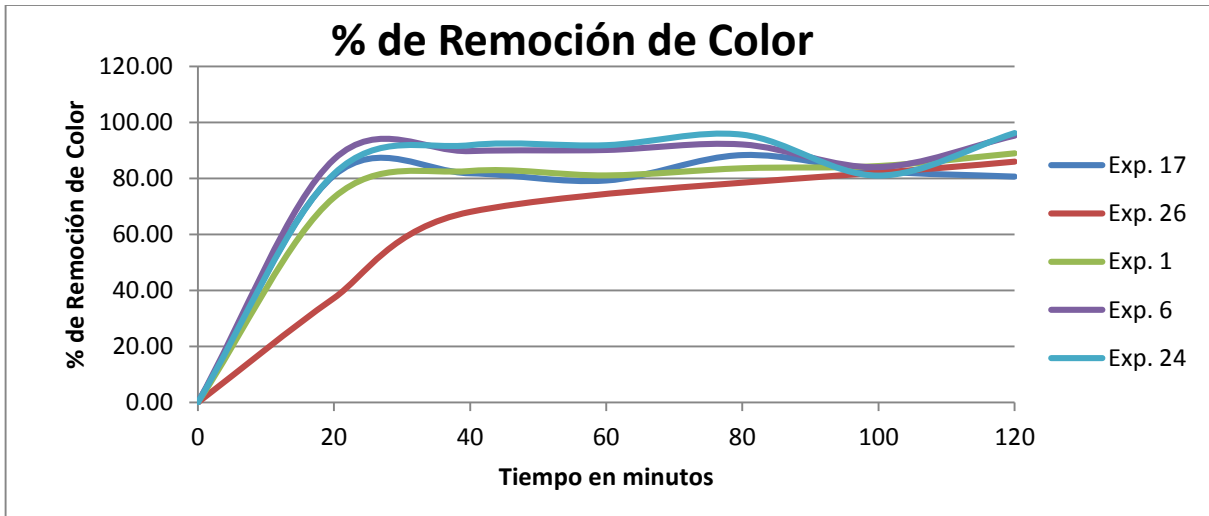
Ilustración 22 Histograma % de remoción de DQO

En el histograma de la gráfica 22 se observa que los valores de remoción se concentran con mayor frecuencia en los porcentajes de remoción alrededor del 60 al 70%.

4.4.2 Remoción de Color

En la gráfica 23 se puede observar la remoción de color más altas con respecto al tiempo de tratamiento es prácticamente la misma en cada uno de los experimentos, a diferencia del experimento 26 donde se observa que el pH tiene un efecto sobre la remoción

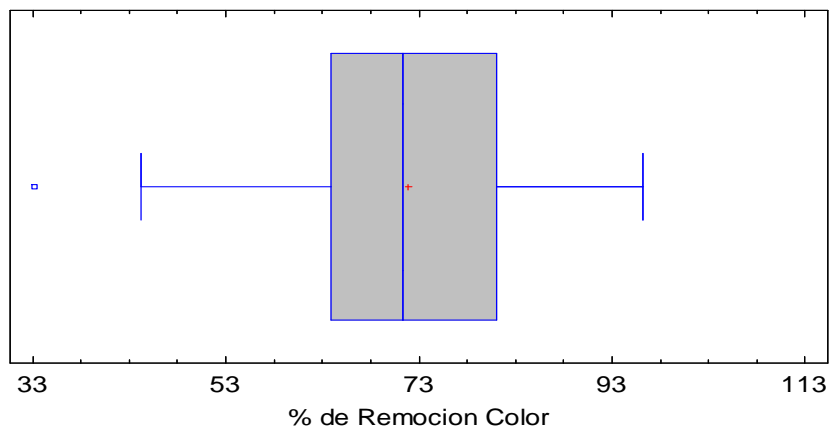
y que si bien la reacción parece lenta en contraste con los demás experimentos al final del tratamiento alcanza los mismos niveles de remoción.



Gráfica 23 Remoción de Color respecto al tiempo

Los estadísticos de la variable Color presentan en promedio remociones del 72% aproximadamente y una mediana del 71% de modo que el 50% de los datos presentan remociones de entre 60 y 78% aproximadamente. Como se observa en la figura 32 los datos se concentran alrededor de la media con una desviación estándar de 14.6711.

Gráfico de Caja y Bigotes



Gráfica 24 Gráfico de Caja y Bigotes para el % de remoción de Color

Un 25% de los datos de remoción de Color presentan remociones de entre 80 y 95% respectivamente.

Tabla 17 Remociones más significativas de Color.

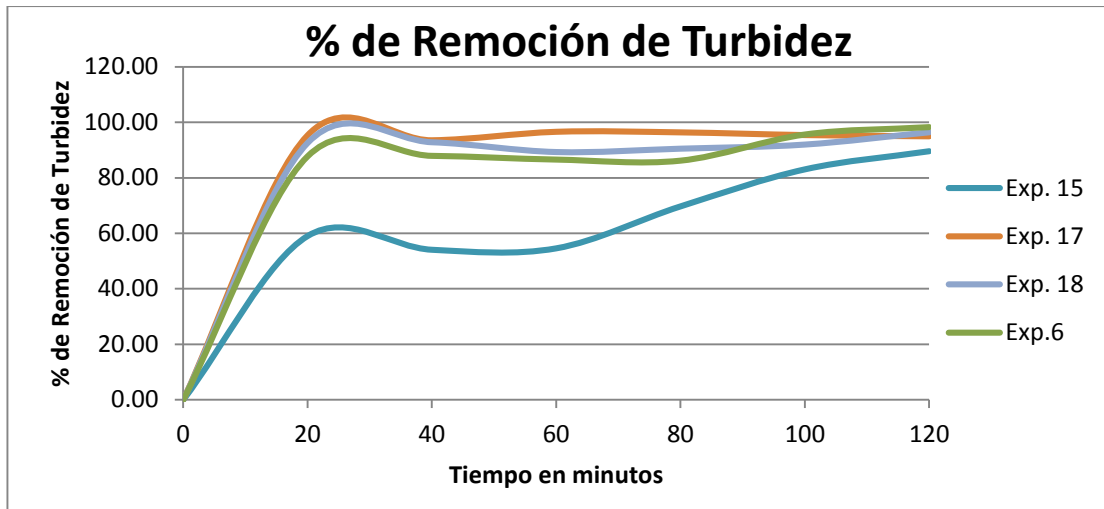
Experimentos con resultados % Remoción de Color					
Experimento	Densidad de corriente	Ampere	pH	Temperatura °C	%Remoción
17	148.57	1	5	40	80.67
26	74.28	0.5	7	40	86.00
1	74.28	0.5	5	40	88.95
6	222.85	1.5	5	40	95.27
24	222.85	1.5	5	15	96.25

Las mejores remociones en general se obtienen en medios ácidos a temperatura de 40°C y la densidad de corriente en sus tres niveles, en este punto al observar estos datos es difícil terminar el efecto de cada factor experimental sobre la remoción de Color.

4.4.3 Remoción de Turbiedad

Otra variable a analizar es la turbiedad en donde el 50% de los datos presentan remociones de entre 55% y 84% concentrados cerca de la mediana, la media tiene un valor del 63% esto quiere decir que los datos están concentrados alrededor de la media y la mediana con una desviación estándar de 27.7262.

En la gráfica 25 se observan las remociones de Turbiedad de la muestra con respecto al tiempo.

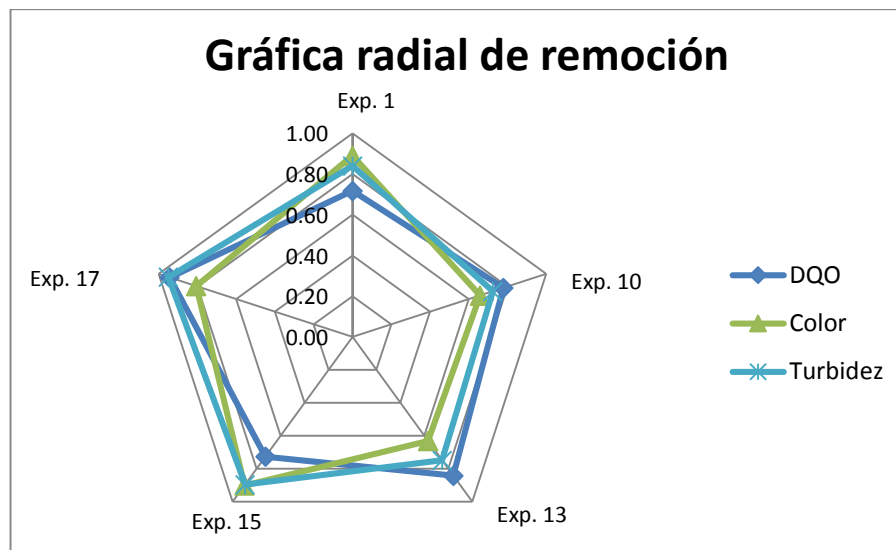


Gráfica 25 Remoción de la turbiedad respecto al tiempo

En la figura anterior se observa que las remociones de la Turbiedad son muy parecidos y que el efecto del pH, densidad de corriente y temperatura no es tan evidente, sin embargo en lo general se puede decir que los medios ácidos con temperatura de 40°C y una densidad de corriente de 148.57 A·m⁻² generan una remoción de hasta el 98% de turbiedad.

4.4.4. Análisis conjunto de la remoción de DQO, Color y turbiedad.






























En la Gráfica 26 se muestran los datos obtenidos de los experimentos que mejor respuesta de remoción tienen, en esta se relacionan las tres variables de salida DQO, Color y Turbiedad.



Gráfica 26 Gráfica Radial para remoción de las variables de salida

Las tendencias de la gráfica 26 apuntan para la DQO hacia el experimento 17 y para Color hacia el experimento 15. Para complementar la evidencia física en la tabla 19 se muestran las fotografías de estos cinco experimentos que muestran mejor remoción muestran.

Tabla 18 Fotografías experimentales

Exp	0 minutos	20 minutos	40 minutos	60 minutos	80 minutos	100 minutos	120 minutos
1							
10							
13							
15							
17							

En la tabla anterior se observa que las soluciones acidas permiten una mejor reacción y forman floculos que tienden a flotar. Por otro lado un pH neutro genera que los floculos se dividan en dos capas, floculos que tienden a flotar y otros que precipitan, esto provoca dificultad para la toma de muestra.

4.5 Análisis estadístico inferencial.

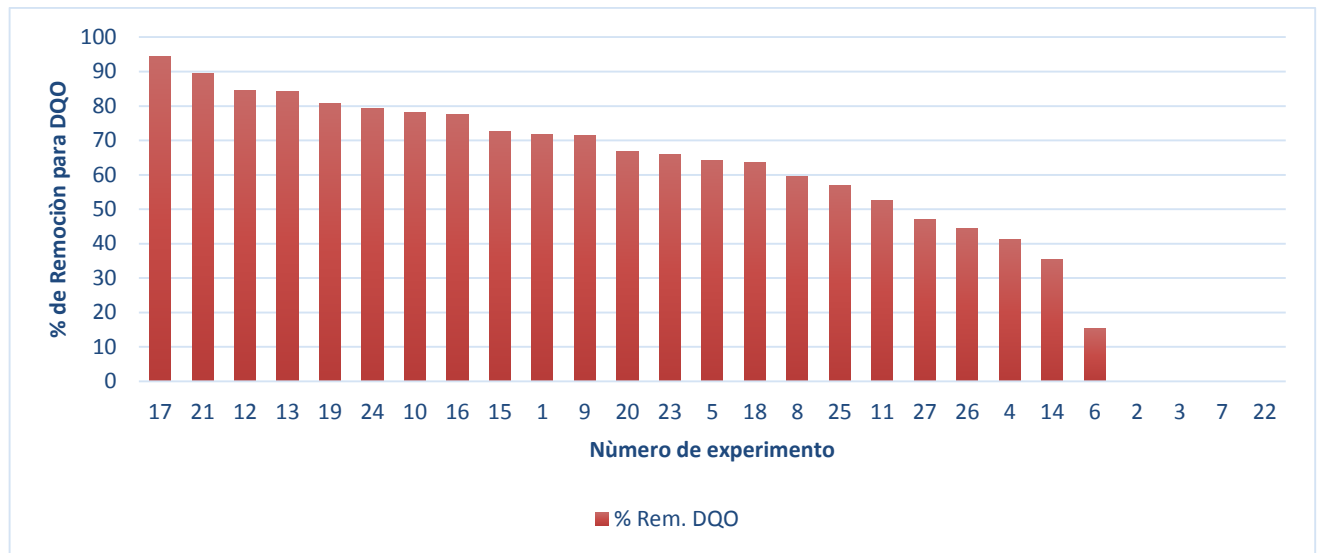
El análisis descriptivo de los datos son de utilidad sin embargo carece de un proceso definido que genere conocimiento y aprendizaje del proceso en estudio, se necesita que la teoría y los hechos sean analizados y lleven a una deducción en el que las consecuencias derivadas de la hipótesis puedan compararse con los datos.

Los datos se deben analizar aplicando el método científico a través del diseño de experimentos basados en los propios datos obtenidos así como en la planeación de los experimentos.

En la tabla que se puede consultar en anexos se muestran los datos en porcentaje de remoción obtenidos para cada experimento (ver en anexos).

4.5.1 Remoción de DQO

En la gráfica 27 se observan las remociones ordenadas de mayor a menor de la DQO para cada experimento.



Gráfica 27 Remoción de DQO de mayor a menor

Como se observa en la gráfica 27 la remoción más importante sucede cuando el pH es ácido ya que este mejora los valores de remoción de DQO, para mejorar esta remoción las temperaturas tienen que ser altas además como se observó en los experimentos preliminares el factor que determina la remoción de DQO es la densidad de corriente y la temperatura que pueden generar un aumento o disminución de la remoción de DQO.

4.5.2 Análisis ANOVA DQO

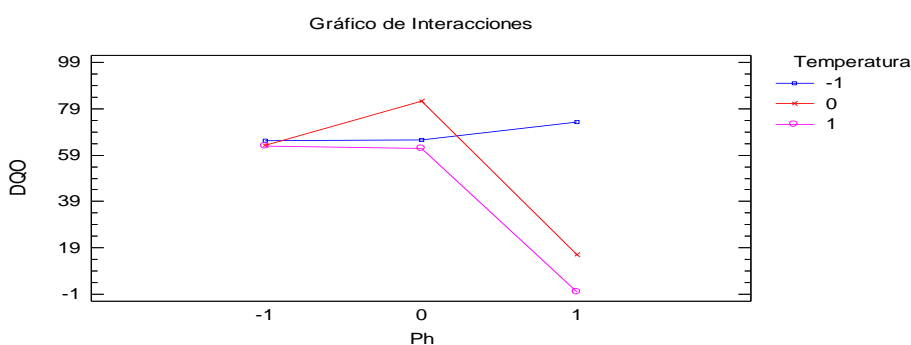
El análisis estadístico de la variable de respuesta DQO a través de un análisis Anova multifactorial mejorado al eliminar los factores con significancia baja se muestra en la tabla 19.

Tabla 19 Análisis de varianza para DQO- Suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Ph	7382.51	2	3691.26	10.19	0.0014
B:Temperatura	3391.93	2	1695.97	4.68	0.0251
C:Densidad	639.54	2	319.77	0.88	0.4329
INTERACCIONES					
AB	6643.26	4	1660.82	4.58	0.0117
RESIDUOS	5797.1	16	362.318		
TOTAL (CORREGIDO)	22463.2	26			

Los factores que presentan un efecto estadísticamente significativo y que contribuyen en la remoción de DQO con un nivel de confianza del 95% son el pH, temperatura y la interacción de estos dos factores.

En la gráfica 28 se observa la interacción de los factores pH-Temperatura y se deduce que si el factor pH se mantiene con valores ácidos las temperaturas pueden variarse entre 15 a 40°C y esto no afecta el promedio de remoción del 64% de DQO y que si se desea mejorar la remoción por arriba de la media se tendría que llevar la solución a pH 7 con temperaturas de 25 °C; si el valor del pH se lleva a medios alcalinos las remociones promedio irán en decremento con temperatura de 25 a 40°C de modo que para poder reportar remociones en medios alcalinos la temperatura tendría que reducirse hasta 15°C, sin embargo durante los experimentos con pH alcalino para conservar la densidad de corriente experimental requiere continuamente ajustes de incremento en el voltaje.



Gráfica 28 Gráfico de interacciones pH-Temperatura

4.5.3 Diferencia de medias para DQO.

Para saber que par de tratamiento son diferentes se aplican los métodos LSD (Diferencia Mínima Significativa) tabla 20.

Tabla 20 Método: 95.0% LSD para DQO por pH

<i>pH</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>	<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
1	9	34.7689	6.90372	X	-1 – 0		-6.58889	20.6974
-1	9	62.4867	6.90372	X	-1 – 1	*	27.7178	20.6974
0	9	69.0756	6.90372	X	0 – 1	*	34.3067	20.6974

Los pares de media diferentes resultaron (pH 5 - pH12) y (pH 7 – pH12) es decir que la media se aleja por debajo de la media poblacional cuando se tienen pH alcalinos donde podrían obtenerse remociones alrededor del 25%.

Tabla 21 Método 95%porcentaje LSD para DQO por temperatura

<i>Temp</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>	<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
1	9	38.41	6.90372	X	-1-0		11.4789	20.6974
0	9	58.2211	6.90372	XX	-1-1	*	31.29	20.6974
-1	9	69.7	6.90372	X	0 - 1		19.8111	20.6974

Para temperatura el par de medias diferentes es (15°C – 40°C) en donde las temperaturas altas y pH alcalinos afectan de manera negativa la remoción de DQO.

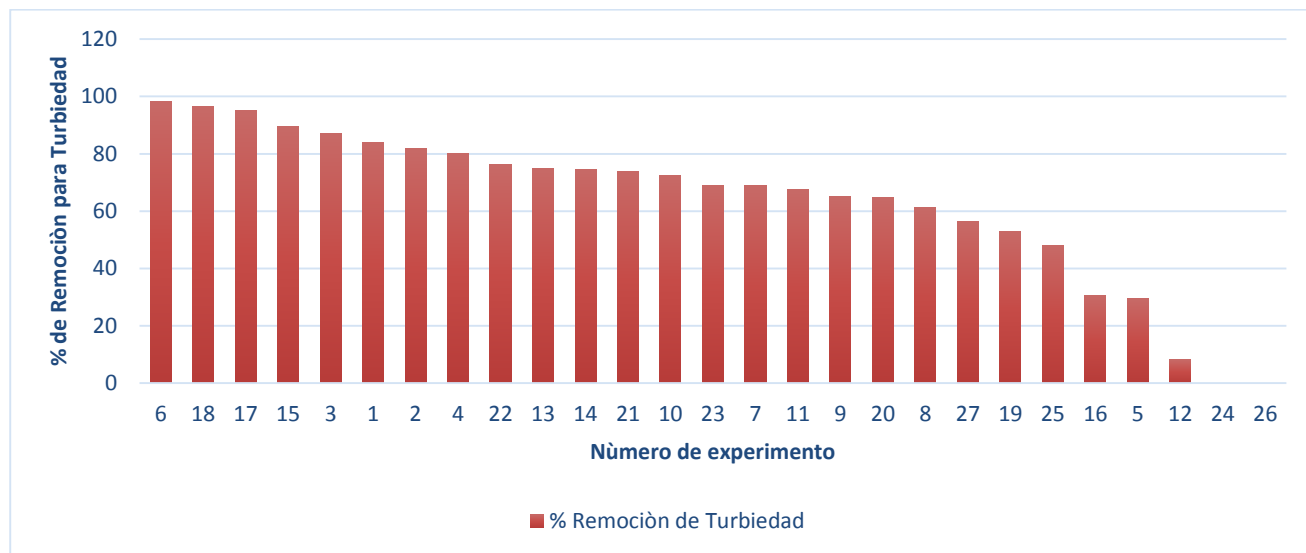
Analizando los resultados numéricos y las condiciones donde se encuentran resultados significativos con un 95% de confianza los experimentos donde se tienen factores con valores de pH 7 y Temperatura 25°C presentan evidencia de ser las condiciones experimentales más significativas para obtener buenas remociones de DQO.

4.5.4 Estimación puntual de la media para DQO

Con un nivel de confianza del 95% la media poblacional para la DQO es igual a 67% con una media del 55% y una mediana del 64%.

4.5.5 Remoción de turbiedad

Las remociones de turbiedad se representan de mayor a menor en la gráfica 29.



Gráfica 29 Remoción de Turbiedad de mayor a menor

En la figura anterior se observa que la mayor remoción se obtiene para el experimento 6 donde la interacción de los factores sobre la remoción de turbiedad no es tan evidente en el análisis Anova se obtiene los siguiente.

4.5.6 Análisis ANOVA Turbiedad.

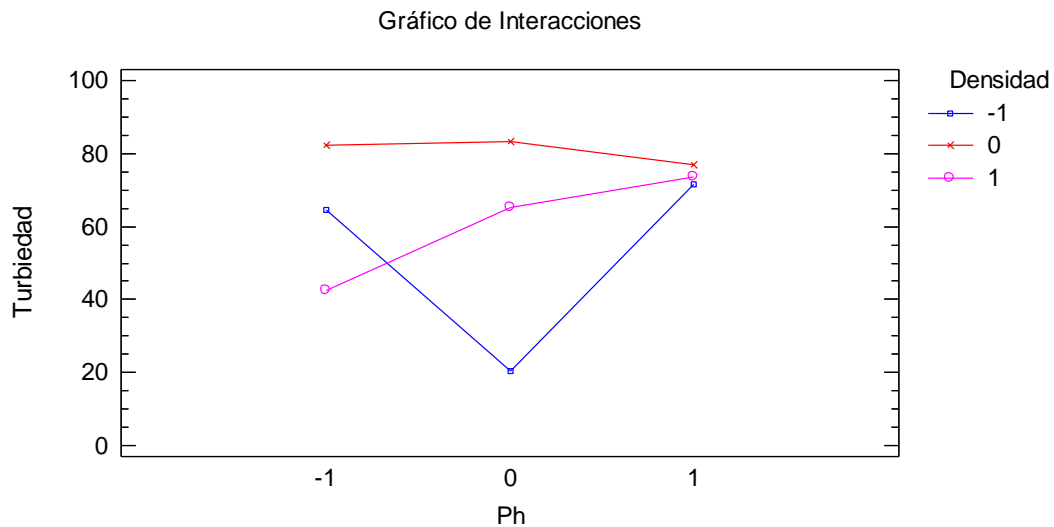
En la tabla 22 se observan las significancias de los factores y sus interacciones dentro del proceso para remover la turbiedad de la muestra.

Tabla 22 Análisis de varianza para turbiedad-Suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Ph	1219.73	2	609.863	1.62	0.2381
B:Temperatura	1607.5	2	803.75	2.14	0.1608
C:Densidad	2858.42	2	1429.21	3.80	0.0527
INTERACCIONES					
AB	4872.07	4	1218.02	3.24	0.0509
AC	5035.33	4	1258.83	3.35	0.0465
RESIDUOS	4514.18	12	376.182		
TOTAL (CORREGIDO)	19987.3	26			

Los resultados de la tabla 22 indican que los factores de manera individual no presentan significancia en el proceso, pero la interacción pH y densidad de corriente que con un nivel de confianza del 95% tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la variable Turbiedad.

La interacción de los factores pH-densidad se muestran el gráfica 30 muestra que la esta interacción establece que para densidades de condición intermedia con pH ácidos mejoran la remoción de la turbiedad.



Gráfica 30 Gráfica de interacciones para los factores pH-Temperatura

Para obtener remociones por arriba de la media la densidad de corriente debe estar en valores de $148.57 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$, si el pH tuviese valores neutros a alcalinos la densidad de corriente no afecta la remoción de turbiedad.

Es decir para obtener remociones optimas por encima de la media se deben controlar los factores Densidad de corriente de $148.57 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ y pH ácidos preferentemente.

4.5.7 Diferencia de medias

Para conocer los pares de medias que son diferentes se muestra a continuación los resultados de los métodos LCD y Tukey en la tabla 23.

Tabla 23 Prueba de múltiple rango para Turbiedad Método: 95% porcentaje LSD Turbiedad.

Densidad	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
-1	8	52.1914	7.22824	X	-1 – 0	*	-28.6448	23.2428
1	12	60.4802	5.8032	XX	-1 – 1		-8.28883	20.1967
0	7	80.8361	7.84539	X	0 – 1		20.3559	21.2305

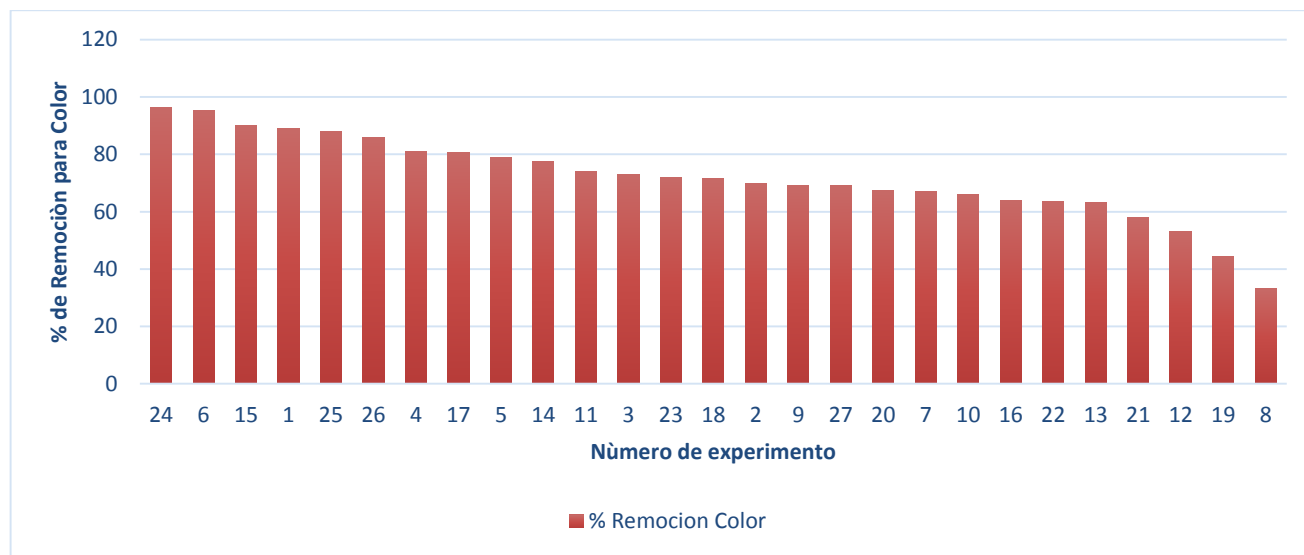
De la comparación múltiple para determinar que medias son significativamente diferentes de otras nos dice que el par -1-0 tiene significancia esto quiere decir que la densidad de corriente remueve mejor en cuanto aumente y que si el pH varia en sus tres niveles la remoción no se ve tan afectada sin embargo en soluciones acidas es donde se tendría una remoción más significativa.

4.5.8 Estimación puntual de la media para Turbiedad

Para la variable Turbiedad el parámetro más probable para la media sería igual a 74% un nivel de confianza del 95%.

4.5.9 Remoción de Color.

En la gráfica 31 se observan las remociones obtenidas de color respecto a cada experimento ordenadas de mayor a menor.



Gráfica 31 Remoción de Color de mayor a menor

En la gráfica anterior se observa que la remoción del color se ve afectada por la interacción del pH y la temperatura ya que en los experimentos 24, 6 y 15 la densidad de corriente es la misma para los tres experimentos.

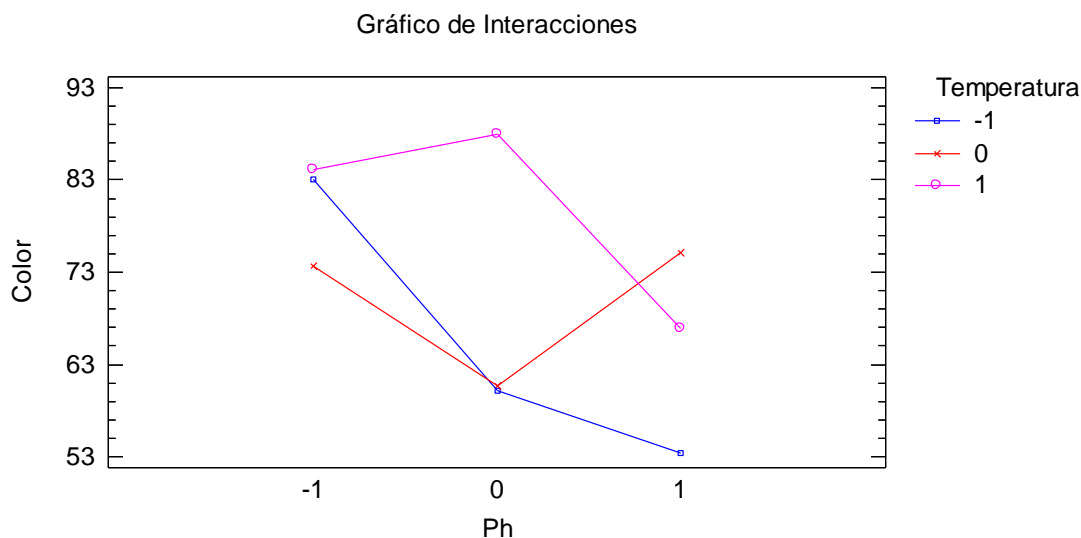
4.5.10 Análisis ANOVA para la variable color

El análisis ANOVA que corresponde a la variable de salida Color se muestra en la tabla 24.

Tabla 24 Análisis de varianza para Color – Suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Ph	865.267	2	432.633	5.39	0.0213
B:Temperatura	915.906	2	457.953	5.71	0.0181
C:Densidad	262.256	2	131.128	1.63	0.2355
INTERACCIONES					
AB	1182.28	4	295.57	3.69	0.0352
BC	699.753	4	174.938	2.18	0.1329
RESIDUOS	962.438	12	80.2032		
TOTAL (CORREGIDO)	5596.27	26			

Los efectos que tienen significancia estadística para la remoción de Color son el pH, la Temperatura y la interacción de estos dos factores, en la gráfica 32 se observa la interacción de estos sobre la remoción de Color.



Gráfica 32 Gráfica de interacciones de pH y Temperatura

En la figura anterior indica que las soluciones acidas obtienen buenas remociones con la interacción de temperaturas altas y que las remociones se ven afectadas al aumentar el pH o disminuir la temperatura

4.5.11 Análisis de medias diferentes para variable Color

Para conocer que par de medias generan las significancia estadística se muestra en la tabla 25 los resultados de los métodos LCD.

Tabla 25 Prueba de múltiple rango para Color por pH: Método 95% LSD

pH	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1	9	66.5833	2.86697	X	-1 - 0	*	13.4378	8.83402
0	9	67.7822	2.86697	X	-1 - 1	*	14.6367	8.83402
-1	9	81.22	2.86697	X	0 - 1		1.19889	8.83402

Los pares de medias que presentan diferencias estadísticas son pH 5 - pH 7 y pH 5 – pH 12 con un nivel de confianza del 95%, esto significa que valores de pH alcalinos afectan negativamente la remoción del color.

Los factores que más interactúan significativamente son el pH y la temperatura entonces aquellos experimentos que cumplan con las condiciones de pH neutro con una temperatura de 40 grados centígrados pueden probablemente presentar remociones significativas del Color.

4.6 Análisis gráfico de los supuestos de distribución.

En el análisis estadístico inferencial realizado anteriormente se consideran supuestos que se deben cumplir poder asegurar nuestros datos se comportan como normal y que tienen varianzas iguales, en los anexos se puede consultar estos supuesto.

4.7 Análisis General Inferencial

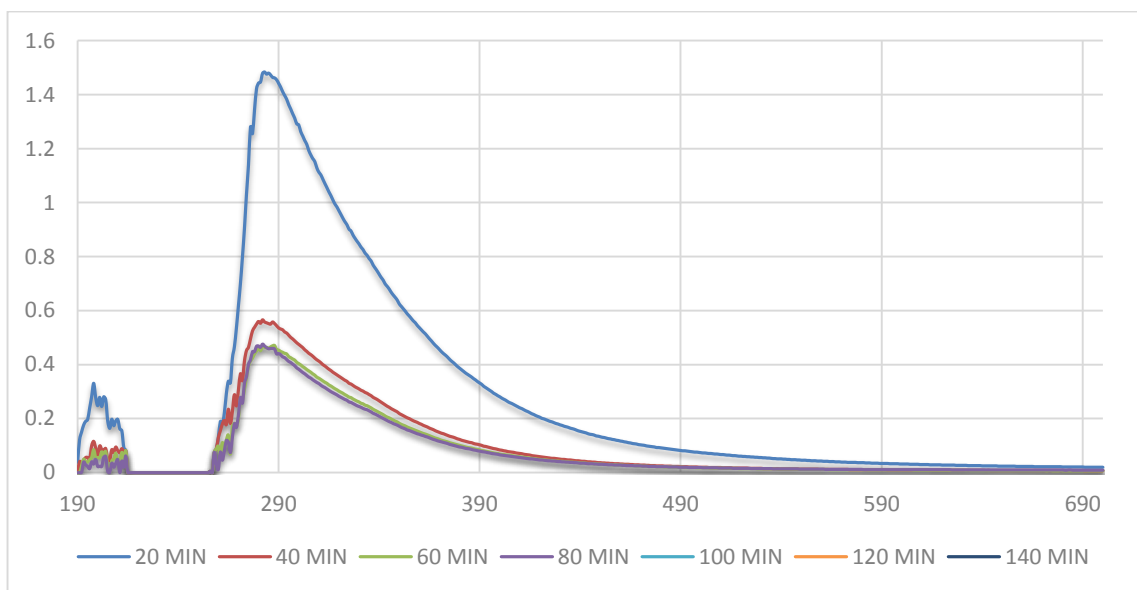
Con toda la evidencia del análisis preliminar que definieron los niveles para cada factor y que posterior esto genera a la estadística diferencial de los datos, el análisis conjunto y la estadística inferencial tenemos los datos que de manera científica nos dicen que las condiciones experimentales que tienden a obtener las mejores remociones de demanda química de oxígeno, color y turbiedad son:

Soluciones de acidas a neutrales (pH de 5 a 7), temperatura preferentemente alta (40 grados centígrados) y densidades de corriente con valores de 74.28 y 148.57 A-m⁻². Con esta información se afirma que el experimento que más eficiencia ofrece es el número 17 en la tabla siguiente se muestran los datos correspondientes.

Tabla 26 Experimentos más significativos estadísticamente.

Número de Experimento	pH	Temperatura °C	Densidad de corriente A/m ²	DQO % de Remoción	Color % de Remoción	Turbiedad % de Remoción
17	5	40	148.57	94.41	80.67	95.01
13	7	25	148.57	94.21	63.12	74.87

En la gráfica 33 se muestra el escaneo de longitud de onda del experimento que presenta las remociones más altas.



Gráfica 33 Escaneo de Longitud de Onda del Experimento 17

En la figura anterior se puede observar la remoción de contaminantes con respecto al tiempo, ésta grafica nos indica que no solo remueve eficientemente los contaminantes refractarios de las vinazas tratadas además nos indica que durante el proceso no se formaron especies químicas diferentes a las existentes.

4.8 Desgaste de placas

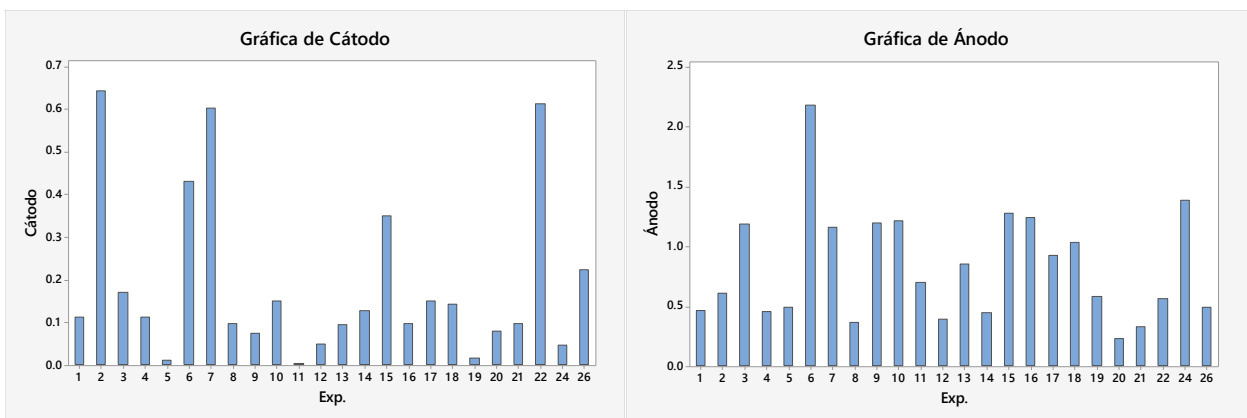
Al inicio y término de cada experimento las placas fueron pesadas (ánodo y cátodo), los datos recopilados en gramos en la tabla 26.

De esta tabla podemos observar que el experimento 17 que consideramos es el más óptimo en suma ánodo y cátodo pierden hasta 1.0732 gramos de aluminio.

Tabla 27 Desgaste de placas (ánodo y cátodo) por experimento.

Experimento	Diferencia en gramos (Ánodo +)	Diferencia en gramos (Cátodo -)
Condiciones Experimentales -1, 1, -1		
1	0.4635	0.1132
Condiciones Experimentales 1,1,0		
2	0.6049	0.6438
Condiciones Experimentales 1,0,1		
3	1.19	0.1711
Condiciones Experimentales -1,0,-1		
4	0.4526	0.1127
Condiciones Experimentales -1,-1,-1		
5	0.4871	0.0103
Condiciones Experimentales -1,1,1		
6	2.1784	0.4318
Condiciones Experimentales 1,1,1		
7	1.1626	0.6021
Condiciones Experimentales 1,-1,-1		
8	0.3672	0.0969
Condiciones Experimentales 1,-1,1		
9	1.196	0.0736
Condiciones Experimentales 0,0,1		
10	1.2157	0.1511
Condiciones Experimentales -1,-1,0		
11	0.6951	0.0037
Condiciones Experimentales 0,0,-1		
12	0.3933	0.0497
Condiciones Experimentales 0,0,0		
13	0.854	0.0938

Condiciones Experimentales 1,0,0		
14	0.4441	0.1274
Condiciones Experimentales 0,1,1		
15	1.2759	0.3492
Condiciones Experimentales -1,0,1		
16	1.2394	0.0975
Condiciones Experimentales -1,1,0		
17	0.9224	0.1508
Condiciones Experimentales 0,-1,0		
18	1.0357	0.1438
Condiciones Experimentales 0,-1,-1		
Experimento	Diferencia en gramos (Anodo +)	Diferencia en gramos (Catodo-)
19	0.5787	0.0168
Condiciones Experimentales 0,-1,1		
20	0.2292	0.0806
Condiciones Experimentales 1,-1,0		
21	0.3318	0.0978
Condiciones Experimentales 1,1,-1		
22	0.5669	0.6126
Condiciones Experimentales -1,-1,1		
24	1.3816	0.0477
Condiciones Experimentales 0,1,-1		
26	0.4923	0.224



Gráfica 34 Diagrama de barras del desgaste de placas

El desgaste de los electrodos en cada uno de los experimentos se ve representado en la gráfica 34, en donde se observa es desgaste de las placas.

Con carácter de reporte se obtuvo por método analítico instrumental el contenido de aluminio diluido en la solución antes y después de la electrocoagulación a los tratamientos 24 y 26 los resultados obtenidos se muestran a continuación en la tabla 27.

Tabla 28 Contenido de aluminio diluido.

Experimento	Aluminio mg/l	
	Inicio	Final
24	0.05	0.971
26	0.048	0.484

Con estos datos y la suma de desgaste de las placas ánodo y cátodo respectivamente se obtiene que el 70% aproximadamente del aluminio desprendido de las placas queda diluido en la fase líquida (solución) y el 40% aproximadamente en la fase sólida (floculos). Es importante puntualizar que estos resultados deben ser analizados formalmente.

También a manera de reporte se comparten las siguientes fotografías tomadas a la placa que funciona como ánodo donde se evidencia el desgaste después de 12 experimentos y tres fotografías del ánodo al final de un experimento donde se puede apreciar la arquitectura de las especies en el área de reacción.



Imagen 12 Placas Cátodo y Ánodo

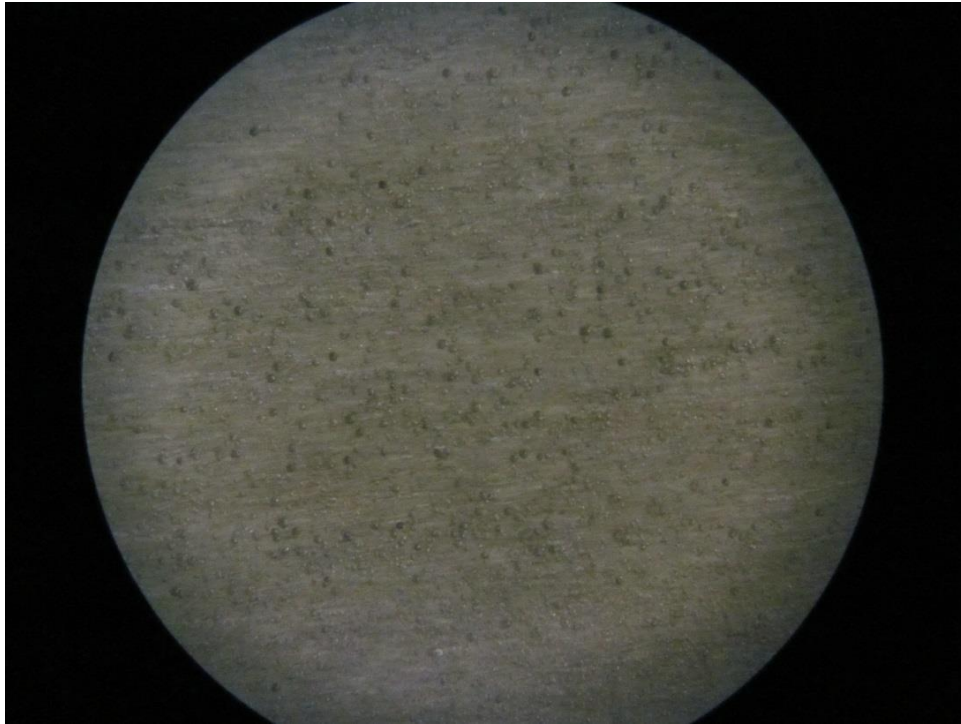


Imagen 13 Desgaste de ánodo (1)

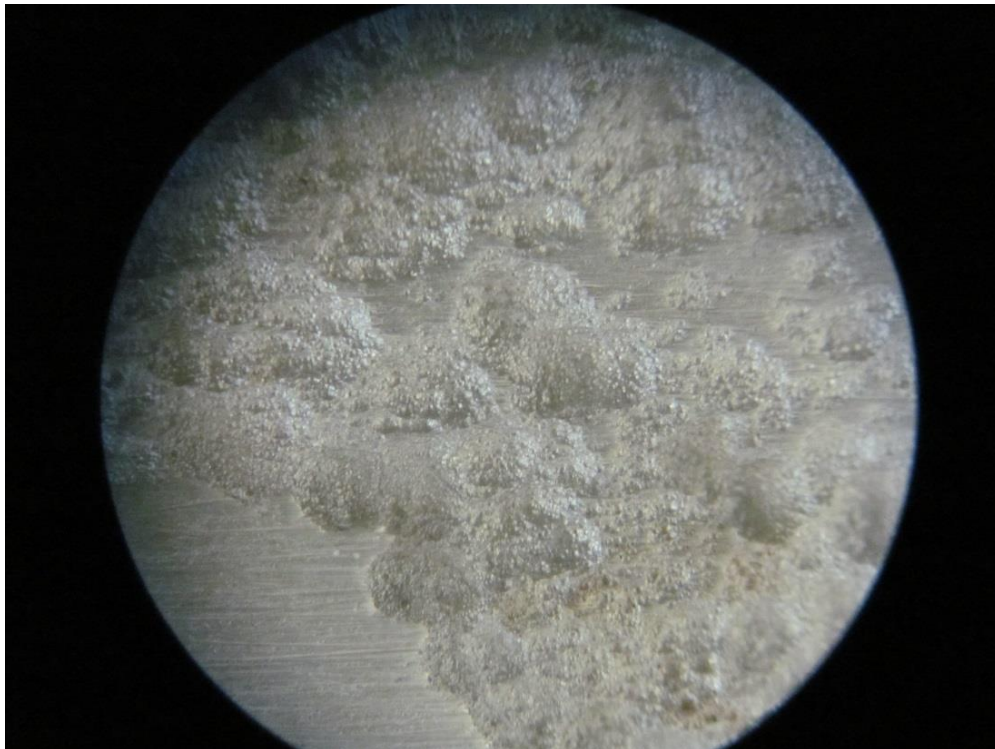


Imagen 14 Ilustración de ánodo (2)

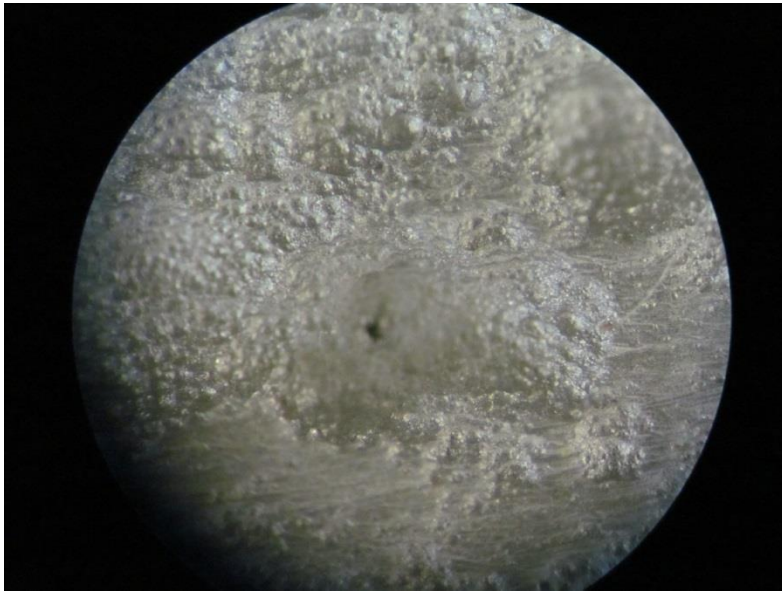


Imagen 15 Desgaste de ánodo (3)

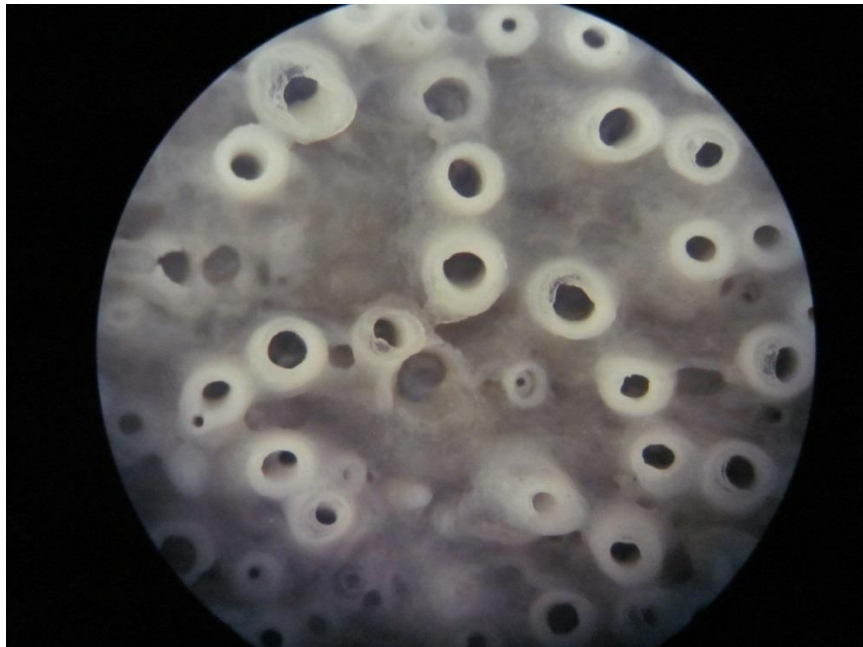


Imagen 16 Arreglo de especies formadas sobre el ánodo

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

En base a los resultados se puede afirmar que la electrocoagulación es una excelente alternativa para remover contaminantes refractarios de efluentes de una planta de tratamiento de vinazas. La evidencia experimental determina que los factores que contribuyen a remover DQO son el pH y la temperatura, en el caso de la densidad de corriente al aumentarla a hacia su valor mayor la remoción de los contaminantes es reducida de manera importante.

Para la remoción de color los factores que contribuyen o interactúan para eliminar el color son el pH y la temperatura que cuando esta se incrementa a su valor más alto mejora la remoción.

Para la turbiedad se obtiene que los factores pH y temperatura afectan la remoción de la turbiedad.

Para determinar valores en donde estos factores maximizan la remoción de DQO, Color y Turbiedad se utilizó la estadística tanto diferencial como la inferencial, obteniéndose lo siguiente:

1.- Las remociones más significativas se obtienen en interacciones de pH y temperatura. Para el pH con valores entre 5 y 7; con la temperatura en rango de entre 40 y 25 grados centígrados.

2.- Para la densidad de corriente en cualquiera de las combinaciones los valores deberán preferentemente estar entre su valor extremo inferior y el valor intermedio es decir 74.28 y 148.57 A-m⁻² respectivamente.

En base a lo anterior se afirma que el mejor control electroquímico se obtiene con pH 7, temperaturas de 25 a 40 grados centígrados y manteniendo la densidad de corriente en valores extremo bajo e intermedio, bajo estas condiciones se obtienen remociones de 84.21%

para DQO, 63.12% para Color y 74.87% para turbiedad y que llevando la solución a pH 5 es probable que las remociones mejoren en DQO, Color y Turbiedad en un 94.41%, 80.67% y 95.01% respectivamente.

Bibliografía

- Arango, A. (2009). Influencia de la conductividad eléctrica en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Lasallista de investigación*, 4(2), p. 54-64.
- Arango, A. G. (2009). Remoción del colorante azoico amaranato de soluciones acuosas mediante electrocoagulación. *Revista Lasallista de investigación*, 6(2), 31-38.
- Bacardit, J. (2007). *Coupled photochemical-biological system to treat biorecalcitrant wastewaters*. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona (España).
- Barrera, D. C. (2014). *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. México D.F.: Reverté UAEM.
- Borckris, J., & A., R. (2003). *Electroquímica moderna* (Vol. I). Editorial Reverté S.A. de C.V.
- Cañizares, P., Carmona, M., Lobato, J., Martínez, F., & Rodrigo, M. (2005). Electrodeposition of aluminium electrodes in electrocoagulation process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(12), 4178-4185.
- Cañizares, P., Rodrigo, M., Sáez, C., Lacasa, E., Lucas, A. d., Pérez, A., . . . Urriaga, R. I. (30 de Octubre de 2012). *Traguanet*. Obtenido de Red Consolider Tragua: http://www.consolider-tragua.com/documentos/Tecnologias_tratamiento_agua.pdf
- Dávila, J., Machuca, F., & Marriaga, N. (2009). Reducción de demanda química de oxígeno, carbono orgánico total y sólidos totales en vinazas mediante electroflotación/oxidación. *Ingeniería en investigación*, 29(1), p. 35-38.
- Del Real, J. L. (2012). Biogas production from anaerobic treatment of agro-industrial wastewater. *InTech*, 91-113.
- Doménech, X., Jardim, W., & Litter, M. (2004). Procesos Avanzados de Oxidación para la. *Ed. CIEMAT*, 7-3.
- García-Gómez, C., & Droguí, P. G.-M. (2011). Tratamientos biológicos y de oxidación avanzada combinados para una. *Ide@s CONCYTEG*, 585-605.
- Gutierrez, H. D. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (3a ed.). México: McGraw-Hill.
- Hall, E. R. (september de 1965). Coagulation of organic color with hydrolyzing coagulants. *Journal (American Water Works Association)*, 57(9), 1149-1166.
- Hernandez, P. (2011). *Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación*. Tesis Doctoral. (C. y. E.T.S.I. Caminos, Ed.)
- Herrera, C., Bolaños, N., & Lutz, G. (2003). *Química de alimentos: Manual de laboratorio*. Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.

- Informador. (2012). *Informador.com.mx*. Recuperado el 26 de Febrero de 2013, de <http://www.elinformador.mx/jalisco/2012/361064/6/senalan-a-tequileras-y-a-conagua-por-contaminacion-con-vinazas.htm>
- informador, E. (2009). <http://www.informador.com.mx/jalisco/2009/149312/6/residuos-afectan-paisaje-agavero.htm>. Obtenido de El informador.
- Intituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007). Censo agropecuario.
- Iñiguez, G., & Hernández, R. (2010). Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliacrilamida (PAM). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, XXVI(4), 299-311.
- Linares, I., Martínez, V., Barrera, C., Pavón, S., Bernal, L., & Lugo, V. (2011). Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos eletroquímicos. *Avances en ciencias e ingeniería*, 2(1), p. 21-36.
- López, L. A., Davila, V. G., León, B. E., Villegas, G. E., & Gallardo, V. J. (Junio 2010). Tequila vinasses: generation and full scale tratment porcesses. *Reviews in Environmental Science and Bio/technology*, 6:109-116.
- Macías, M. A., & Valenzuela, Z. A. (Junio 2009). El tequila en tiempo de la mundialización. *Comercio exterior*, 59(6).
- MANTELL, C. L. (1980). *INGENIERÍA ELECTRÓQUÍMICA*. ESPAÑA: EDITORIAL REVERTÉ, S.A.
- Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse* (Fourth Edition. ed.). USA: McGraw Hill.
- Meza, A. B. (1996). *Floculación-coagulación como postratamiento del efluente de un reactor anaerobio que trata vinazas tequileras*. Recuperado el 18 de Febrero de 2013, de Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaidis/aresidual/mexico/01336e14.pdf>
- Parsons, S. (2004). *Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment*. London: IWA.
- Primo, M. O. (2008). *MEJORAS EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE VERTEDERO DE RSU MEDIANTE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA*. Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones.
- Restrepo, M. A., Arango, R. Á., & Garcés, G. L. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Universidad Lasallista* .
- Sanchez, M. A. (1953). The bioquimical activity of some microrganism of pulque. *Congreso Cient. Mex. IV Centenario Universidad de México*, 2:471-484.
- Satyawali, Y., & Balakrishnan, M. (2008). Wastewater treatment in molasses.based alcohol destilleries for COD and color removal. *Revista de gestion ambiental*, p. 481-497.

Sawyer, C., Mccarty, P., & Parkin, G. (2001). *Química para Ingeniería Ambiental* (Cuarta ed.). Mc Graw Hill.

Vázquez-García, J. A., Muñiz-Castro, M. Á., Sahagún-Godínez, E., Basáñez, M. d., Castro-Arce, E. D., Nieves-Hernández, G., & Padilla-Lepe, J. (Jun 2013). Four New Species of Agave (Agavaceae) of the Marmoratae Group. *The American Society of Plant Taxonomists*, 320-331.

Wypych, G. (2001). *Handbook of Solvents*. Toronto New York: ChemTec Publishing.

Anexos

Resumen de datos por periodo de muestreo para DQO

Comparación de remoción DQO						
Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
13	20	3	4.38	201	40 grados celcius	0.35
14	20	5	4.42	130		0.54
15	20	7	7.28	159		0.27
16	20	7	7.3	183	15	0.31
17	20	5	6.3	140		0.18
Comparación de remoción DQO						
Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
13	40	3	4.38	201	40 grados celcius	0.4
14	40	5	4.42	130		0.6
15	40	7	7.28	159		0.37
16	40	7	7.3	183	15	0.41
17	40	5	6.3	140		0.5
Comparación de remoción DQO						
Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
13	60	3	4.38	201	40 grados celcius	0.36
14	60	5	4.42	130		0.59
15	60	7	7.28	159		0.5
16	60	7	7.3	183	15	0.42
17	60	5	6.3	140		0.53
Comparación de remoción DQO						
Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
13	80	3	4.21	226	40 grados celcius	0.28
14	80	5	4.43	116		0.63
15	80	7	7.5	142		0.55
16	80	7	7.21	188	15 grados celcius	0.41
17	80	5	5.08	140		0.56
Comparación de remoción DQO						
Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
13	100	3	4.27	180	40 grados celcius	0.66
14	100	5	4.19	128		0.59

Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
15	100	7	7.4	137	15 grados celcius	0.57
16	100	7	7.56	171		0.46
17	100	5	5.02	157		0.5
Comparación de remoción DQO						
Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
13	120	3	4.16	194	40 grados celcius	0.39
14	120	5	4.32	109		0.66
15	120	7	8.1	136		0.57
16	120	7	7.47	169	15 grados celcius	0.47
17	120	5	5.43	145		0.54

Resumen de datos por periodo de muestreo para Color

Comparación de remoción DQO						
Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
13	20	3	4.38	201	40	0.49
Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
14	20	5	4.42	130	15	0.7
15	20	7	7.28	159		0.6
16	20	7	7.3	183		0.5
17	20	5	6.3	140		0.32
Comparación de remoción DQO						
Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
13	40	3	4.38	201	40	0.58
14	40	5	4.42	130		0.66
15	40	7	7.28	159		0.69
16	40	7	7.3	183	15	0.6
17	40	5	6.3	140		0.56
Comparación de remoción DQO						
Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
13	60	3	4.38	201	40	0.5
14	60	5	4.42	130		0.71
15	60	7	7.28	159		0.73
16	60	7	7.3	183	15	0.69
17	60	5	6.3	140		0.52
Comparación de remoción DQO						
Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
13	80	3	4.21	226	40 grados celcius	0.49
14	80	5	4.43	116		0.52
15	80	7	7.5	142		0.8
16	80	7	7.21	188	15 grados celcius	0.83
17	80	5	5.08	140		0.44
Comparación de remoción DQO						
Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
13	100	3	4.27	180	40 grados celcius	0.63

Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
14	100	5	4.19	128		0.52
15	100	7	7.4	137		0.86
16	100	7	7.56	171	15 grados celcius	0.8
17	100	5	5.02	157		0.48

Comparación de remoción DQO

Experimento	Tiempo (min)	PH inicio	PH final	DQO (mg/l)	Temperatura °C	Factor Rem.
13	120	3	4.16	194	40 grados celcius	0.56
14	120	5	4.32	109		0.72
15	120	7	8.1	136		0.88
16	120	7	7.47	169	15 grados celcius	0.69
17	120	5	5.43	145		0.68

Resultados experimentales.

Experimento	Tiempo (minutos)	pH	Temperatura (°C)	Densidad corriente ($A - m^{-2}$)	Color (Pt Co)	Turbiedad (NTU)	DQO (mg/l)	Conductividad (μS)
Condiciones Experimentales -1, 1, -1								
1	0	5	40	74.28	444	15.1	263	3.1
	20	5.7			136	5.52	211	2.75
	40	4.5			88	3	97	2.82
	60	5.67			96	2.63	50	2.83
	80	4.55			83	2.67	120	2.48
	100	5.76			79	4.06	83	1.66
	120	4.58			56	2.5	86	1.88
	Condiciones Experimentales 1,1,0							
2	0	12.2	40	148.57	375	6.15	344	7.29
	20	12.1			292	3.25	342	6.62
	40	12.02			241	3.65	267	7.6
	60	11.96			233	4.52	253	0
	80	11.82			170	4.41	322	7.08
	100	11.74			221	5.89	267	6.95
	120	11.8			152	2.81	352	0
	Condiciones Experimentales 1,0,1							
3	0	12	25	222.85	310	13.7	448	0
	20	12.17			240	2.7	211	7.63
	40	12.09			216	2.48	169	9.16
	60	12.27			156	2.53	363	13.9
	80	12.28			180	2.54	504	14.94
	100	12.04			147	3.15	340	13.31
	120	11.85			137	1.99	401	12.01

Experimento	Tiempo	pH	Temperatura (°C)	Densidad corriente de ($A - m^{-2}$)	Color (Pt Co)	Turbiedad (NTU)	DQO (mg/l)	Conductividad (μS)
Condiciones Experimentales -1,0-1								
4	0	5.17	25	74.28	381	13.5	367	3.03
	20	5.73			160	10.5	159	5.81
	40	5.24			112	4.75	354	5.64
	60	5.46			96	3.9	45	5.31
	80	5.03			115	3.5	257	5.04
	100	5.48			99	3.8	178	4.9
	120	4.89			96	3.11	179	4.93
Condiciones Experimentales -1,-1,-1								
5	0	5	15	74.28	351	10.7	373	3.03
	20	5.67			168	15.7	81	2.88
	40	5.7			132	14.1	56	3.04
	60	4.91			102	8.08	62	3
	80	5.01			99	7.36	104	2.96
	100	5.23			99	9.48	327	0
	120	5.12			107	11	109	0
Condiciones Experimentales -1,1,1								
6	0	5	40	222.85	387	11.5	309	3.13
	20	5.99			67	1.91	222	3.02
	40	4.7			52	1.88	178	2.87
	60	6.33			50	2.09	1015	2.87
	80	6.09			40	2.15	391	2.64
	100	4.53			81	0.68	227	3.03
	120	5.38			24	0.265	257	2.92
Condiciones Experimentales 1,1,1								
7	0	11.99	40	222.85	672	28.7	277	5.96
	20	11.3			244	7.02	483	6.39
	40	11.28			225	7.13	282	6.51
	60	11.73			191	5.98	271	8.27
	80	11.6			167	5.81	364	9.33
	100	12.04			164	5.25	387	10.84
	120	11.97			167	4.86	348	10.14

Condiciones Experimentales 1,-1,-1								
8	0	11.99	15	74.28	264	25.79	379	5.96
	20	12.06			322	6.74	167	6.39
	40	12.09			313	8.97	139	6.51
	60	12.11			279	8.66	158	8.27
	80	12.12			283	9.26	439	9.33
	100	12.17			318	5.93	261	10.84
	120	12.22			339	6.03	123	10.14
Condiciones Experimentales 1,-1,1								
9	0	12	15	222.85	297	11.3	105	6.4
	20	11.9			284	8.16	189	7.04
	40	12.26			265	6.81	78	8.07
	60	12.38			221	6.48	103	9.79
	80	12.44			224	6.62	129	10.93
	100	12.55			274	6.53	96	11.39
	120	12.51			156	5.44	87	11.48

Experimento	Tiempo (minutos)	pH	Temperatura (°C)	Densidad corriente de (A - m ⁻²)	Color (Pt Co)	Turbiedad (NTU)	DQO (mg/lit)	Conductividad (µS)
Condiciones Experimentales 0,0,1								
10	0	7.12	25	222.85	416	10.1	177	2.61
	20	7.43			208	3.84	136	2.43
	40	7.27			142	3.32	140	2.38
	60	7.81			173	2.63	110	2.2
	80	7.3			182	4.09	99	2.21
	100	7.2			126	2.79	87	2.23
	120	7.9			173	4.3	67	1.19
Condiciones Experimentales -1,-1,0								
11	0	4.98	15	148.57	384	11	166	3.04
	20	5.61			217	8.73	135	3.64
	40	4.89			116	4.18	62	3.49
	60	5.8			147	4.5	67	3.53
	80	6.07			146	4.44	239	3.76
	100	4.67			150	5.53	158	3.82
	120	4.63			132	5.06	144	3.78

Condiciones Experimentales 0,0,-1								
Experimento	Tiempo (minutos)	pH	Temperatura (°C)	Densidad de corriente ($A - m^{-2}$)	Color (Pt Co)	Turbiedad (NTU)	DQO (mg/l)	Conductividad (μS)
	20	6.98			324	15.7	140	5.54
	40	7.06			261	11	132	5.5
	60	7.32			203	11.7	74	5.44
	80	6.9			200	11.1	123	5.29
	100	7.11			94	12	65	5.34
	120	6.9			238	14.3	47	5.21
Condiciones Experimentales 0,0,0								
13	0	7.33	25	148.57	417	9.55	198	2.85
	20	7.68			232	4.37	129	2.39
	40	7.86			180	3.48	28	2.63
	60	7.26			161	3.63	44	2.51
	80	7.45			155	4.4	44	2.44
	100	6.74			150	4.25	0	2.47
	120	7.51			187	3.92	48	2.5
Condiciones Experimentales 1,0,0								
14	0	11.98	25	148.57	142	23.2	157	6.2
	20	12.12			124	4.56	97	6.16
	40	12.09			111	4.64	114	6.49
	60	12.08			115	3.94	196	6.1
	80	0			0	0	0	0
	100	0			0	0	0	0
	120	0			0	0	0	0
Condiciones Experimentales 0,1,1								
15	0	6.97	40	222.85	408	11	199	2.83
	20	7.36			152	6.39	79	2.57
	40	7.15			122	7.16	75	2.46
	60	6.95			100	7.08	24	2.43
	80	7.79			146	4.72	62	2.28
	100	7.05			89	2.64	99	2.39
	120	6.79			50	1.62	83	2.47

Experimento	Tiempo (minutos)	pH	Temperatura (°C)	Densidad corriente de ($A - m^{-2}$)	Color (Pt Co)	Turbiedad (NTU)	DQO (mg/l)	Conductividad (μS)
Condiciones Experimentales -1,0,1								
16	0	4.99	25	222.85	364	9.77	265	3.01
	20	5.93			60	2.25	221	2.86
	40	5.29			72	3.06	93	2.89
	60	4.9			42	2.75	264	2.78
	80	6.24			42	2.51	106	2.77
	100	4.68			36	2.09	82	2.66
	120	6.27			183	10.8	68	2.65
Condiciones Experimentales -1,1,0								
17	0	5.08	40	148.57	370	4.78	156	2.89
	20	6.02			96	0.721	78	2.78
	40	5.08			92	1	83	2.94
	60	6.17			105	0.524	93	2.33
	80	4.51			59	0.556	81	2.85
	100	6.21			88	0.708	28	2.67
	120	4.26			98	0.778	17	2.91
Condiciones Experimentales 0,-1,0								
18	0	7.08	15	148.57	641	11.12	240	2.68
	20	7.36			186	1.16	144	2.52
	40	7.43			136	1.12	183	2.56
	60	6.99			166	1.67	71	2.54
	80	7.42			139	1.48	161	2.6
	100	6.95			135	1.25	151	2.55
	120	7.58			145	0.559	111	2.43
Condiciones Experimentales 0,-1,-1								
19	0	6.8	15	74.28	405	10.4	453	2.84
	20	7.12			338	12.6	127	2.61
	40	7.41			294	9.18	87	2.57
	60	7.02			314	7.11	44	2.58
	80	7.16			300	9.45	96	2.51
	100	6.9			386	8.33	78	2.53
	120	7.19			283	7.34	59	2.52

Condiciones Experimentales 0,-1,1								
20	0	6.8	15	222.85	405	10.4	453	2.84
	20	7.73			155	5.2	140	2.5
	40	7.84			136	4.53	114	2.31
	60	8.31			95	4.61	65	2.13
	80	6.68			83	4.16	71	2.34
	100	7.35			140	4.76	80	2.27
	120	7.42			166	5.48	101	2.23
	Condiciones Experimentales 1,-1,0							
21	0	11.85	15	148.57	278	10.6	177	5.41
	20	12.08			233	5.22	95	5.89
	40	12.09			213	4.1	32	5.85
	60	0			0	0	0	0
	80	0			0	0	0	0
	100	0			0	0	0	0
	120	0			0	0	0	0

Experimento	Tiempo (minutos)	pH	Temperatura (°C)	Densidad de corriente (A - m ⁻²)	Color (Pt Co)	Turbiedad (NTU)	DQO (mg/l)	Conductividad (µS)
Condiciones Experimentales 1,1,-1								
22	0	11.85	40	74.28	278	10.6	177	5.41
	20	11.93			210	3.16	111	5.84
	40	11.81			209	2.89	82	5.62
	60	11.82			202	3.07	109	5.63
	80	11.78			188	2.96	88	5.6
	100	11.77			203	2.92	96	5.51
	120	12			185	3.71	362	6.15
	Condiciones Experimentales -1,-1,1							
24	0	5.1	15	222.85	347	0	402	3.1
	20	6.1			93	0	186	2.72
	40	5.96			41	0	153	2.67
	60	5.11			41	0	133	2.61
	80	6.06			22	0	98	2.59
	100	5.5			96	0	102	2.59
	120	6.13			19	0	63	2.63

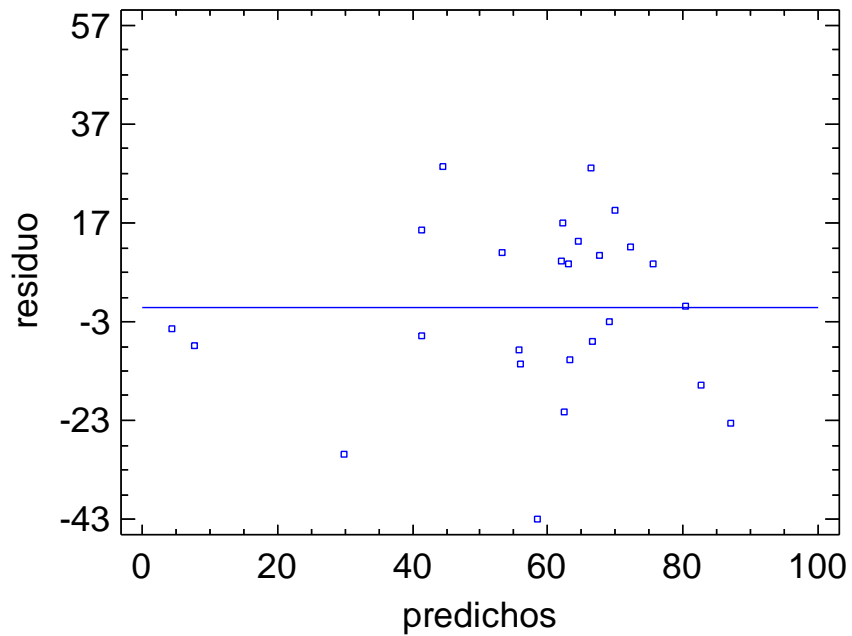
Condiciones Experimentales 0,1,-1

26	0	6.9	40	74.28	384	0	234	2.81
	20	7.4			318	0	248	2.54
	40	7.1			162	0	177	2.43
	60	7.34			579	0	143	2.43
	80	7.45			0	0	213	2.27
	100	7.17			0	0	138	2.56
	120	7.13			71	0	169	2.48

Resultados de remoción de las variables de salida

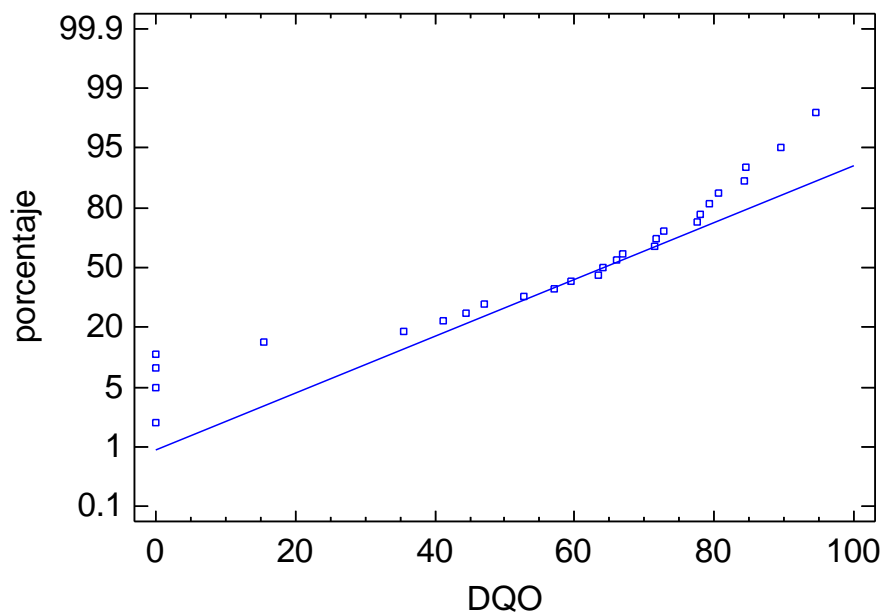
Numero de Experimento	pH	Temp °C	Dens A/m2	DQO % de Remoción	Color % de Remoción	Turbiedad % de Remoción
1	-1	1	-1	71.71	88.95	83.97
2	1	1	0	0	70.02	81.99
3	1	0	1	0	72.98	87.24
4	-1	0	-1	41.12	81.07	80.06
5	-1	-1	-1	64.14	78.9	29.49
6	-1	1	1	15.46	95.27	98.3
7	1	1	1	0	67.06	68.85
8	1	-1	-1	59.54	33.14	61.35
9	1	-1	1	71.38	69.23	65.13
10	0	0	1	77.96	65.88	72.44
11	-1	-1	0	52.63	73.96	67.56
12	0	0	-1	84.54	53.06	8.33
13	0	0	0	84.21	63.12	74.87
14	1	0	0	35.53	77.32	74.74
15	0	1	1	72.7	90.14	89.62
16	-1	0	1	77.63	63.91	30.77
17	-1	1	0	94.41	80.67	95.01
18	0	-1	0	63.49	71.4	96.42
19	0	-1	-1	80.59	44.18	52.95
20	0	-1	1	66.78	67.26	64.87
21	1	-1	0	89.47	57.99	73.72
22	1	1	-1	0	63.51	76.22
23	-1	1	1	66	72	68.93
24	-1	-1	1	79.28	96.25	0
25	0	1	1	57	88	48.13
26	0	1	-1	44.41	86	0
27	0	-1	1	47	69	56.33

Gráfica de Residuos para DQO

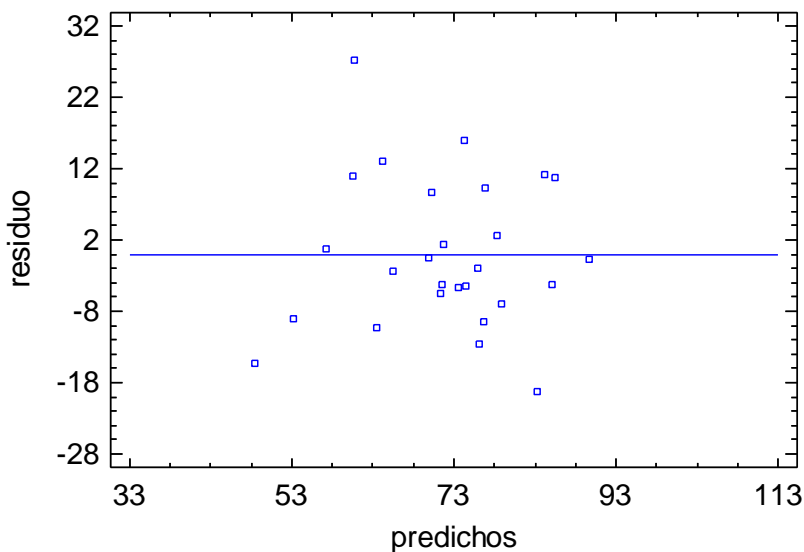


En la figura 32 se observa que los datos cumplen con el supuesto de homogeneidad de varianzas.

Gráfico de Probabilidad Normal

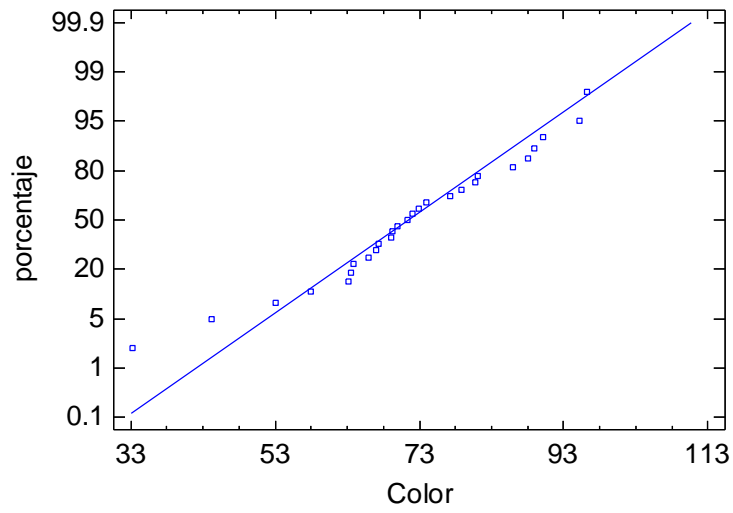


Gráfica de Residuos para Color



En la figura 34 se aprecia que los datos presentan una forma aceptable y se dice que los datos cumplen con el supuesto de homogeneidad de varianzas.

Gráfico de Probabilidad Normal



En la figura 35 se aprecia que la mayor parte de los datos están relativamente muy cerca de la línea por lo tanto se valida que los datos presentan una distribución normal.

Gráfica de Residuos para Turbiedad

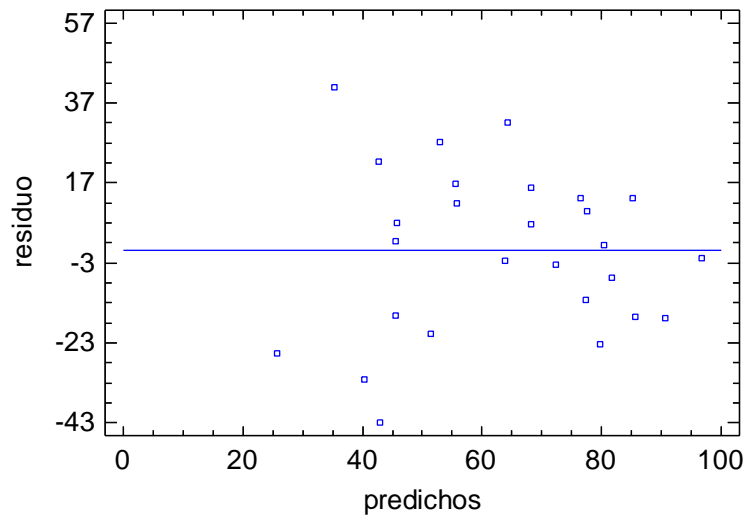
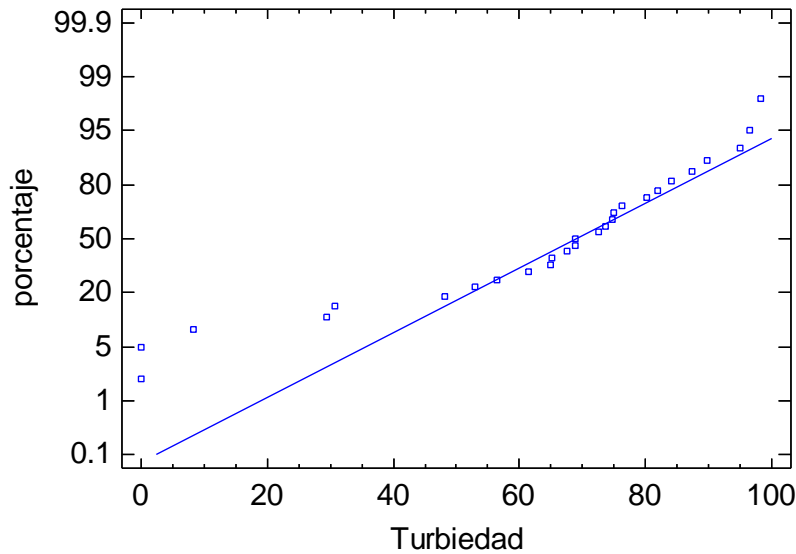


Gráfico de Probabilidad Normal



Para la variable Turbiedad en la figura 36 y 37 de observa que cumple con los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad para los datos.

Análisis estadístico Shapiro-Wilks

Para verificar el supuesto de normalidad se considera usar el método analítico Shapiro-Wilks, este método realiza la verificación mediante las siguientes hipótesis estadísticas.

Ho: Los datos proceden de una distribución normal.

Ha: Los datos no proceden de una distribución normal.

Al aplicar el método se obtiene lo siguiente:

$$\text{Estadístico } W_{DQO} = 0.87475 \quad W_{CRITICO\ 1-0.05} = 0.985$$

$$\text{Estadístico } W_{COLOR} = 0.9624 \quad W_{CRITICO\ 1-0.05} = 0.985$$

$$\text{Estadístico } W_{Turbiedad} = 0.87731 \quad W_{CRITICO\ 1-0.05} = 0.985$$

Dado que los estadísticos W son menores al W crítico se acepta que los datos proceden de una distribución normal.