



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

**DISEÑO DE UN PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE YOGURT**

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

**Profesor Guía
Ing. Antonio Harnisth**

**Autora
Guisela Pamela López Escobar**

**Año
2014**

DECLARACIÓN PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos para un adecuado desarrollo del tema escogido, y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Odguil Antonio Harnisth Pinos

Ingeniero

C.I.: 091253851-9

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

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

Guisela Pamela López Escobar

C.I.: 172455628-5

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la sabiduría para culminar con éxito mis estudios y por bendecirme con dos padres increíbles, que están siempre apoyando en los momentos difíciles y orgullosos en mis logros. A mi hermana por estar siempre junto a mí cuando más lo necesito. A mi familia y amigos, que de una u otra forma siempre están apoyándome en cada reto que emprendo. A los docentes de la Universidad de las Américas, por brindarme sus conocimientos, para enfrentarme en el mundo profesional. A mi profesor guía por darme su tiempo para culminar con éxito este Trabajo de Titulación.

Pamela

DEDICATORIA

A mis padres por que con su paciencia y dedicación me guían en cada paso que doy; y están siempre presentes en cada meta que quiero alcanzar.

Pamela

RESUMEN

La ciudad de Quito en los últimos años ha incrementado y mejorado el control de la calidad ambiental, razón por la cual todas las industrias que operan en la ciudad ya sean pequeñas o grandes, están sometidas a diversos controles en la forma en la que descargan sus aguas residuales.

La industria láctea o de sus derivados genera gran cantidad de agua de descarga en sus procesos, empleando para su tratamiento técnicas físico-químicas generalmente.

En este trabajo de investigación se estudia una técnica para el tratamiento de aguas residuales, que aun no se ha estudiado por completo, la electrocoagulación que es una técnica electroquímica que permite la desestabilización de emulsiones y es una buena opción para el tratamiento de aguas residuales de la industria de yogurt.

Para la investigación se tomaron muestras de agua residual de la industria de yogurt, se realizó la caracterización del agua de estudio, se construyó un reactor de electrocoagulación y se llevo acabo una serie de ensayos para determinar el mejor tratamiento con los parámetros de operación incluidos en el diseño experimental.

Para determinar la eficiencia del tratamiento se realizo análisis de laboratorio del agua tratada, donde se observó el porcentaje de remoción de ciertos parámetros. Concluyendo que el proceso de electrocoagulación es totalmente confiable para mejorar la calidad del agua residual de la industria de yogurt, además de ser económicamente factible para la implementación del presente estudio.

ABSTRACT

The Quito's city in recent years has increased and improved monitoring of environmental quality, which is why all the industries operating in the city whether small or large, are subject to various controls on the form in which discharge wastewater.

The milk industry or its derivatives generate large amount of water discharge processes, usually using physical-chemical treatment techniques.

In this research technique for the treatment of waste water, which has not yet been fully studied, electrocoagulation is an electrochemical technique that allows the destabilization of emulsions and is a good choice for the treatment of wastewater in yogurt industry.

For the research a sample of waste water were taken from yogurt industry, water characterization study was performed, an electrocoagulation reactor was built and took out a series of tests to determine the best treatment operating parameters included in the experimental design.

To determine the efficiency of treatment was make an analysis laboratory of treated water, where the percentage removal was observed certain parameters. In conclusion, the electrocoagulation process is entirely viable to improve wastewater quality of the yogurt industry, besides being economically feasible to implement the present study.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. Marco teórico y conceptual.....	5
1.1 Recurso agua	5
1.1.1 Definición.....	5
1.1.2 Contaminación del agua	5
1.2 Aguas residuales	6
1.2.1 Características de las aguas residuales	7
1.2.2 Tratamientos de aguas residuales.....	8
1.3 Electrocoagulación.....	10
1.3.1 Electroquímica.....	10
1.3.2 Electrólisis	10
1.3.3 Generalidades de la electrocoagulación.....	11
1.3.4 Aplicaciones de la electrocoagulación en la industria.....	12
1.3.5 Proceso	13
1.3.6 Reacciones.....	14
1.3.7 Componentes	16
1.3.8 Factores influyentes.....	17
1.3.9 Ventajas y desventajas.....	19
2. Industria de Yogurt	21
2.1 Información general	21
2.2 Situación Actual	24
2.3 Kaarú Greek Yogurt.....	25
3. Metodología	27
3.1 Toma de muestras del agua residual	27
3.2 Caracterización del agua residual	29
3.3 Descripción de las herramientas de investigación.....	29
3.3.1 Variables de investigación	29
3.3.2 Indicadores	29

3.3.3	Unidad de análisis	30
3.3.4	Población de estudio	30
3.3.5	Tipo de investigación	30
3.3.6	Hipótesis.....	31
3.3.7	Identificación de procesos	31
3.3.8	Técnicas e instrumentos.....	33
3.4	Diseño Experimental.....	36
3.5	Construcción y puesta en marcha del proceso de electrocoagulación	38
3.5.1	Construcción del electrocoagulador a escala piloto.....	39
3.5.2	Puesta en marcha del proceso de electrocoagulación	41
4.	Resultados.....	43
4.1	Caracterización del agua residual	43
4.2	Efecto de la variación del voltaje, tiempo de reacción y número de placas en la turbidez.....	45
4.3	Efecto de la variación de parámetros operacionales en función del pH	46
4.4	Efecto de la variación de parámetros operacionales en función de la temperatura.....	47
4.5	Resultados mejor tratamiento de electrocoagulación a escala piloto.....	47
4.5.1	pH obtenido en el mejor tratamiento.....	48
5.	Análisis de resultados	52
5.1	Sobre la calidad del agua residual	52
5.2	Efectos de los parámetros de estudio en función de la variable de respuesta	53
5.3	Análisis de la varianza.....	59
5.4	Análisis de la eficiencia del tratamiento de electrocoagulación	61
5.4.1	Remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅), en el agua residual mediante electrocoagulación.....	61

5.4.2	Remoción de la demanda química de oxígeno (DQO), en el agua residual mediante electrocoagulación.....	62
5.4.3	Remoción de sólidos suspendidos (SS), en el agua residual mediante electrocoagulación.....	63
6.	Análisis Costo/Beneficio.....	65
6.1	Análisis de los costos de construcción y operación del electrocoagulador a escala piloto.....	65
6.2	Electrocoagulación vs. método convencional: costos de inversión y operación.....	68
6.2.1	Proceso de electrocoagulación.....	68
6.2.2	Proceso físico-químico.....	69
7.	Conclusiones y Recomendaciones.....	71
7.1	Conclusiones.....	71
7.2	Recomendaciones.....	72
	REFERENCIAS.....	74
	ANEXOS.....	79

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para la vida de los seres humanos, ya que nos permite gozar de innumerables beneficios como beber, aseo personal, preparación de alimentos, entre otros, razón por la cual es necesaria en abundante cantidad pero también debe poseer calidad.

Sin duda el incremento de la población mundial han hecho de este recurso muy demandante, además es preciso mencionar que el crecimiento industrial ha producido que el agua sea necesaria para cualquier tipo de actividad, sin mencionar que muchas veces es desechada después de su uso en los procesos industriales sin ningún tipo de tratamiento previo, produciendo contaminación debido a que son vertidas directamente a fuentes hídricas.

La acelerada disminución de este recurso y sus altos niveles de contaminación producidos a lo largo de los años, han dado lugar a diversas tecnologías que se investigan con el fin de reducir la carga orgánica e inorgánica que se encuentran presentes en las aguas residuales, una de ellas es la electrocoagulación, proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados (Chen, 2004).

La electrocoagulación si bien no es una tecnología nueva ha sido poco empleada y estudiada. En Colombia existen estudios que demuestran que la electrocoagulación es un método muy efectivo en la remoción de contaminantes aguas residuales de la industria alimentaria. En Ecuador hay algunos estudios referentes al tratamiento de aguas residuales de la industria textil, por lo cual es preciso realizar investigaciones en otras áreas de la industria.

Una de estas industrias es la láctea, la misma que debe utilizar gran cantidad de agua de buena calidad requerida en los procesos de lavado, limpieza y desinfección; actividades que hacen de esta industria una de las de mayor generación de aguas residuales con altas cargas de contaminantes orgánicos (Wiblbrett, 2000). Dentro de esta industria se encuentra la producción de ciertos subproductos provenientes de la leche uno de ellos es el yogurt.

Kaarú es una empresa dedicada a la elaboración de yogurt griego, esta empresa recientemente se encuentra posicionándose en el mercado, por esta razón no cuentan aún con un sistema de tratamiento de sus residuos líquidos que poseen netamente cargas orgánicas de contaminantes. Esta investigación consistirá en caracterizar el agua residual de esta industria, para posteriormente poder estudiar la electrocoagulación como método empleado para el tratamiento de estas aguas residuales.

Kaarú Greek Yogurt está ubicada al nororiente de Quito en la parroquia Cumbayá en la calle SalinasS1-44.

Misión: Desarrollar, producir, comercializar y distribuir productos alimenticios de calidad que superen las expectativas de clientes y consumidores, generando valor para nuestros accionistas, beneficios a nuestros trabajadores y tratando justa y profesionalmente a nuestros socios comerciales

Visión: Expandir a un mercado internacional y liderar el movimiento de yogurt Griego en Latino América (Kaarú, 2013).

El alcance de este trabajo de titulación fue el tratamiento a escala piloto de descargas líquidas que produce la industria de yogurt "Kaarú", mediante el diseño y construcción del proceso de electrocoagulación. Para esto fue necesario el análisis físico-químico previo de las características del agua residual de acuerdo a los parámetros estipulados en la Clasificación Internacional Industrial Uniforme (CIIU).

Posteriormente se estableció los parámetros de operación que más influyan en el proceso, así como sus niveles de operación. Además se determinó la optimización y eficiencia del sistema de tratamiento. La caracterización e implementación de la planta a escala piloto se realizaron en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de las Américas y otros laboratorios especializados.

El trabajo de titulación se realizó mediante la aplicación de los conocimientos obtenidos a lo largo de la carrera, por medio de las materias de: Tratamiento de Aguas, Diseño de Plantas, Diseño Hidráulico y Diseño Experimental.

Es común que muchas de las industrias viertan sus desechos líquidos sin ningún tipo de tratamiento previo, lo que provoca contaminación de cuerpos de agua. Kaarú al ser una empresa nueva debe implementar un sistema de tratamiento que le permita que sus descargas se encuentren dentro de los parámetros que se especifican en la normativa ambiental.

La electrocoagulación sería una buena opción a adoptar para el tratamiento de sus aguas residuales, ya que esta tecnología presenta diversas potencialidades en la aplicación, facilidad de manejo y operación, versatilidad y adaptabilidad a diferentes procesos y a sus ventajas ambientales y económicas (Restrepo; Arango; Garcés, 2006).

Objetivo General

- Diseñar un proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria del yogurt.

Objetivos específicos

- Determinar los parámetros de operación que más influyen en el proceso de electrocoagulación como: tiempo, voltaje y número de placas;

mediante la caracterización de las aguas residuales de la industria de yogurt "Kaarú", de acuerdo con los parámetros estipulados en la Clasificación Internacional Industrial Uniforme (CIIU) y la puesta en marcha de la planta a escala piloto.

- Evaluar la eficiencia de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales mediante la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y sólidos suspendidos (SS).
- Determinar el sistema óptimo de electrocoagulación de acuerdo con los datos obtenidos en los análisis previos.
- Realizar un análisis costo/beneficio del sistema.

1. Marco teórico y conceptual

1.1 Recurso agua

1.1.1 Definición

La molécula de agua está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O). El agua es un líquido inodoro, incoloro e insípido; distribuido ampliamente en la naturaleza. El 70% de la superficie de la tierra están cubiertas por agua, las $\frac{3}{4}$ partes del agua dulce están inmovilizadas en glaciares o nieves perpetuas. Es imposible la existencia de la vida sin este elemento, ya que los organismos vivos están constituidos entre un 70 y un 90% por agua (RECAI, 2005, p. 14).

1.1.2 Contaminación del agua

El uso desmedido del agua por el hombre, ha provocado que al momento de ser desechada a ríos, lagos y mares, se lo haga sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminado así estas fuentes hídricas; pero también existen fuentes naturales de contaminación. El agua que devolvemos a la naturaleza está contaminada con sustancias y materiales de muy variada índole (Geissler y Arroyo, 2011, p. 94).

La contaminación resulta de muy variados actos, cualquiera que sea la causa, la contaminación es un subproducto de las actividades económicas y sociales (Universidad del Valle, 2002, p. 12).

Las fuentes más importantes de la contaminación de los cuerpos de agua son: actividades agropecuarias, generación de energía térmica, industria petrolera, la minería y metalurgia, vertederos de basura, etc. (Geissler y Arroyo, 2011, p. 132).

La industria alimentaria representa una de las principales fuentes de contaminación de los recursos hídricos, ya que en sus procesos de producción

se utilizada cantidades desmedidas de agua. Entre estas industrias tenemos la encargada de la elaboración de productos lácteos. Entre las operaciones que generalmente producen vertidos están: el lavado y esterilización de los depósitos, tanques, equipos de enfriamiento y suelos. Prácticamente el agua que se emplea en la elaboración de estos productos es para la limpieza de los utensilios y el área de trabajo (Nemerow y Dasgupta ,2009, pp. 447-448).

1.2 Aguas residuales

Las aguas residuales son las aguas usadas y los sólidos que por uno u otro medio se introducen en las cloacas y son transportadas mediante el sistema de alcantarillado (Romero, 2004, p. 17). Existen diferentes tipos de aguas residuales de acuerdo a la fuente de la que provienen, estas pueden ser:

- Las aguas provenientes de las viviendas, edificios comerciales e instituciones, que contienen desechos animales y caseros, se las llama aguas residuales domésticas.
-
- Las aguas residuales industriales son aquellas que se producen por procesos de manufactura e industrias en general.
-
- Las aguas residuales municipales son las descargas líquidas que se transportan por la red de alcantarillado de una ciudad.
-
- Las aguas que contienen desechos humanos, es decir de los inodoros se las conoce como aguas negras y las aguas grises son aquellas que tienen residuos provenientes de duchas, lavamanos y lavadoras (Romero, 2004, p. 17).

Aguas residuales de la industria láctea: se encuentra constituidas principalmente por derrames obligados o accidentales de leche empleada en el proceso de producción, vertidos producto del lavado de los recipientes que contienen productos químicos y alcalinos (Nemerow et al., 2009, p. 448).

1.2.1 Características de las aguas residuales

Para un correcto tratamiento de las aguas residuales, es indispensable conocer su composición. Esta caracterización debe ir acompañada de un correcto tipo de muestreo que nos aseguran resultados acertados. Las aguas residuales poseen características únicas de acuerdo a la actividad de la que provengan.

A continuación se detallan los parámetros más representativos presentes en las aguas residuales de la industria láctea:

- DBO: la demanda bioquímica de oxígeno es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos aerobios para oxidar la materia orgánica biodegradable presente en el agua (Geissler y Arroyo, 2011, pp. 162-163).
- DQO: la demanda química de oxígeno permite determinar el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un químico oxidante fuerte (Romero, 2004, p. 54).
- Temperatura: esta característica es importante para determinar el tipo de tratamiento que se desea emplear. El incremento de temperatura produce el incremento en la velocidad de biodegradación de los compuestos orgánicos, pero la solubilidad del oxígeno en el agua disminuye (Ramos, Sepúlveda y Villalobos, 2003, p. 74)
- pH: es uno de los parámetros más importantes analizar en la calidad del agua ya sea natural o residual. En aguas residuales con concentración adversa de pH es difícil de tratar mediante métodos biológicos. El pH debe ser controlado antes de ser desechado a una fuente hídrica, ya que puede alterar la concentración natural de la vertiente (USON, s.f.)

- **Sólidos:** la cantidad de sólidos presentes en el agua infliere de forma directa en la producción de lodos dentro de un sistema de tratamiento. Este parámetro puede ser medio de acuerdo a los diferentes tipos de sólidos presentes en el agua como: totales, sedimentables, suspendidos, disueltos y volátiles (Romero, 2004, p. 68)

El 90 al 95 % aproximadamente del DBO presente en las aguas residuales de la industria láctea, es producto de la pérdida de leche o productos lácteos en la elaboración. Los productos químicos limpiadores empleados en los procesos de lavado, se traducen en la presencia de DQO (Arango et al., 2008, pp. 181-182).

1.2.2 Tratamientos de aguas residuales

Las industrias alimenticias como ya es de conocimiento, utilizan una gran cantidad de agua en sus procesos de producción, por esta razón generan un elevado volumen de efluentes líquidos. Estas aguas deben ser tratadas antes de ser desechas, existen diferentes técnicas de tratamiento que dependen de las características de las agua residuales, según el tipo de industria de la que provengan.

A continuación se detallan las técnicas convencionales de tratamiento, empleados en las industrias alimenticias:

Pre tratamiento

El primer método de tratamiento para las aguas residuales, es la separación o eliminación de las partículas de gran tamaño que pueden producir danos en lo de sistemas de tratamiento. Entre las técnicas mas usadas están: el cribado, dilaceración y desarenado (Seoanez, 2002, pp. 189-190).

Tratamiento primario

El tratamiento primario tiene como objetivo la separación de la materia en suspensión que transporta el agua residual y que no pudieron ser eliminados

en el pre tratamiento. La tecnología a emplearse depende principalmente de los componentes del agua residual, siendo los sistemas más conocidos los siguientes: sedimentación, decantación, filtración y flotación, procesos físico químicos (coagulación y floculación), separación de aceites y grasas (Seoanez, 2002, pp. 190-191).

Tratamiento secundario

Los tratamientos secundarios buscan la reducción de DBO, materia orgánica no biodegradable. Las tecnologías más utilizadas dependen de microorganismos capaces de destruir y metabolizar la materia orgánica soluble y coloidal. Las industrias alimenticias incluyen en sus tratamientos procesos aerobios como: lagunas de estabilización, lagunas aireadas, filtros biológicos, lodos activados y biodiscos. También emplean métodos anaerobios cuando el efluente contiene una alta carga orgánica, estos pueden ser: filtros anaerobios, reactores de contacto, lecho fluidificado (Seoanez, 2002, pp. 191-192).

Tratamiento terciario

Este tipo de tratamiento es considerado cuando los vertidos de los tratamientos primarios y secundarios no poseen una alta calidad, por este motivo es necesario complementar con un sistema de tratamiento refinado, que será escogido de acuerdo a cada tipo de industria. El principal inconveniente con este tipo de tratamiento es el alto costo económico que conlleva su instalación y mantenimiento. Los tratamientos terciarios que más se utilizan son: filtración, adsorción, oxidación, osmosis inversa (Seoanez, 2002, pp. 194-195).

Las aguas residuales de la industria láctea, poseen un alto contenido de materia orgánica disuelta, que al almacenarse tienden a fermentarse, por esta razón se vuelven anaerobias. Los métodos más comunes para su tratamiento son los biológicos, entre estos tenemos: aireación, filtros bacterianos, fangos activos, riego y digestión anaerobia (Nemerow et al., 2009, p. 450).

1.3 Electrocoagulación

1.3.1 Electroquímica

La electroquímica es la rama de la química que trata el uso de las reacciones químicas espontáneas para producir electricidad, y el uso de la electricidad para forzar reacciones químicas no espontáneas (Atkins y Jones 2005, pp. 444). En otras palabras es la ciencia encargada del estudio de la transformación de la energía eléctrica en energía química.

Los procesos electroquímicos son reacciones redox, es decir, reacciones de oxido reducción, en donde se transfieren electrones de una sustancia a otra. Estas reacciones se dividen a su vez en dos semireacciones: la primera es la pérdida de electrones que ocurre durante la oxidación de un elemento y el aumento en su número de oxidación y la segunda es la reducción de un elemento mediante la disminución en su número de oxidación gracias a la ganancia de electrones (Chang, 2007, p. 820).

1.3.2 Electrólisis

La electrólisis es el proceso donde se emplea la energía eléctrica para inducir una reacción química no espontánea, mediante el paso de corriente eléctrica. Una de las ventajas principales de este método químico no es necesario el aumento de temperatura para producir una reacción, evitando pérdidas de energía y reacciones secundarias (Díaz, 2008).

La electrólisis es llevada a cabo en una cuba o celda electrolítica. Los componentes en la pila electrolítica se da de la siguiente manera: los dos electrodos están ubicados en un mismo compartimiento, hay un solo electrolito y la corriente es transportada a través del electrolito mediante los iones presentes (Atkins y Jones, 2005, p. 465).

Los electrodos son el componente de un circuito eléctrico que conecta el cableado del circuito a un medio conductor como un electrolito. El electrodo positivo es llamado ánodo (oxidación) y el electrodo negativo es llamado cátodo (reducción). El electrolito es la sustancia iónica que en solución se descompone al pasar la corriente eléctrica (Díaz, 2008).

1.3.3 Generalidades de la electrocoagulación

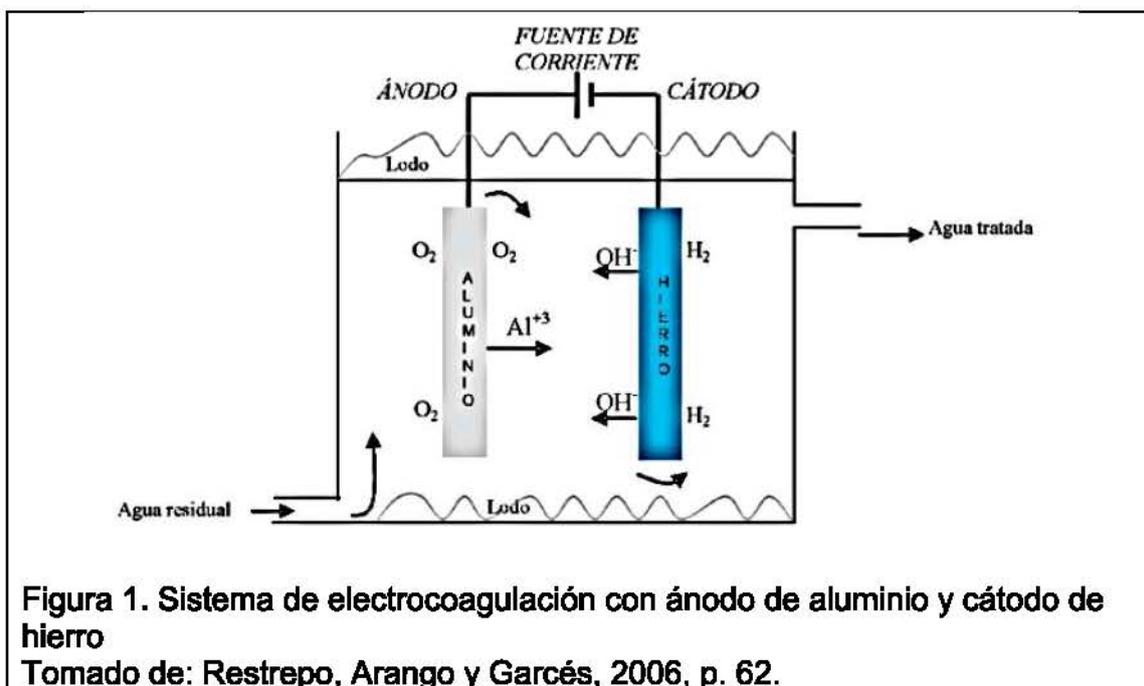
Para la remoción de diversos contaminantes de las aguas residuales, uno de los métodos más utilizados es la coagulación química. Pero en las dos últimas décadas se ha introducido un nuevo proceso llamado electrocoagulación que utiliza como principio la electrólisis, para el tratamiento de aguas residuales de distinta procedencia (Restrepo, Arango y Ruiz, 2006, p. 61).

La electrocoagulación se propuso por primera vez en el siglo XIX, la primera planta de electrocoagulación fue exitosamente construida en 1889 en Londres para el tratamiento de aguas servidas (Lichtfouse, Schwarzbauer y Robert, 2013, p. 39).

A partir de esta primera planta de electrocoagulación, continuaron las investigaciones sobre este nuevo proceso en diferentes partes del mundo. En el continente americano los primeros estudios se realizaron en Estados Unidos, seguido por países como México y Colombia en donde se ha obtenido muy buenos resultados en la remoción de DBO.

La electrocoagulación se define como el proceso electroquímico en donde las partículas de contaminantes que se encuentran en suspensión en un medio líquido son desestabilizadas, gracias a la inducción de corriente eléctrica (Lichtfouse et al., 2013, p. 38). Es decir, mediante la formación de coagulantes producto de la oxidación metálica de las placas utilizadas en este método, se aglomeran las partículas coloidales una vez que se desestabilizaron.

La corriente eléctrica es conducida a la celda electrolítica mediante placas de metal principalmente de aluminio y hierro, en donde uno hace de ánodo y el otro de cátodo. El ánodo produce el agente oxidante que forma al coagulante y permite la agrupación de los contaminantes, que pueden ser extraídos por flotación.



1.3.4 Aplicaciones de la electrocoagulación en la industria

La electrocoagulación se utiliza para la remoción de contaminantes de diversos tipos de industrias. Esta tecnología de tratamiento muchas veces es combinada con otro método electroquímico conocido como electroflotación (Restrepo et al., 2006, p. 63).

En las aguas residuales de la industria textil se aplica la electrocoagulación, para la remoción de DQO, turbidez y colorantes textiles. Otra industria que emplea esta tipo de tecnología es la de recubrimientos galvánicos, para disminuir la cantidad de metales pesados presentes en sus aguas residuales especialmente Cromo (Acosta, Bourdon y Coy, 2013, p. 107).

La industria alimentaria también utiliza la electrocoagulación para el tratamiento de sus aguas residuales. Estos vertidos tiende a contener altas concentración de DBO, DQO y grasa; con porcentajes de remoción que van entre en 98 y 99 % de estos contaminantes (Restrepo et al., 2006, p. 64).

1.3.5 Proceso

Según Gupta y Ali (2012, p.163); Cazco y Jarrín (2010, p.26); Gómez y Martínez (2013, p.14); Restrepo et al (2006) y Navarro (2007, p. 187); durante la electrocoagulación se producen una serie de reacciones electrolíticas que permiten la eliminación de las partículas suspendidas en el agua residual. A continuación se describen las etapas que se llevan a cabo:

- Formación de coagulante en el ánodo de sacrificio, mediante el desprendimiento de iones metálicos de Al. La placa metálica de disuelve, es decir se produce oxidación, en tanto que el cátodo permanece sin disolverse.
- Producción de hidrogeno, el cátodo durante el proceso desprende burbujas de hidrógeno. Los sólidos generados se adhieren a las burbujas de gas y, por tanto, son arrastrados a la parte superior del sistema.
- Desestabilización de las partículas contaminantes, los iones producidos en la etapa anterior, neutralizan las cargas de las partículas disueltas en el agua provocando la ruptura de las emulsiones, formando así la aglomeración los contaminantes llevándose acabo el principio de coagulación.
- Eliminación de los contaminantes, esta etapa se pueda dar de dos maneras, la primera mediante reacciones químicas y la segunda por reacciones físicas que producen que los aglomerados floten.

1.3.6 Reacciones

Las reacciones químicas que se desencadenan en el proceso dependen principalmente del material de los electrodos. Los principales metales usados en la electrocoagulación son aluminio y hierro.

Según Comninellis (2009, p. 247); las reacciones generalmente tienen el siguiente principio, se muestra las expresiones con el metal M tanto para el ánodo como par el cátodo:

Reacciones producidas en el ánodo,



Reacciones producidas por el cátodo,



Como indica Gupta (2012, p. 162); las reacciones que se llevan acabo en la celda electrolítica con ánodo de aluminio, son las siguientes:



Bajo condiciones alcalinas,



Bajo condiciones acidas,

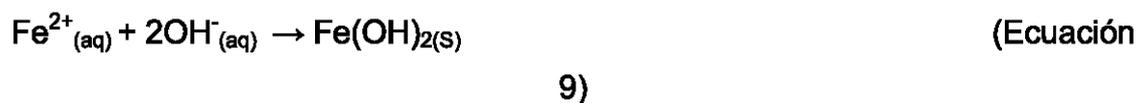


La formación de hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ durante el proceso, permite la adsorción y atracción de las partículas de contaminantes, gracias a las propiedades de esta sustancia gelatinosa la cual proporciona una amplia área superficial (Bayramoglu, 2004, p.117–125).

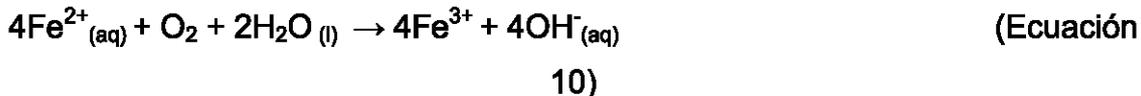
Las reacciones con ánodo de hierro pueden formar dos tipos de coagulantes, el hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$ y el hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$,



Bajo condiciones alcalinas,



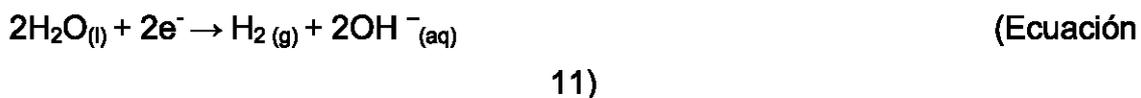
Bajo condiciones acidas,



(Gupta et al., 2012, p. 162)

La formación de estos compuestos provoca que las partículas negativas de los coloidales se agrupen, siendo removidas por atracción electrostática (Larue, 2003, pp.177-192).

Según Lichtfouse (2013, p. 41) y Gupta (2012, p.162); las reacciones de reducción que se producen en el cátodo, con desprendimiento de burbujas de hidrogeno se muestran en la siguientes ecuaciones,



1.3.7 Componentes

El sistema de electrocoagulación se encuentra conformado por una serie de elementos, que permiten la eficiencia del proceso, a continuación se enumeran las partes del sistema:

- Celda o reactor de electrocoagulación: el tipo de reactor escogido para el tratamiento depende principalmente de la cantidad de agua a tratar y de la carga contaminante que posea.

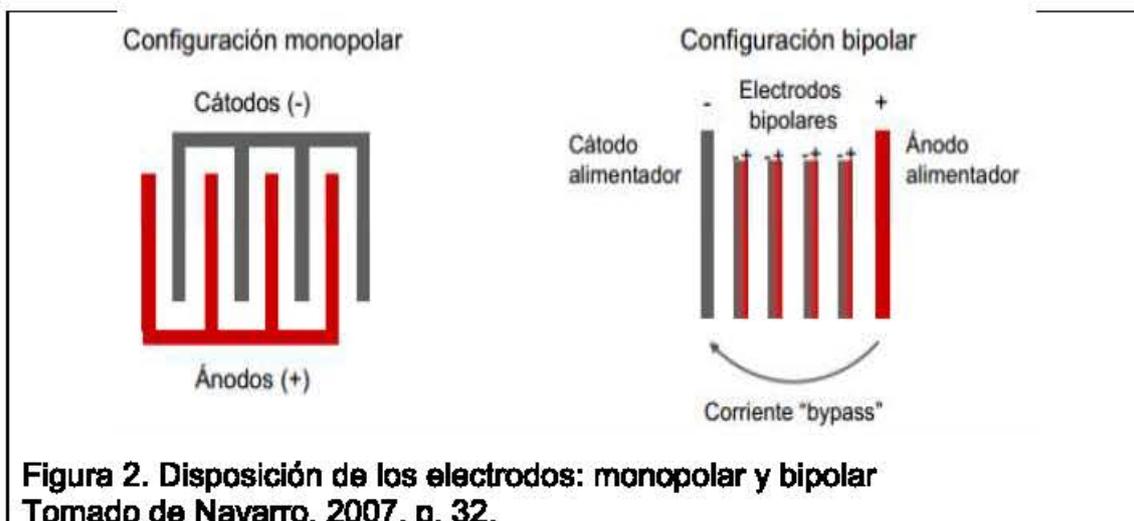
Para investigaciones de laboratorio se emplea el reactor tipo Bach ya que se puede usar para un volumen de agua determinado por un ciclo de tratamiento. Además es de operación simple y un tiene un costo bajo en su construcción y operación.

Entre la principal desventaja que presenta este reactor es que las condiciones de operación pueden cambiar con el tiempo. Otro tipo de reactor es el de sistema continuo, tiene como características que el flujo de agua es continuo y opera bajo condiciones estacionarias (Comninellis, 2009, pp. 249-250).

La celda electroquímica se conforma de los electrodos solubles, es decir el ánodo y el cátodo, y del agua residual conocida como disolución electrolítica (Cazco y Jarrín, 2010, pp. 28-19).

- Electrodos: los metales más utilizados para este proceso son el aluminio y hierro, por su bajo costo, la disponibilidad en el mercado y la cantidad de información bibliográfica existente.

Otros materiales empleados son el titanio, cobre, zinc, acero, fibras de carbón, etc. (Lichtfouse et al., 2013, p. 41). La disposición de los electrodos puede ser de dos maneras monopolar y bipolar.



- Fuente de poder: permite transformar la corriente alterna a corriente continua, con reguladores de amperaje y voltaje (Cazco y Jarrín, 2010, pp. 28-19).

1.3.8 Factores influyentes

El correcto funcionamiento del sistema de electrocoagulación depende de varios parámetros influyentes, que permiten la eficiencia del mismo. A continuación se enumeran los parámetros que mas inciden:

- pH: el pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido (Chen, 2004, pp. 11-41). La variación del pH depende de la naturaleza de los contaminantes, material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar.

En aguas residuales ácidas el pH tiende a incrementar, debido a la producción de hidrógeno molecular en el cátodo (Kumar, 2004, pp. 1245-1252); al contrario cuando el agua a tratar es alcalina el pH decrece.

Los mejores rangos de remoción se dan cerca de pH de 7, pero el consumo de energía es, sin embargo, mayor a pH neutro, debido a la variación de la conductividad (Gupta et al., 2012, p.165).

Algunas aguas residuales presentan mejor eficiencia en la remoción de sus contaminantes al aplicar la electrocoagulación a pH básicos, y otras, a pH ácidos (Arango, 2012, p. 62).

- Densidad de corriente: es uno de los parámetros que determina la cantidad de metal que se libera en el sistema: altas densidades de corriente permiten unidades de electrocoagulación más pequeñas. Sin embargo, densidades de corriente demasiado elevadas puede no ser la más eficiente, ya que resulta en el calentamiento del agua residual y en la pérdida de una gran cantidad de electricidad (Chen, 2004, pp. 11–41).

La densidad de corriente permite determinar la cantidad de coagulante producido en un electrodo, mediante la segunda ley de Faraday. Este parámetro densidad tiene un impacto significativo en la eficiencia de remoción de contaminantes (Lichtfouse et al., 2013, p. 42).

La selección de la densidad de corriente se debe hacer tomando en cuenta otros parámetros de operación, tales como: el pH, la temperatura, así como la tasa de flujo para asegurar una corriente de alta eficiencia en el proceso de electrocoagulación (Gupta et al., 2012, p.164).

- Conductividad: el aumento de la conductividad eléctrica genera un incremento en la densidad de corriente, cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación. Adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, produce una disminución del voltaje aplicado (Arango y Garcés, 2009, p. 57). La adición de algunos electrolitos tales como NaCl o CaCl₂ genera un aumento en la conductividad del agua residual (Yilmaz, 2005, pp. 160-165).

- Temperatura: la unidad de electrocoagulación opera con una temperatura entre 40 a 60°C, para una remoción eficiente (Lichtfouse et al., 2013, p. 43). Cuando la temperatura esta sobre los 60°C la eficiencia decrece, en este caso, el volumen de $Al(OH)_3$ producido disminuirá (Comninellis, 2009, p. 254).

1.3.9 Ventajas y desventajas

Ventajas:

- La electrocoagulación requiere de una celda electroquímica simple y es de fácil operación.
- La cantidad de lodo producido en la electrocoagulación es mucho menor en comparación con la coagulación química.
- Los flóculos formados tienden hacer mucho más grandes que en los tratamientos químicos convencionales, además contienen menos agua ligada, son resistentes a los ácidos y son más estables, razón por la cual pueden ser separados rápidamente por filtración.
- Las burbujas de gas que se producen durante la electrocoagulación son llevadas a la parte superior de la solución en la que puede ser fácilmente recogidas y eliminadas.
- La electrocoagulación produce aguas residuales con menos contenido de TDS, es decir, elimina las partículas coloidales más pequeñas (Gupta et al., 2012, p.165).
- Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros.
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.

- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes (Restrepo et al., 2006, p. 65).

Desventajas:

- La formación de una capa de oxido en el cátodo y la corrosión del ánodo debido a la oxidación, impide el transporte de corriente eléctrica disminuyendo la eficiencia del proceso (Lichtfouse et al., 2013, p. 44).
- El uso de aluminio como electrodo, tiene la desventaja de que el exceso de Al residual puede presentar efectos en la salud (Lichtfouse et al., 2013, p. 41).
- Los electrodos de sacrificio necesitan ser reemplazados cada cierto tiempo.
- Los costos de electricidad son altos, de acuerdo al lugar en donde sea implementado (Restrepo et al., 2006, p. 66).

2. Industria de Yogurt

2.1 Información general

Los procesos de elaboración de yogurt son similares, sin embargo existen diferencias tales como el envasado, la consistencia y la fruta que se le puede añadir. De acuerdo a esto se detallan 2 tipos de yogurt:

- Yogurt firme: la fermentación se lleva acabo en el mismo envase, por ejemplo el yogurt natural y aromatizado.

- Yogurt batido: la fermentación se realiza en un tanque, antes del batido y envasado, como el yogurt con fruto (Mahawt, Seantet, Brule y Schuck, 2004, p. 26).

A continuación, se detalla e proceso básico de fabricación de yogurt, desde la recepción de la materia prima hasta su envasado:

1. **Recepción:** una vez que llega la leche a la industria, se determina el volumen y la calidad que posee mediante pruebas de andén, en donde se analiza las características organolépticas, la densidad, la acidez y las células somáticas de la leche (Salas, 2014).

2. **Tratamiento térmico:** se realiza con la finalidad de eliminar gérmenes, patógenos, bacterias, levaduras y mohos indeseables que pueda contener la leche. Además ayuda a la formación de la flora láctica específica y mejora la textura del yogurt (Mahawt, et al., 2004, pp. 29).

3. **Homogenización:** se aplica sobre la leche grasa, evitando la separación de la nata. Favorece una distribución uniforme de la materia grasa,

impidiendo su separación durante la formación de coágulos y ayudando en la firmeza del producto fina. La homogeneización se realiza después del tratamiento térmico (AINIA, s.f.).

4. Pasterización: se realiza antes de la coagulación, para eliminar las bacterias patógenas y conseguir una coagulación perfecta (AINIA, s.f.).

5. Fermentación: consiste en la siembra de los fermentos o cultivos de bacterias lácticas, la misma que se debe realizar en dosis altas para garantizar la acidificación. Estas bacterias imparten a la leche fermentada unas características ma o menos filantes según la cepa (Mahawt, et al., 2004, pp. 29-30).

6. Enfriamiento: se enfría la leche a la temperatura óptima para el desarrollo de las bacterias lácticas, se añaden los aromas y colorantes en función del yogur a obtener y se inocula el cultivo (AINIA, s.f.).

7. Incubación: depende del tipo de yogurt a elaborar ya sea este firme o líquido. En el caso de yogurt firme la incubación se lleva a cabo en el envase y en el caso de yogurt líquido la incubación se realiza en tanque de fermentación (Mahawt, et al., 2004, p. 31).

8. Envasado: se utilizan envases de plástico en diferentes presentaciones de acuerdo al requerimiento de la empresa. .Tras el envasado se mantiene refrigerado a una temperatura cercana a los 4°C para reducir la actividad bacteriana y asegurar su conservación (AINIA, s.f.).

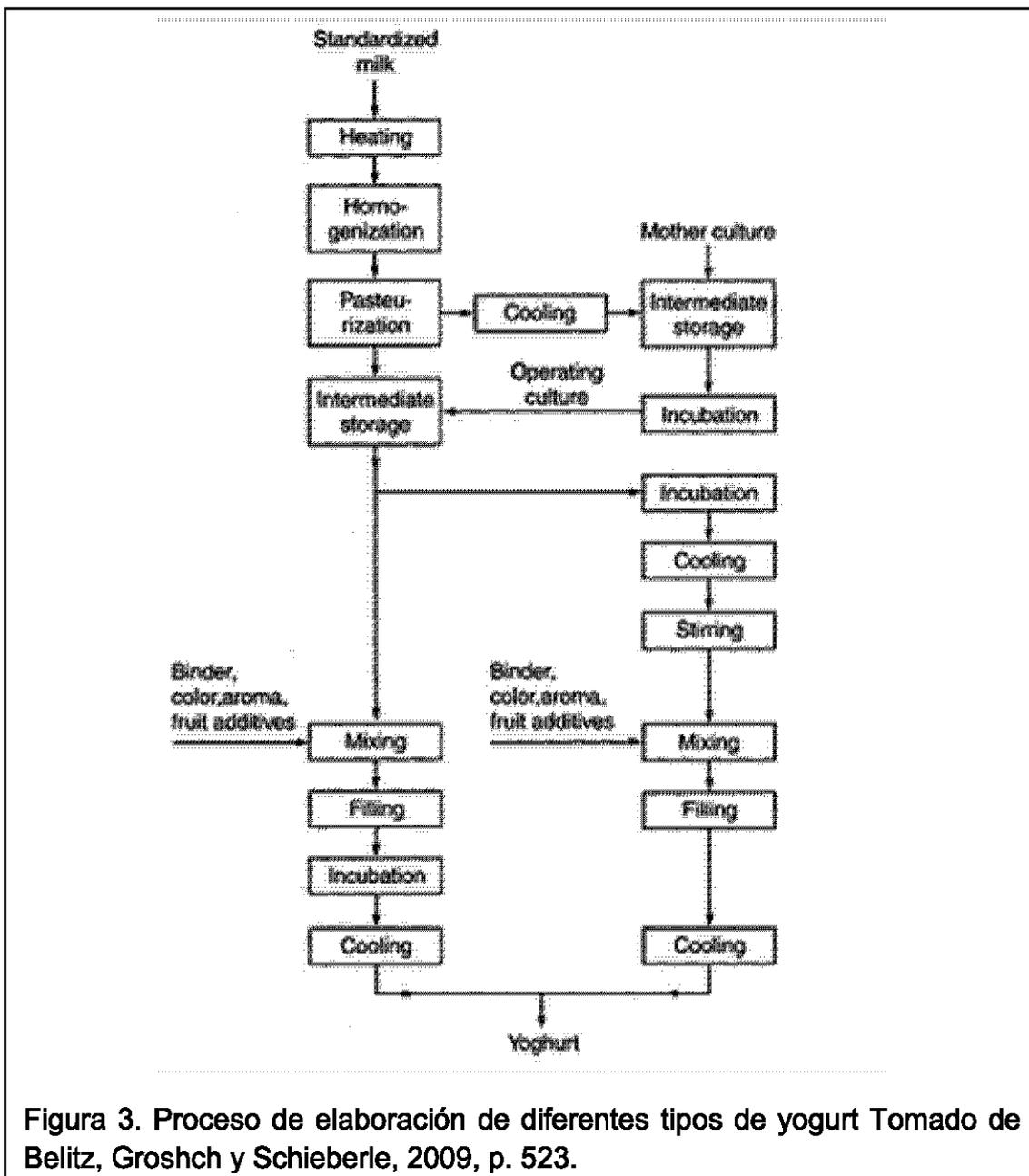


Figura 3. Proceso de elaboración de diferentes tipos de yogurt Tomado de Belitz, Groshch y Schieberle, 2009, p. 523.

La elaboración de yogurt tipo griego se diferencia de la producción de yogurt tradicional, ya que el proceso de fermentación se lleva a cabo en el propio envase y no se bate el yogurt, impidiendo el rompimiento del coágulo.

2.2 Situación Actual

Aproximadamente hace 14 años la industria de yogurt fue tomando fuerza en Ecuador, gracias a empresas como: Nestlé que introdujo entre sus productos al yogurt, permitiendo que otras industrias similares se interesaran por este producto derivado de la leche. Las pequeñas industrias que elaboraban yogurt empezaron a transformándose en medianas empresas sin que las industrias con experiencia se dieran cuenta del crecimiento que estas tenían a través del tiempo.

Nestlé al ser una de las primeras empresas que empezó a fomentar el consumo de yogurt en el Ecuador, lo hizo mediante leche fermentada ya que yogu yogu es un producto fermentado pasteurizado al que se lo conoce como una bebida de yogurt y no como yogurt netamente; los consumidores creyeron que ese era la verdadera presentación de un yogurt.

El yogurt para ser nombrado así debe tener los microorganismos vivos, por esta razón no debe pasar por un proceso de pasteurización y UHT. A lo largo del tiempo las industrias especializadas comenzaron a elaborar diferentes sabores para el consumo, siendo fresa, mora y durazno los tres sabores de mayor consumo a nivel nacional.

Muchas de empresas proveedores impulsaron la venta de insumos en el mercado permitiendo el crecimiento de la industria. Descalzi y Comercial Danesa son las empresas que mayor desarrollo han tenido en el mercado ecuatoriano, ya que impulsaron el ingreso de los fermentos lácteos de aplicación directa con TDS.

Actualmente en el mercado se trabaja con liofilizados y congelados que son fermentos que se agregan luego de la pasteurización y posteriormente se continua con el proceso normal de elaboración de yogurt.

Al inicio de la industria, el yogurt solo era consumido por la clase alta ya que su precio era elevado por no ser un producto masivo en su producción. Actualmente el yogurt es consumido por todos los estratos sociales, por eso se diversifico al introducirse diferentes tipos de yogurt como: batido, bebible, yogurt postre y yogurt bolo; generando mayor consumo en el mercado popular.

La industria productora de yogurt tanto formal como informal comenzó a utilizar los mismos tipos de insumos, la diferencia esta en la infraestructura y el criterio de la cabeza de la empresa. Se conoce que las industrias formales eran alrededor del 75% y el resto eran pequeñas industrias, pero 14 años después este 25% se desarrollo de tal manera que ahora son grandes empresas. Tal es el caso de Ranchito, que ahora es considerada una industria fuerte en este mercado (Salas, 2014).

2.3Kaarú Greek Yogurt

Kaarú Greek Yogurt es un negocio que se enorgullece por sus prácticas y visiones innovativas. Tenemos un estándar muy alto de producción y tratamos de demostrarlo a través de cada uno de nuestros productos. Todos nuestros yogurts son hechos con 100% de ingredientes naturales y frescos de la mejor calidad (Kaarú, 2013).

Mediante visitas de campo realizadas durante la elaboración de este Trabajo de Titulación, se obtuvo la información y datos necesarios para esta investigación, los mismos que se detallan a continuación:

Tabla 1. Información General de la Empresa

Empresa	Kaarú Greek Yogurt
Actividad	Elaboración de yogurt
Gerente General	Sebastián Andrade
Dirección	S1-44 Salinas, Cumbayá, EC
Teléfono	2891-770
Página web	www.kaarufood.com

Tomado de Kaarú, 2014

3. Metodología

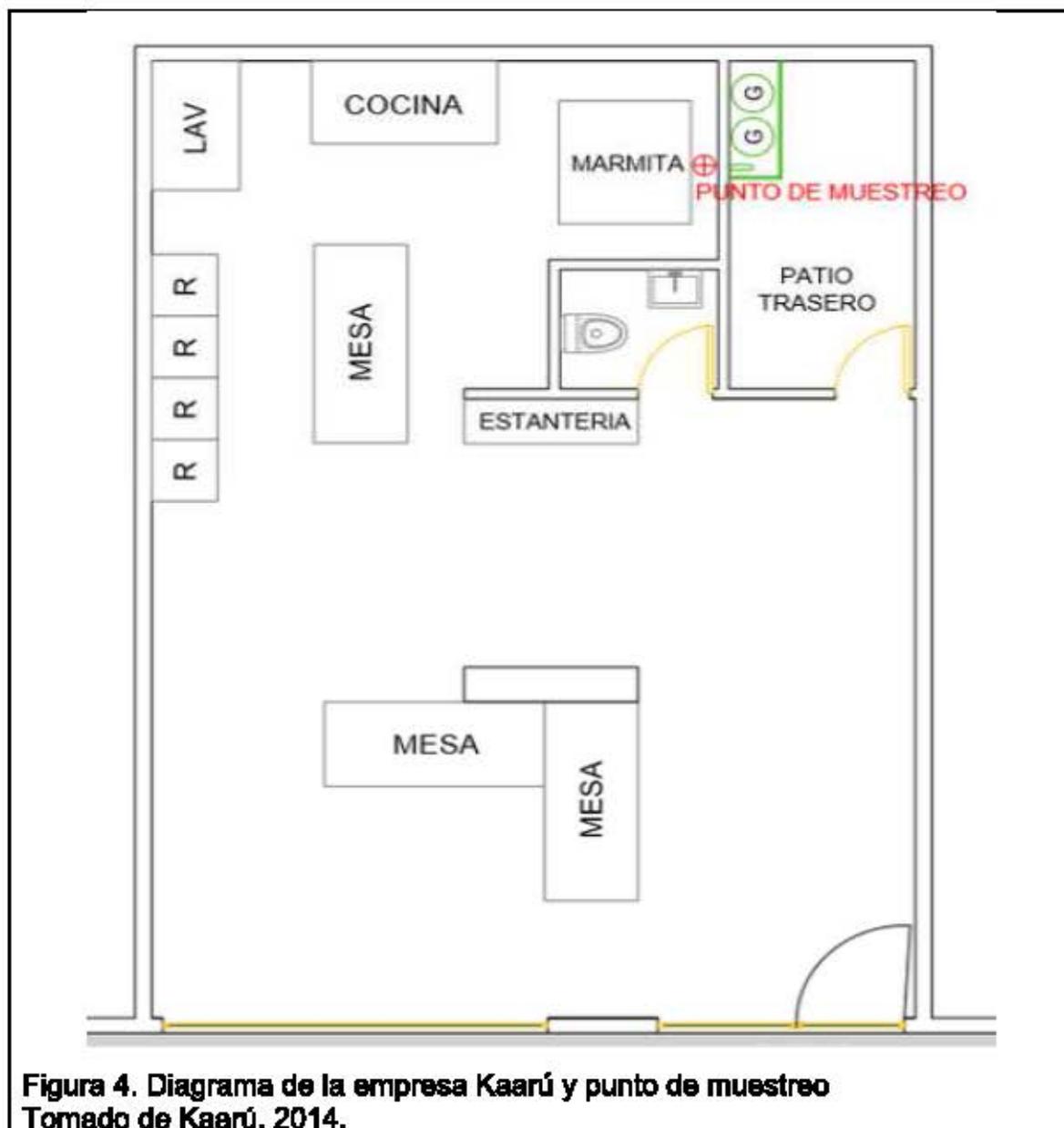
3.1 Toma de muestras del agua residual

Las muestras tomadas para el tratamiento de electrocoagulación fueron realizadas antes de ser descargadas al alcantarillado. Se tomó 3 canecas de plástico de 20 litros aproximadamente, cada vez que era necesario para los tratamientos de la investigación.

Debido a que el flujo de agua residual no es continuo, se decidió tomar muestras simples. Una vez tomadas las muestras del punto de muestreo escogido, fueron llevadas a refrigeración inmediatamente para que se preserven hasta el momento de su uso.

El caudal de descarga de Kaarú es de 1392 litros/día, al no ser un flujo continuo, durante el día existen 42 descargas que representa el 2,37% aproximadamente del caudal total.

A continuación, en la figura # 4 se aprecia el punto de muestro utilizado para esta investigación:



La muestra de agua residual tomada para el análisis de los parámetros físico-químicos en un laboratorio certificado, se la realizó en una botella de vidrio de 500 ml. En tanto que la muestra que se analizó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental-UDLA, se tomó en una botella plástica de 3 litros. (Ver más detalles en sección 3.3.8).

3.2 Caracterización del agua residual

La caracterización del agua cruda se realizó en base a los parámetros establecidos en la Guía de Parámetros Mínimos por Sector Productivo dado por la Clasificación Internacional Industrial Uniforme (CIIU), establecidos en la Ordenanza 404, Resolución N° 002. Ver Anexo 1.

Los parámetros como pH y temperatura se realizaron in situ en el momento del muestreo. Los análisis de DBO₅, SSed y SS se los realizó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Para analizar los aceites y grasas y el DQO se prescindió de los servicios de un laboratorio certificado por la OAE.

3.3 Descripción de las herramientas de investigación

3.3.1 Variables de investigación

- Variables dependientes: el diseño del electrocoagulador que permita el tratamiento del agua residual producida en la empresa Kaarú, mediante el planteamiento adecuado del proceso.
- Variables independientes: las características tanto físicas como químicas encontradas en el análisis del agua residual.

3.3.2 Indicadores

Para la evaluación de los resultados se tomó como referencia los parámetros estipulados en la Ordenanza 213, resolución N° 002, Ver Anexo 1:

- DBO₅
- DQO
- Sólidos Suspendidos

3.3.3 Unidad de análisis

El agua residual escogida para esta investigación pertenece a una pequeña industria, dedicada a la elaboración artesanal de yogurt y posteriormente a su comercialización.

3.3.4 Población de estudio

Para el presente estudio se hace referencia al agua elegida para ser tratada, la población seleccionada esta ubicada al noroccidente de la ciudad de Quito, en el Valle de Cumbayá. Kaarú Greek Yogurt, la empresa elegida se encuentra en la calle Salinas S1-44.

3.3.5 Tipo de investigación

- Cualitativa: el agua residual analizada pertenece a los procedimientos de lavado de los instrumentos utilizados para la elaboración de yogurt, donde se puede identificar restos de yogurt, suero y jabón.
- Cuantitativa: mediante la investigación cuantitativa, se obtuvieron los datos proporcionados por la empresa acerca del caudal de descarga, se realizó el dimensionamiento del reactor de electrocoagulación a escala piloto. Durante la investigación se determinó los siguientes parámetros de construcción:
 - Tipos de electrodos
 - Número de celdas
 - Tiempo de reacción
 - Intensidad de Corriente
 - Voltaje
 - Distancia entre electrodos

Una vez estudiados estos indicadores se tomaron como referencia 3, los cuales se emplearon en el diseño experimental. Finalizada la etapa investigativa se determinó el sistema óptimo para tratar las aguas de la industria. Finalmente se midió el rendimiento del tratamiento mediante el porcentaje de remoción de los indicadores propuestos.

- Documental: se registro todos los datos obtenidos durante la investigación, desde los resultados de la caracterización de las aguas residuales, los parámetros de operación óptimos para el proceso de electrocoagulación, hasta los datos de los análisis del agua tratada.

3.3.6 Hipótesis

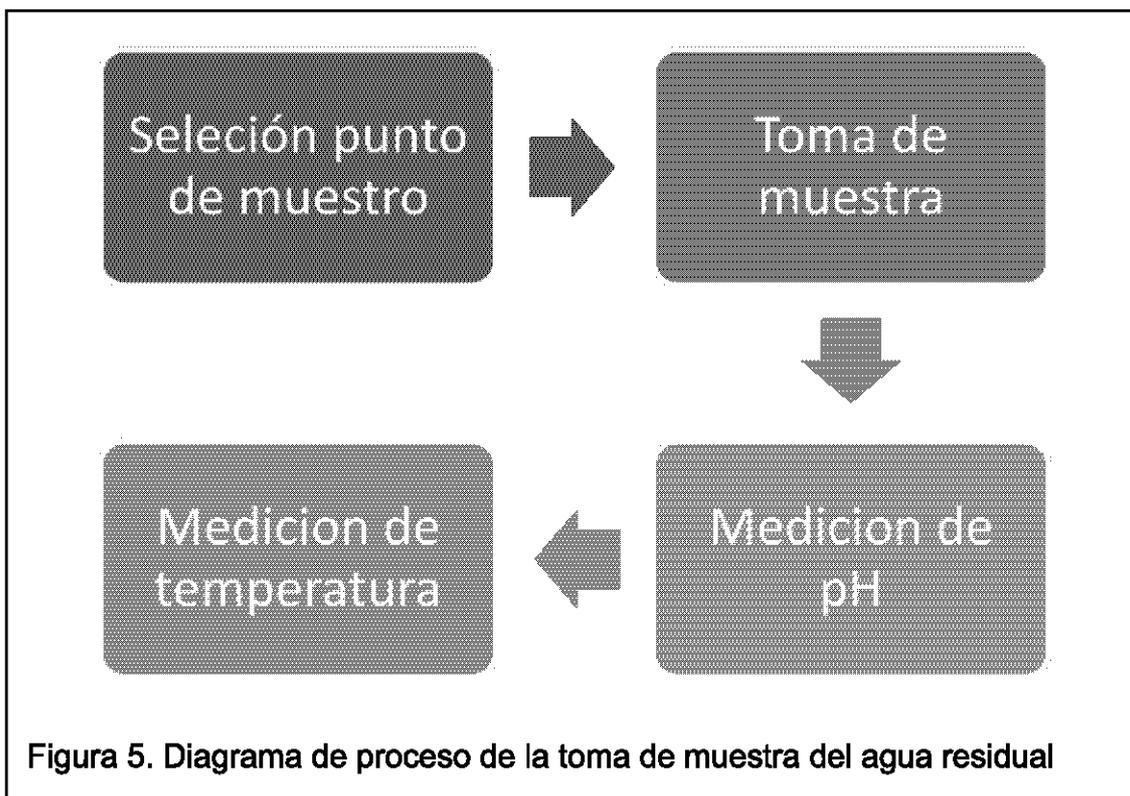
El proceso de electrocoagulación mejorara el tratamiento de las aguas residuales de la empresa Kaarú.

- Prueba de Hipótesis

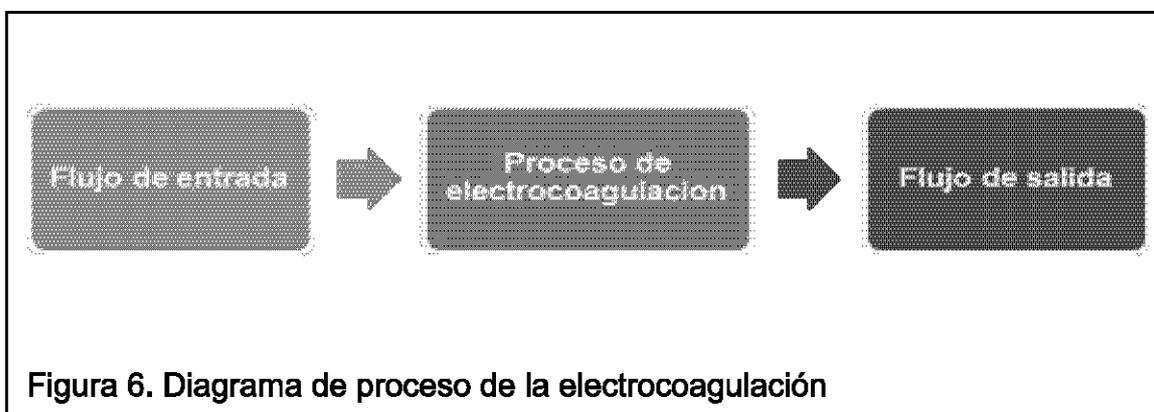
Se realizó mediante el análisis comparativo de los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual y los datos recolectados después del proceso de electrocoagulación de los indicadores escogidos para esta investigación.

3.3.7 Identificación de procesos

Muestreo del agua residual: en la figura 5, se muestra el diagrama de proceso que se llevó acabo para la toma de muestra del agua residual in situ y que después fue llevada a su almacenamiento en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental.



Electrocoagulación: Una vez que se tomó la muestra, se procedió a llenar el electrocoagulador con el agua residual, se encendió la batería y se espera el tiempo estimado en el diseño experimental para el tratamiento. Finalmente, se tomo una muestra del agua tratada y se analiza los parámetros escogidos (Figura 6).



3.3.8 Técnicas e instrumentos

Para el desarrollo de la investigación se llevó una serie de procedimientos y técnicas con el fin de obtener datos significativos tanto del agua antes de entrar al tratamiento, como de la eficiencia de la electrocoagulación.

Turbidez: se utilizó un Turbidímetro HI 88713-ISO marca Hanna Instruments, las muestras analizadas fueron del agua antes y después del tratamiento. La turbidez se expresa en unidades nefelométricas o NTU.

Se procedió a prender el equipo, se limpia las cubetas de vidrio por fuera y se llenó con 10ml de agua. Finalmente se coloca en el turbidímetro la cubeta, se presiona leer y se registra los datos obtenidos.

pH: para la muestra de agua residual analizada in situ se empleó tiras de pH, las mismas que son sumergidas en el agua residual, se espera unos segundos y después se compara con los rangos de pH que contiene la caja en el reverso.

Además, se analizó muestras de agua antes y después de ingresar al electrocoagulator, mediante la utilización del HI 2550 ph/ORP & EC/TDS/NaCl Meter HANNA Instruments.

Antes de utilizar el equipo es necesaria la calibración, de acuerdo a las especificaciones técnicas. Una vez calibrado, se lavó con agua destilada la agujeta y se coloca en la muestra por unos segundos hasta que se estabilice el equipo, finalmente se tomó el dato de lectura.

Temperatura: para tomar la temperatura del agua residual in situ, se utilizó un termómetro de mercurio.

Para las mediciones realizadas en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental, se empleó el equipo Hi 2550 ph/ORP & EC/TDS/NaCl Meter HANNA Instruments.

Aceites y Grasas: se analizó una muestra del agua residual para su caracterización, en un laboratorio certificado por la OEA, donde se aplicó el método PEAGSEN12. La muestra fue llevada en una botella de vidrio ámbar de 500ml, según las indicaciones del laboratorio.

DBO₅: la medición de este parámetro se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental-UDLA.

Se determinó la concentración de DBO de la muestra con la ayuda de un matraz aforado. Si se espera que el DBO sea alto se utiliza el matraz de 164 ml, caso contrario la de 432 ml. Posteriormente se colocó dentro de la botella winkler un agitador magnético, se llenó la botella con la cantidad de agua medida. En el tapón de caucho que contiene la botella se colocó 2 pepitas de Hidróxido de sodio.

Finalmente se tapó la botella y se encera para que se puedan grabar las mediciones diarias. La incubadora debe estar a una temperatura de 20°C, se introdujo el equipo oxitop y la botella winkler dentro de la incubadora. Las mediciones se tomaron una vez durante los cinco días.

DQO: tanto la muestra para la caracterización del agua residual como 2 muestras del mejor resultado del tratamiento se llevaron a un laboratorio certificado, donde se empleó el método PEAGSEN02 para su análisis. Las muestras fueron llevadas en botellas de vidrio ámbar de 500ml, según las indicaciones del laboratorio.

Sólidos Sedimentables: la medición de este parámetro se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental-UDLA.

Se vertió un litro del agua residual homogenizada en el cono de Imhoff. Después de 45 minutos se realizó giros alternativos del cono para acelerar el proceso de precipitación. Pasado los 60 minutos se procedió a tomar lectura del volumen que se decanta en el fondo del cono. Este método permite medir los sólidos sedimentables volumen sobre volumen, es decir ml/l.

En la figura 7, se muestra la medición de los sólidos sedimentables de las aguas residuales de la industria de yogurt



Figura 7. Medición de Sólidos sedimentables, cono Imhoff

Sólidos Suspendidos: la medición de este parámetro se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental-UDLA.

El filtro de fibra de vidrio se colocó en una caja petri y se introdujo en una estufa a 105⁰C durante 2 horas para extraer la humedad del filtro. Después del tiempo previsto se saco de la estufa, se enfrió en el desecador y se pesó en una balanza analítica, tomando el dato una vez estabilizada la balanza.

Se procedió a preparar el equipo de filtración, se conectó el matraz kitasato a la bomba de vacío y en el embudo se coloca el filtro, con la ayuda de una pipeta se hace pasar 100ml de la muestra de agua residual, hasta que se filtre todo el volumen deseado.

Una vez que se realizó este proceso se coloca el filtro nuevamente en la caja Petri y se se sometió a la estufa a 105⁰C por 2 horas, finalmente se pesó el filtro con la caja petri, siendo el peso de las materias en suspensión la diferencia entre este valor, y el peso inicial del papel seco, más la cápsula vacía.

3.4Diseño Experimental

El diseño experimental es una técnica estadística que permite identificar las causas y efectos de una investigación experimental. Mediante la manipulación de variables de entrada dentro de un proceso, con el fin de analizar los efectos producidos en las variables de respuestas.

Se utilizó para esta investigación el diseño factorial 2³. Su objetivo es analizar como influye el efecto de los tres factores sobre las variables de respuesta, y los dos niveles de prueba en cada uno de los factores. Los datos obtenidos, permitieron elegir el mejor tratamiento, que presenta efectos significativos en la variable respuesta.

En este diseño factorial 2³, se analizaron los factores: tiempo, número de placas del electrocoagulador y voltaje del sistema, con el fin de conocer el tiempo óptimo de tratamiento, además de estudiar los efectos entre el número de placas utilizadas y la fuente de energía disponible.

Este diseño genera ocho tratamientos, cada uno de los tratamientos se estudio con dos replicas. Los niveles del diseño son un nivel bajo (-1) y un nivel alto (1) de acuerdo a cada factor de la investigación.

Tabla 2. Factores de diseño, con sus dos niveles de estudio

Factores	Nivel (-1)	Nivel (1)
Tiempo	30 min	60 min
Número de Placas	6	12
Voltaje	6 voltios	12 voltios

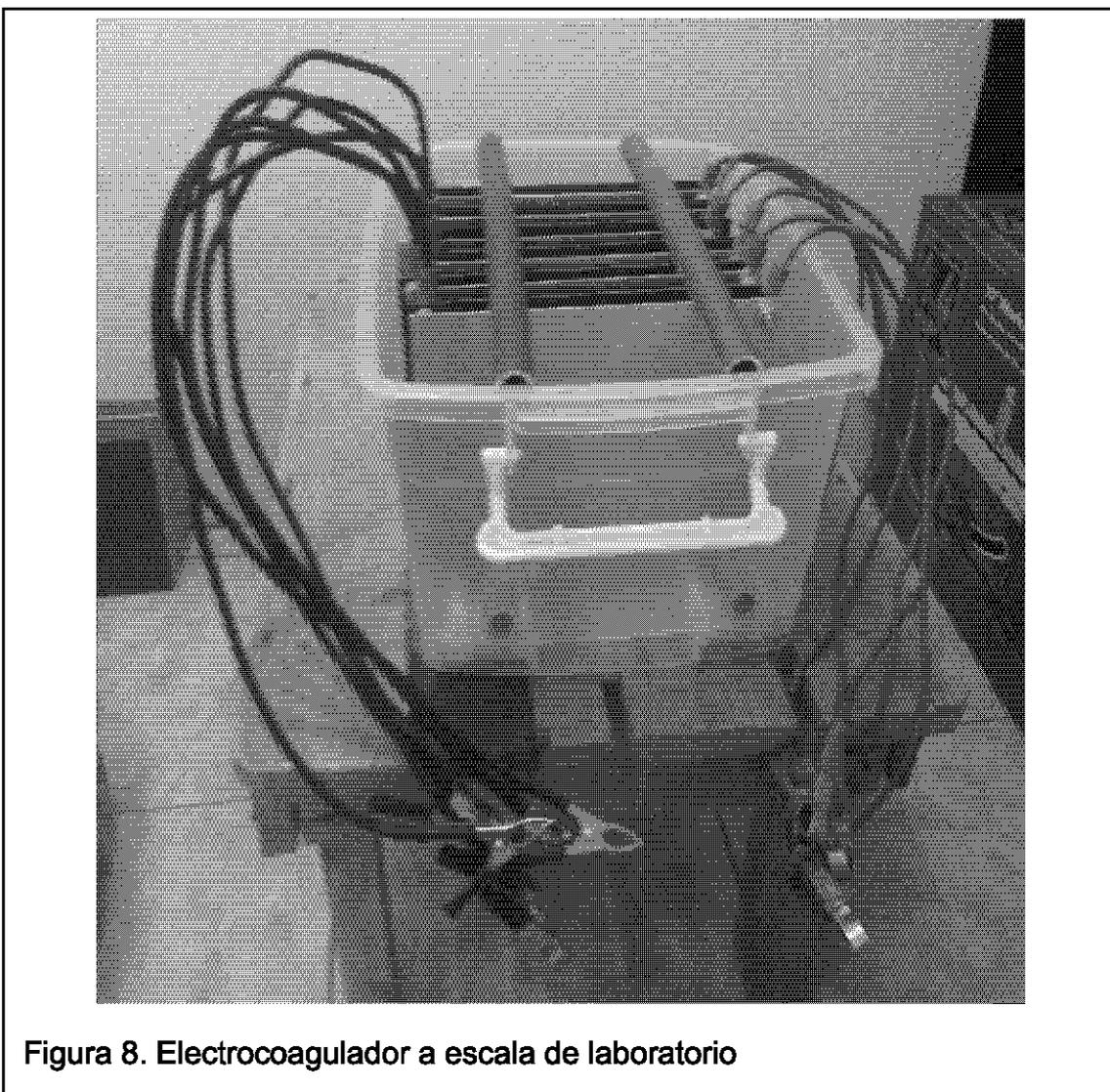
A continuación en la Tabla 3, se muestra los factores estudiados, la interacción con cada uno de sus niveles, esta información se obtuvo mediante la utilización del software Minitab 17:

Tabla 3. Tabla del diseño experimental 2^3 , con sus corridas experimentales

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Tiempo	No placas	Voltaje
1	1	1	1	-1	-1	-1
2	2	1	1	1	-1	-1
3	3	1	1	-1	1	-1
4	4	1	1	1	1	-1
5	5	1	1	-1	-1	1
6	6	1	1	1	-1	1
7	7	1	1	-1	1	1
8	8	1	1	1	1	1
9	9	1	1	-1	-1	-1
10	10	1	1	1	-1	-1
11	11	1	1	-1	1	-1
12	12	1	1	1	1	-1
13	13	1	1	-1	-1	1
14	14	1	1	1	-1	1
15	15	1	1	-1	1	1
16	16	1	1	1	1	1

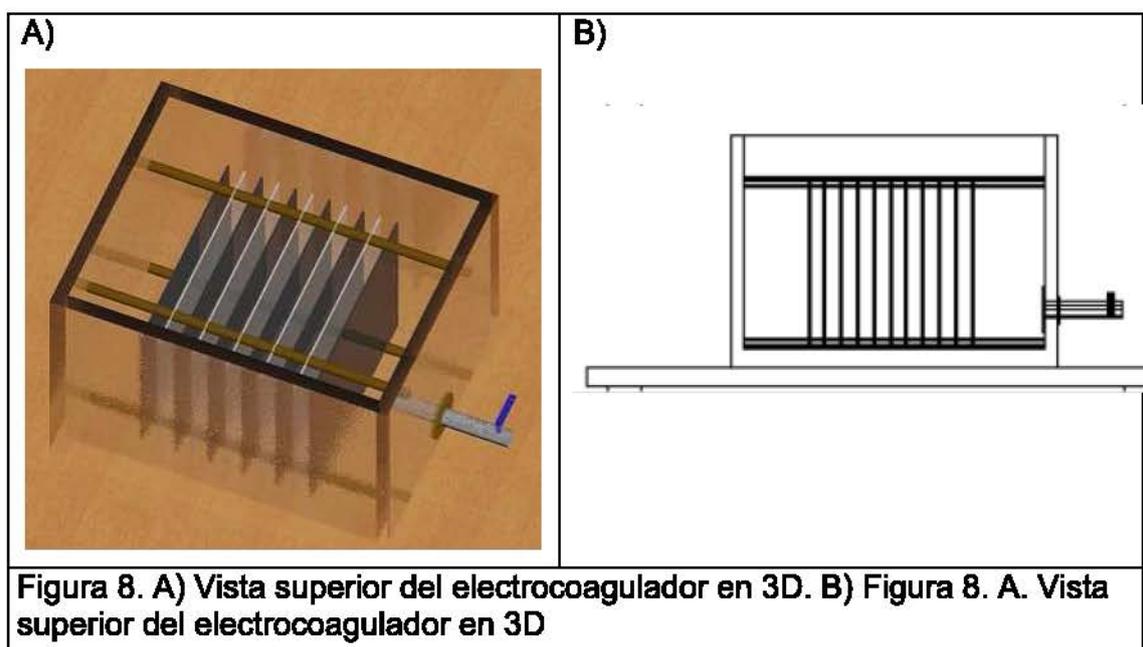
Cabe aclarar que los diferentes tratamientos llevados a cabo en el diseño experimental, fueron realizados en un electrocoagulador a escala laboratorio, donde se trataron 9 litros de agua residual.

Una vez determinado el mejor tratamiento, mediante el análisis de los resultados (Ver Capítulo 5); se procedió a la construcción del electrocoagulador a escala piloto, para el tratamiento de 33 litros de agua residual; bajo los mismo parámetros de operación utilizados en el electrocoagulador a escala laboratorio, pero con los factores con mayor significancia del diseño experimental.



3.5.1 Construcción del electrocoagulador a escala piloto

Para la construcción del reactor de electrocoagulación a escala piloto se priorizó el uso de materiales existentes en el mercado y de bajo costo.



El electrocoagulador opera como un reactor tipo Batch, en donde se encuentran dispuestas 12 placas, las mismas que se colocan paralelamente gracias a tubos de plástico que poseen unas hendiduras en donde entran las placas. En la parte frontal se instaló una llave de bola que permite el paso del agua tratada.

El material del cuerpo del reactor es de plástico con capacidad para tratar los 33L propuestos para la investigación. Las medidas son: 54.1 cm de ancho, 40.5 cm. de longitud y 31.4 cm. de altura.

Los electrodos que se utilizaron para la investigación son de aluminio y hierro no galvanizado. Las placas de aluminio están conectadas al ánodo y las placas de hierro al cátodo, son de forma rectangular y se encuentran intercaladas. Las

dimensiones de los electrodos son en base al tamaño del cuerpo del reactor; con una altura de 25 cm., ancho de 30 cm. y con un espesor de 3 mm.

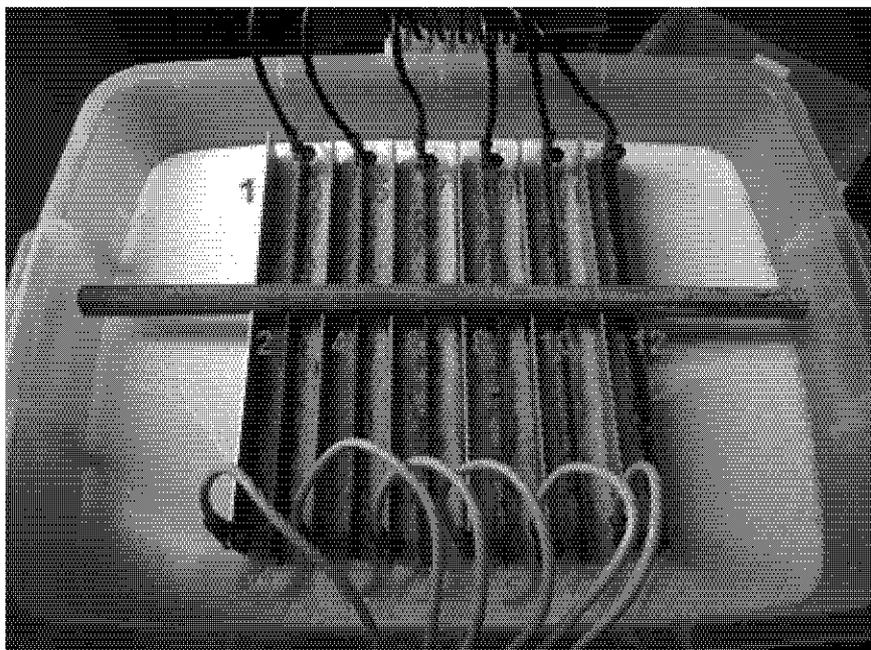


Figura 9. Número de placas y conexiones del ánodo y cátodo.

Se realizó un experimento previo, para la verificación de la distancia entre electrodos. El mismo que consistió en probar a diferentes distancias entre dos placas (aluminio y hierro). Se realizaron cuatro pruebas, las distancias experimentadas fueron: 29.5, 14.5, 7.00 y 3.00 cm. La distancia final que se utilizó entre los electrodos es de 2.5 cm.

El cargador de batería se conectó a las placas mediante alambre No. 10. El extremo conectado a las placas se lo hizo por medio de tornillos y terminales de ojo; en el otro extremo se conectó caimanes de color rojo y negro, para diferenciar los polos positivos y negativos y se los conectó a los caimanes que posee el cargador.

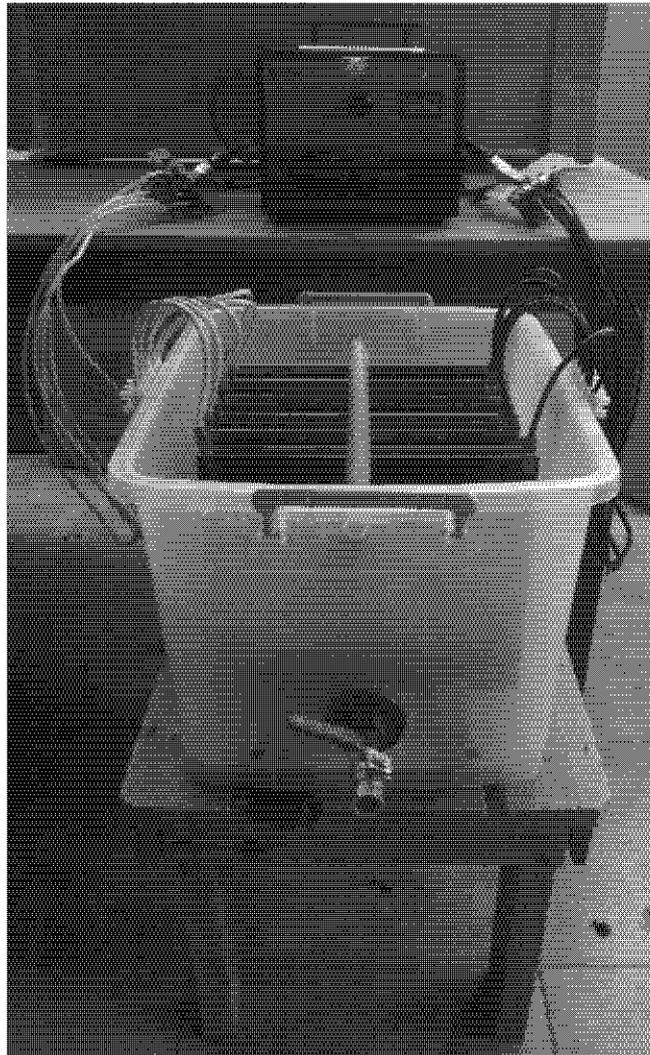
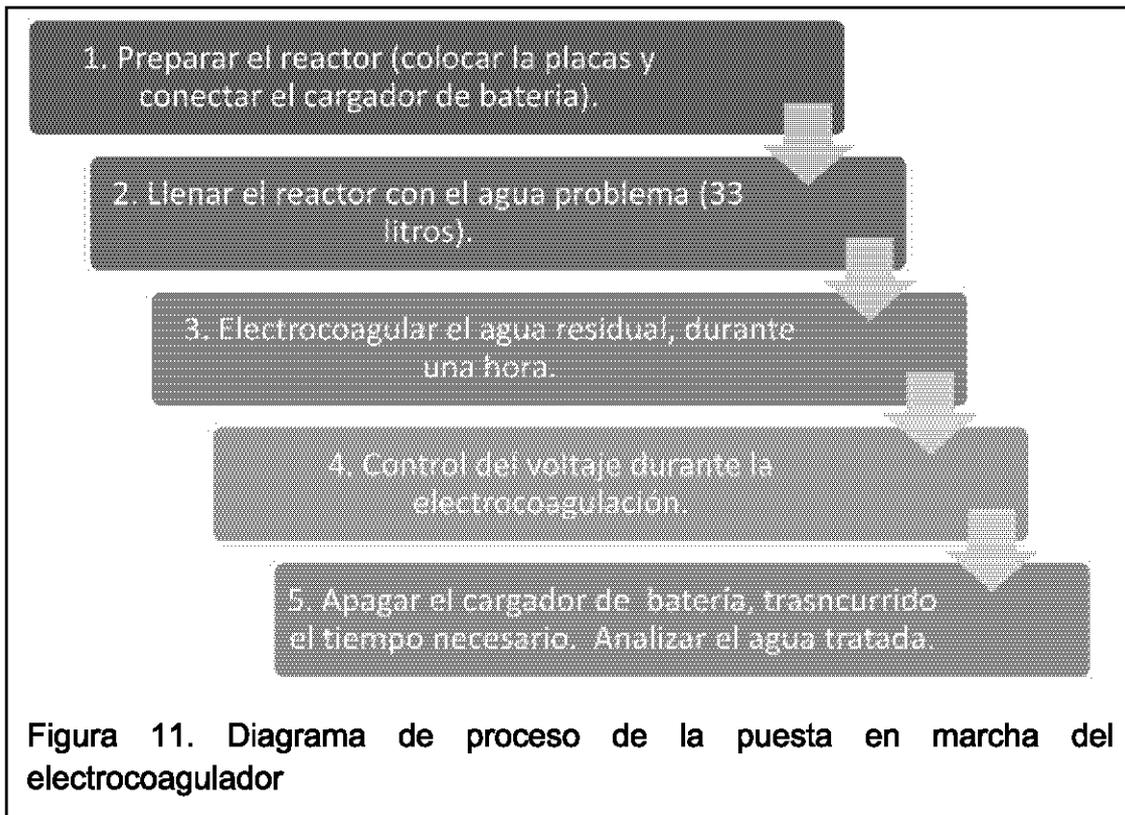


Figura 10. Cargador de batería y electrocoagulador

3.5.2 Puesta en marcha del proceso de electrocoagulación

Una vez construido el reactor de electrocoagulación, se llevó acabo la serie de ensayos de acuerdo al diseño experimental propuesto. En el siguiente diagrama se muestra el proceso desde la entrada del agua residual al reactor hasta la salida del agua tratada (Figura 11).



Las corridas experimentales se realizaron en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Primero se preparó el reactor de electrocoagulación, se colocaron las placas de aluminio y hierro; conectándolos a los polos positivos y negativos de la batería respectivamente. El número de placas colocadas depende del tratamiento a probar. Se ajustó en la batería el voltaje de acuerdo a las condiciones del ensayo.

Se llenó el electrocoagulador con el agua residual, con un volumen de 33 litros; se tomó una muestra del agua problema y se analizó pH, temperatura y turbidez. Se prendió la batería y se esperó de 30 a 60 minutos de acuerdo a la corrida del diseño, hasta que el tratamiento finalizará.

Una vez transcurrido el tiempo de espera, se apagó la batería y se desconectaron los polos de las placas. Se tomó una muestra del agua tratada y se analizó pH, temperatura y turbidez. Las placas después de cada tratamiento se lavaron con agua y jabón. Finalizadas las corridas plantadas en el diseño, se comparó los resultados de turbidez y el mejor tratamiento se replicó 3 veces para poder realizar un análisis comparativo de los resultados.

4. Resultados

4.1 Caracterización del agua residual

En las figuras se puede observar los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual. Las características medidas in situ fueron pH y temperatura, se observan en la figura 12.

Los resultados obtenidos de sólidos suspendidos y sedimentables se encuentran en la Figura 13.

Las características como aceites y grasas, DBO₅ y DQO, se muestran en la figura 14.

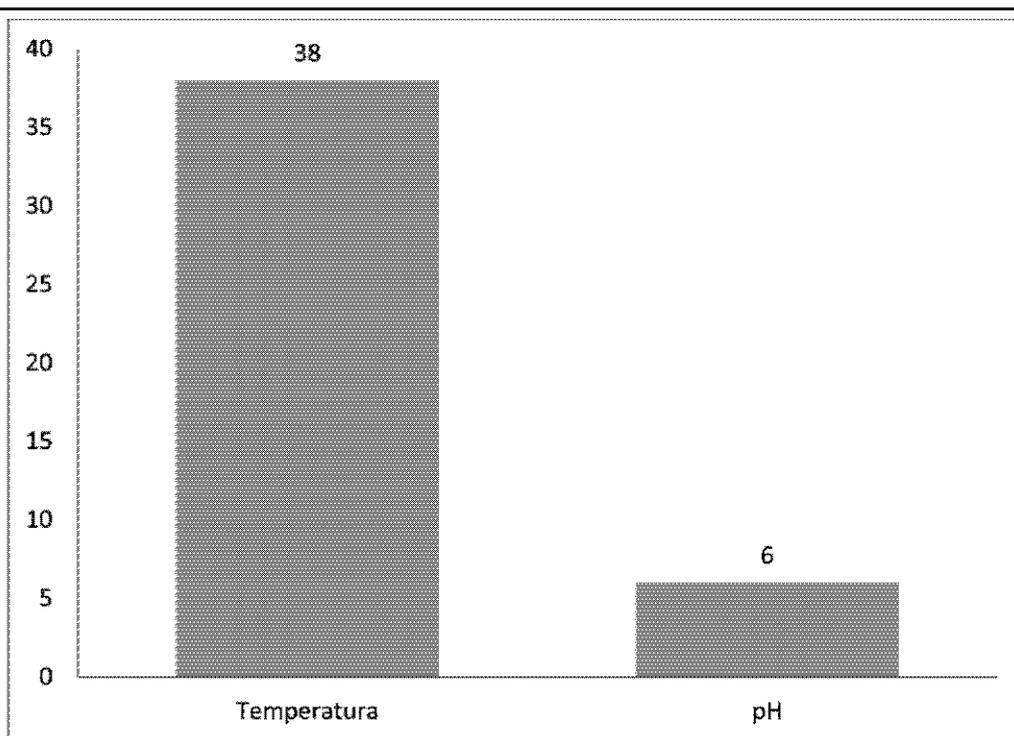
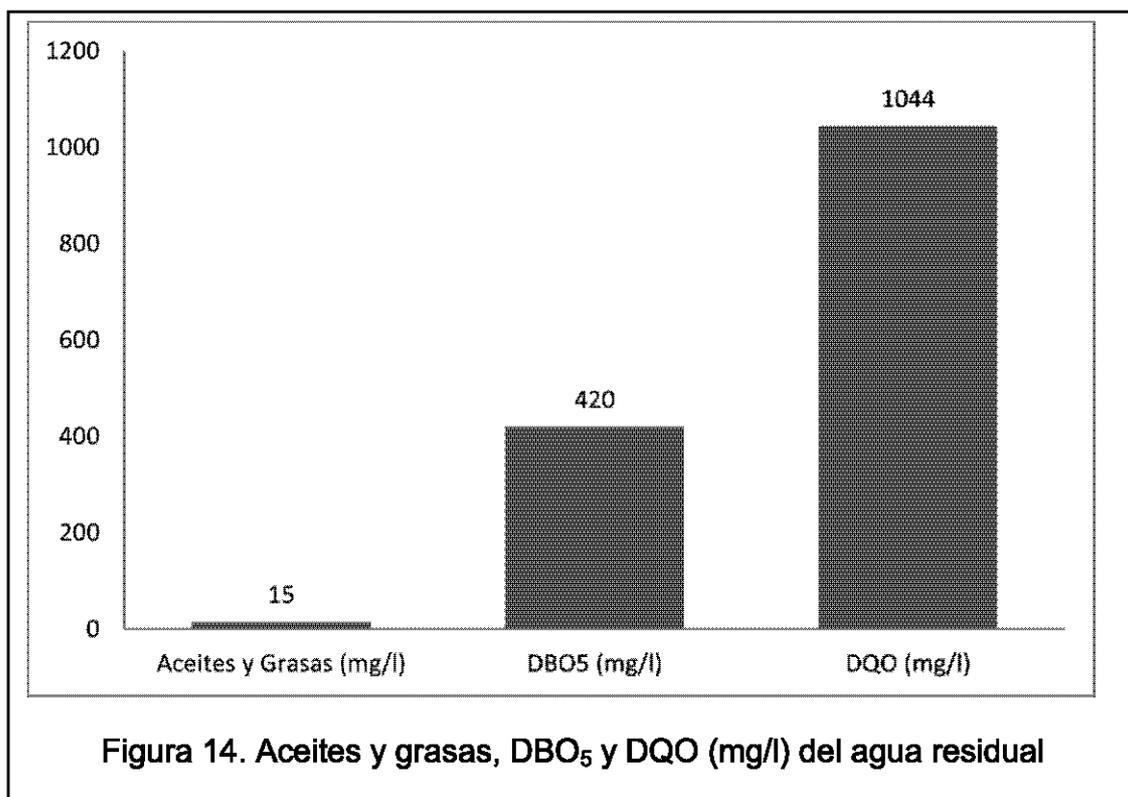
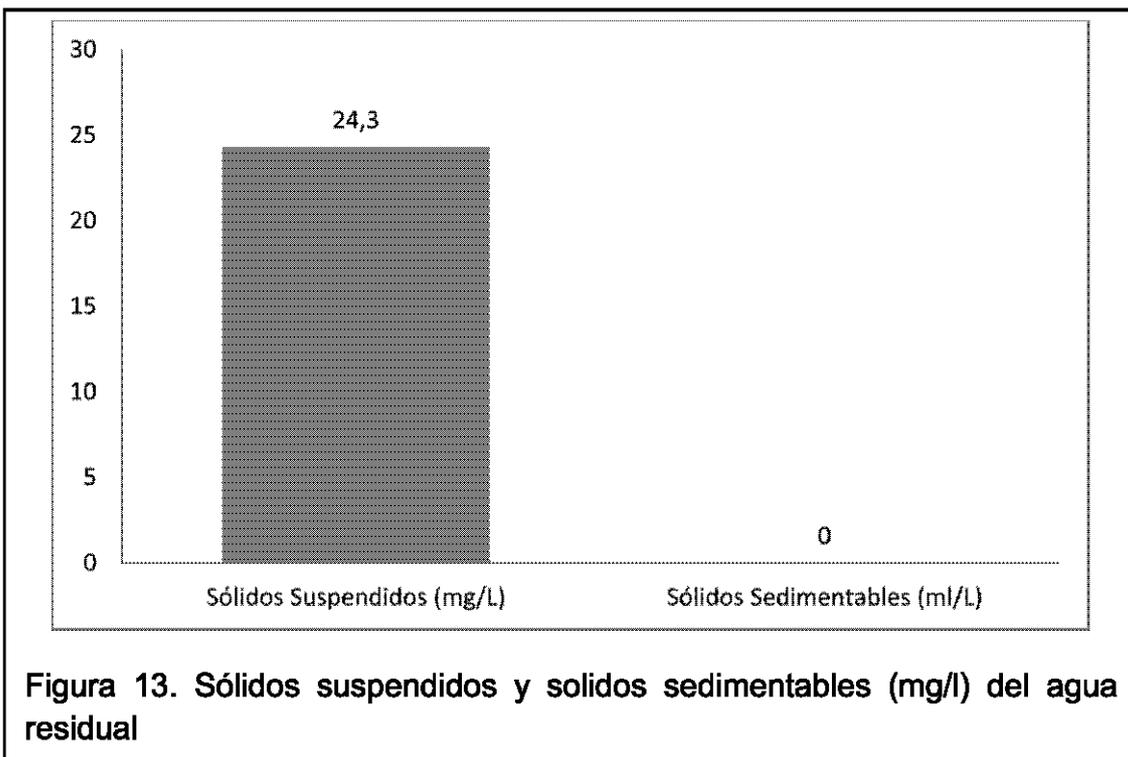


Figura 12. Temperatura (°C) y pH del agua residual, medidos in situ

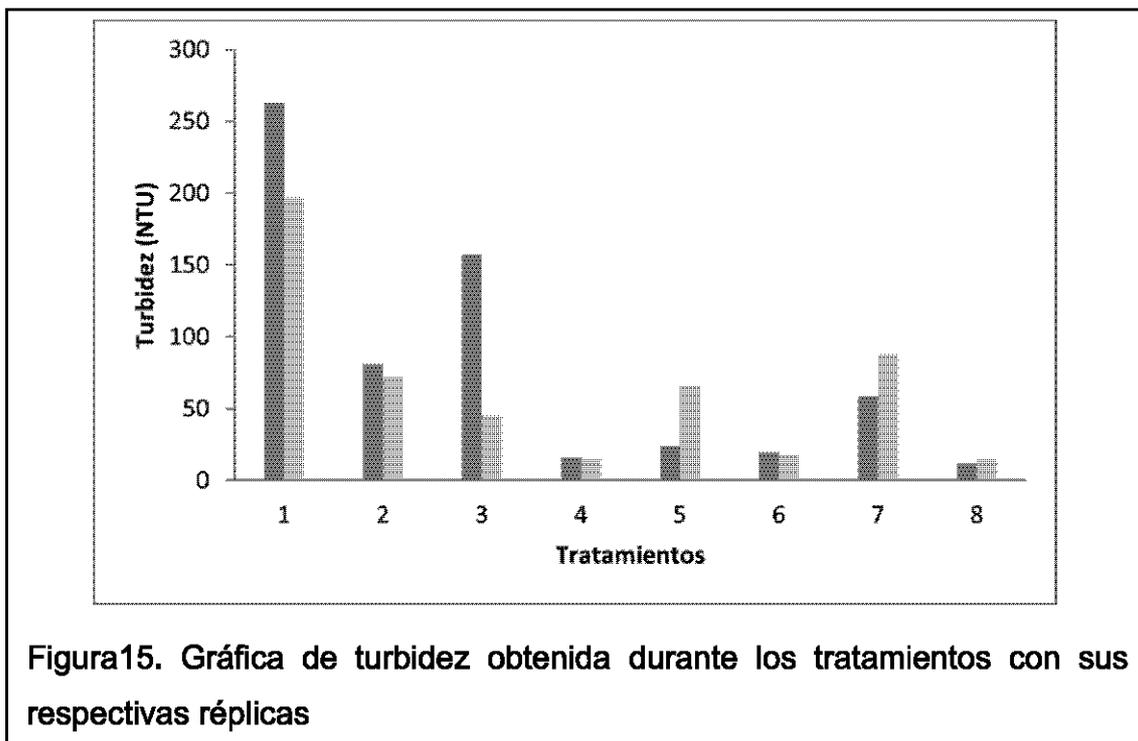


4.2 Efecto de la variación del voltaje, tiempo de reacción y número de placas en la turbidez

Los tratamientos del diseño experimental se llevaron a cabo en un electrocoagulador a escala laboratorio, con capacidad para 9 litros de agua residual.

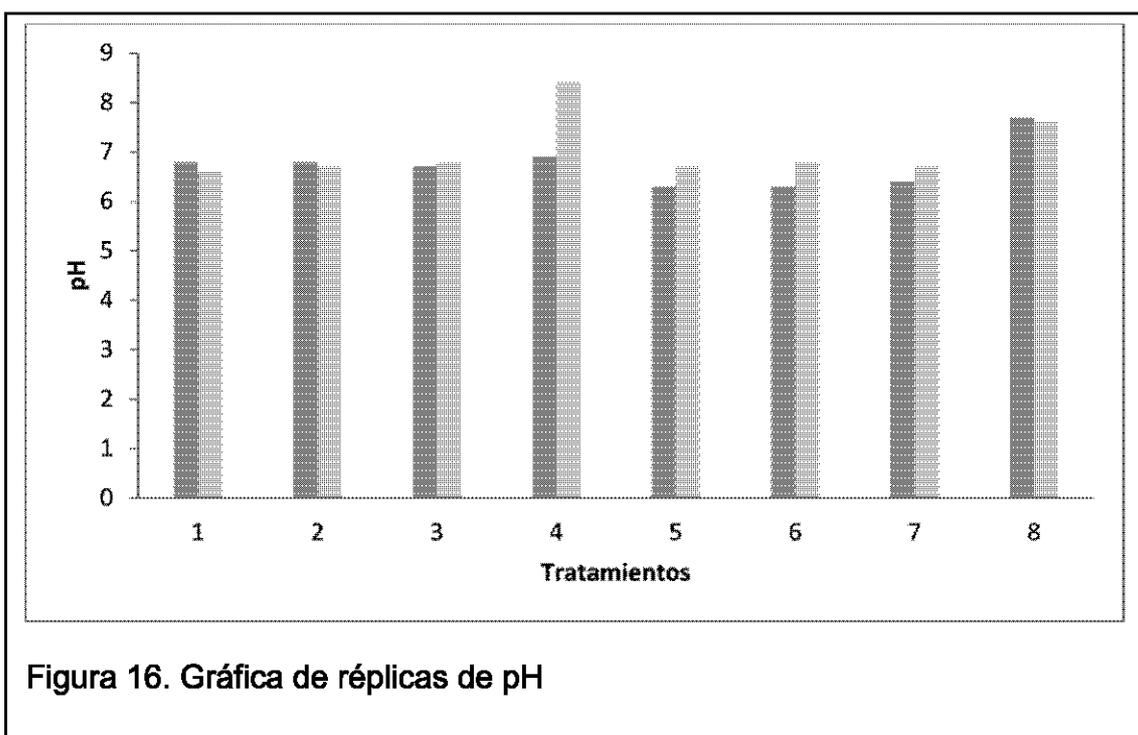
Tabla 4. Resultados de los tratamientos de diseño experimental, para la variable de respuesta turbidez

Tratamiento	Réplica	Volumen a tratar (L)	Factores de diseño			Variable de Respuesta
			Tiempo de reacción (min)	Voltaje (voltios)	No de placas	Turbidez (NTU)
1	1	9	30	6	6	263
	2	9	30	6	6	297
2	1	9	60	6	6	80.7
	2	9	60	6	6	72.5
3	1	9	30	12	6	157
	2	9	30	12	6	45.3
4	1	9	60	12	6	16
	2	9	60	12	6	15.3
5	1	9	30	6	12	23.7
	2	9	30	6	12	65.1
6	1	9	60	6	12	19.3
	2	9	60	6	12	17.9
7	1	9	30	12	12	58.8
	2	9	30	12	12	88.1
8	1	9	60	12	12	11.7
	2	9	60	12	12	15.2



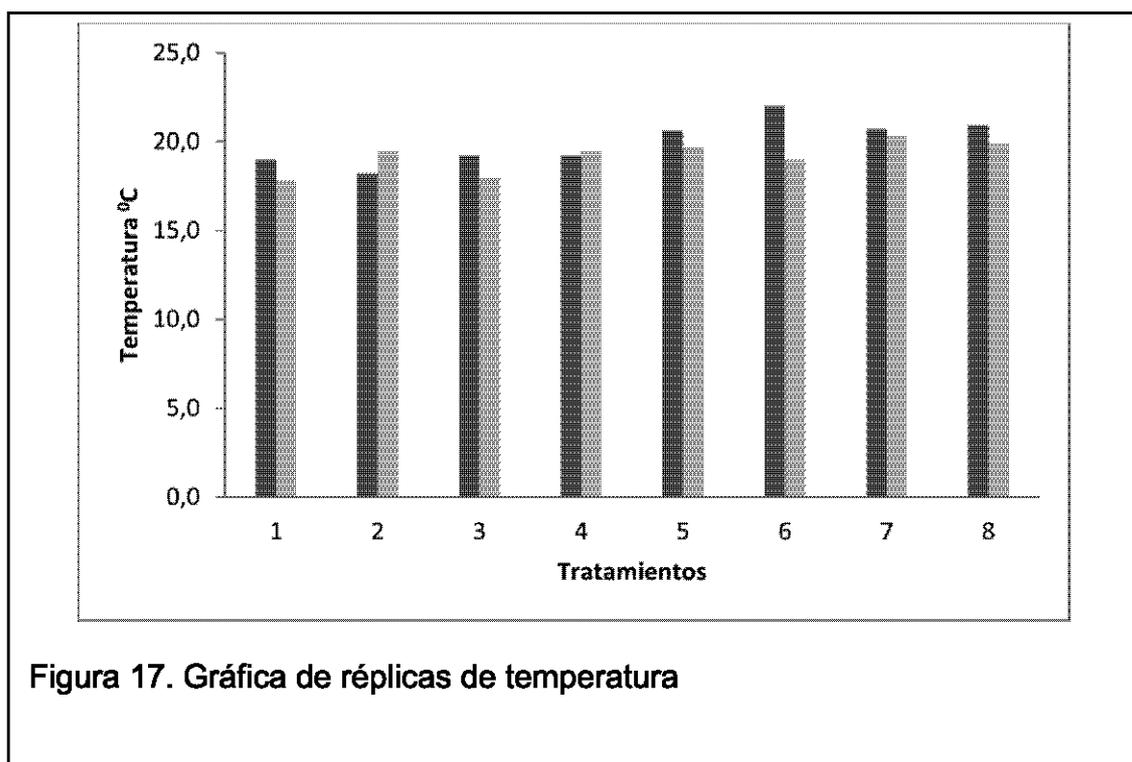
4.3 Efecto de la variación de parámetros operacionales en función del pH

El histograma de la Figura 16, nos indica los datos obtenidos en los diferentes tratamientos del diseño factorial 2^3 .



4.4 Efecto de la variación de parámetros operacionales en función de la temperatura

La figura 17, presenta los resultados de temperatura en grados centígrados de las corridas experimentales con sus respectivas réplicas.



4.5 Resultados mejor tratamiento de electrocoagulación a escala piloto.

Después de realizar todas las corridas correspondientes al diseño experimental factorial 2^3 , se procedió a elegir el mejor tratamiento basado en los resultados de menor turbidez. Además se muestra las figuras de los mejores resultados obtenidos en los tratamientos de DBO_5 , DQO y SS.

- Resultados del mejor tratamiento, replicado a escala piloto

Tabla 5. Resultados del mejor tratamiento del diseño experimental.

Tratamiento	Réplica	Volumen a tratar (L)	Factores de diseño			Variable de Respuesta
			Tiempo de reacción (min)	Voltaje	No de placas	Turbidez (NTU)
8	1	33	60	12	12	22.6
	2	33	60	12	12	17.6
	3	33	60	12	12	19.7

En la Figura 18, se observa el dato inicial de turbidez y los resultados del tratamiento en sus 3 réplicas.

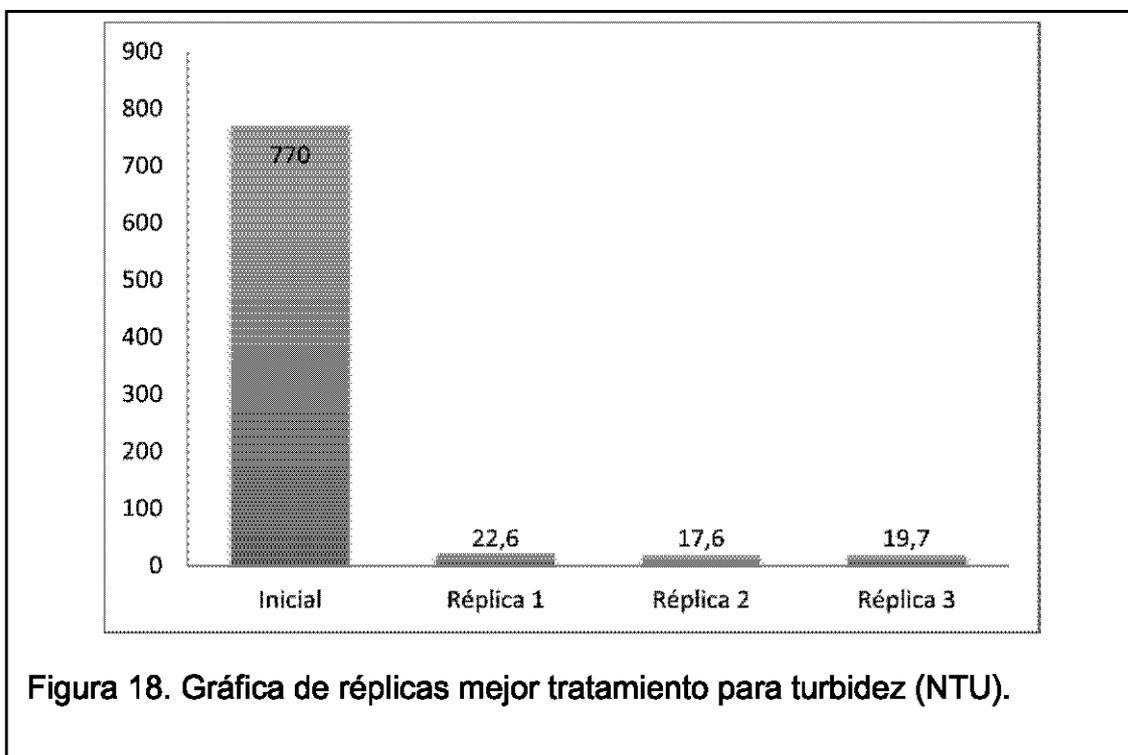


Figura 18. Gráfica de réplicas mejor tratamiento para turbidez (NTU).

Los datos finales de pH se muestran en la Figura 19, con el dato inicial del agua residual para su comparación.

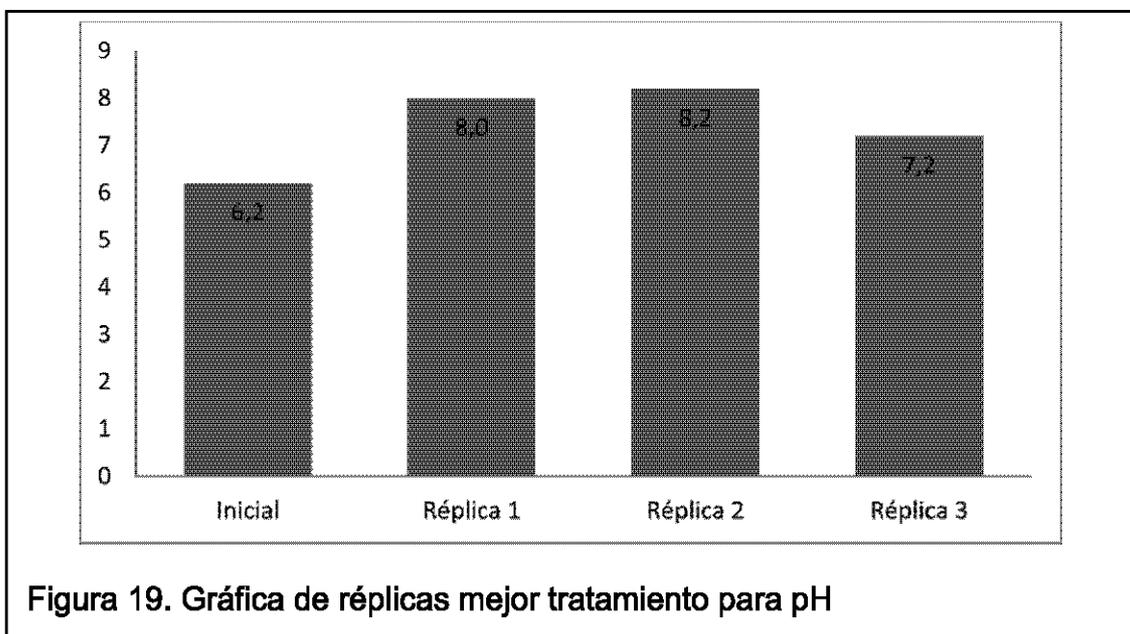


Figura 19. Gráfica de réplicas mejor tratamiento para pH

El histograma de la Figura 20, presenta los datos de temperatura inicial y los resultados obtenidos después del tratamiento.

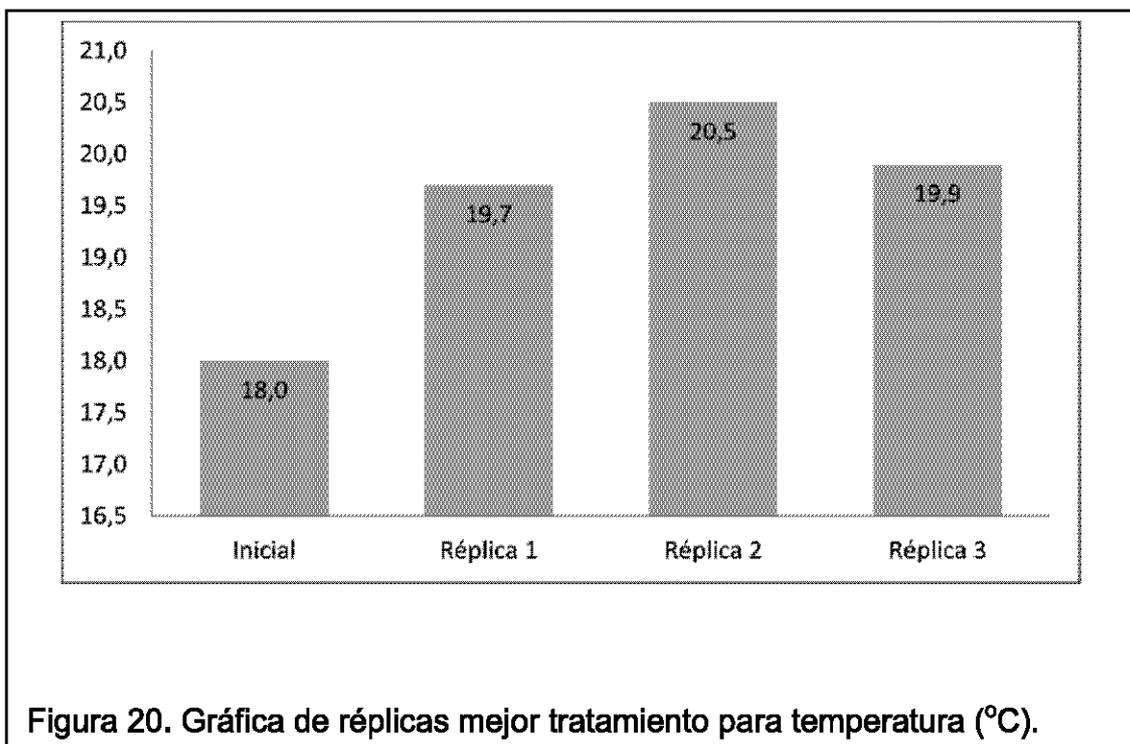


Figura 20. Gráfica de réplicas mejor tratamiento para temperatura (°C).

A continuación se muestra en las figuras 21, 22 y 23 los mejores resultados obtenidos en los tratamientos de DBO₅, DQO y SS, comparados con el dato inicial del agua residual.

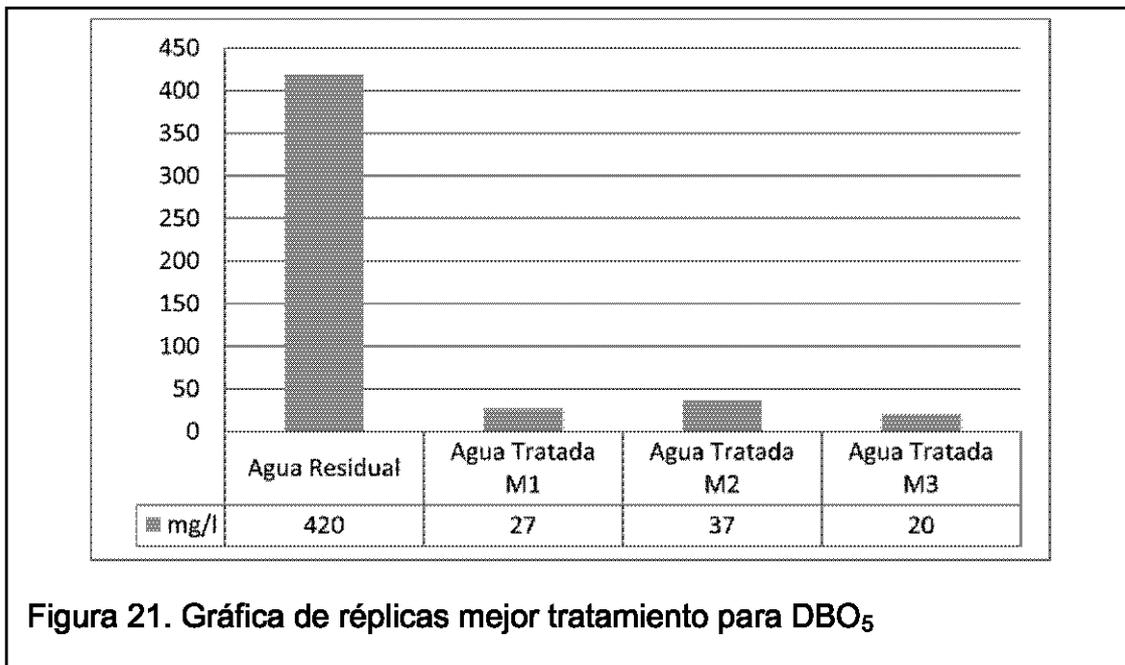


Figura 21. Gráfica de réplicas mejor tratamiento para DBO₅

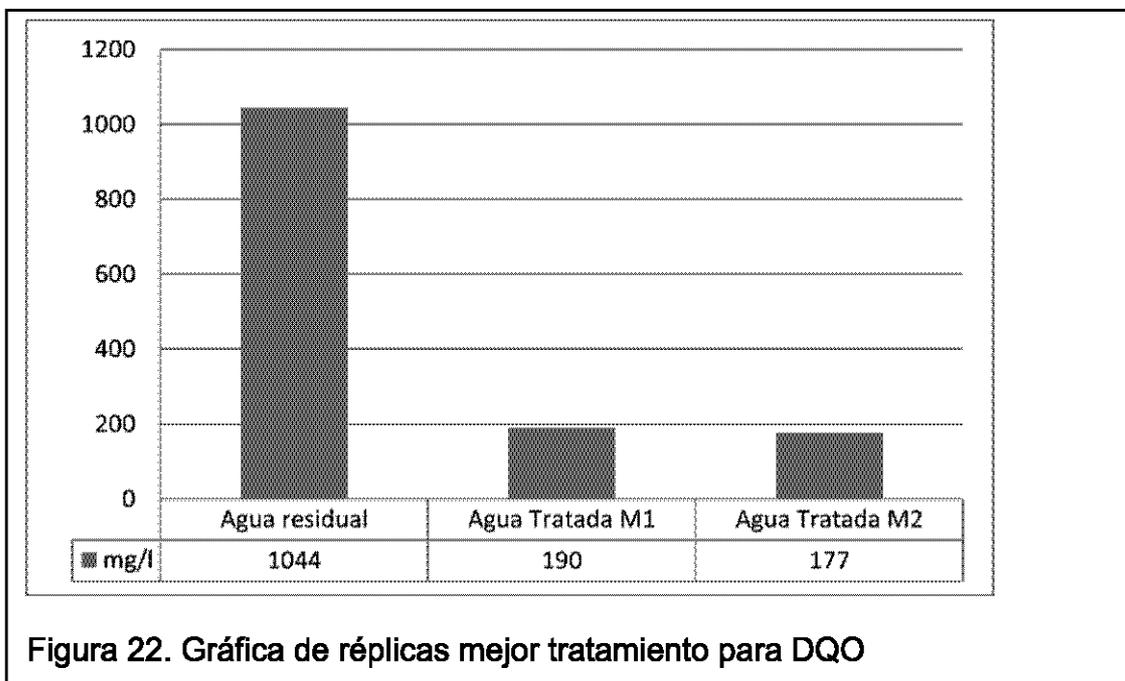
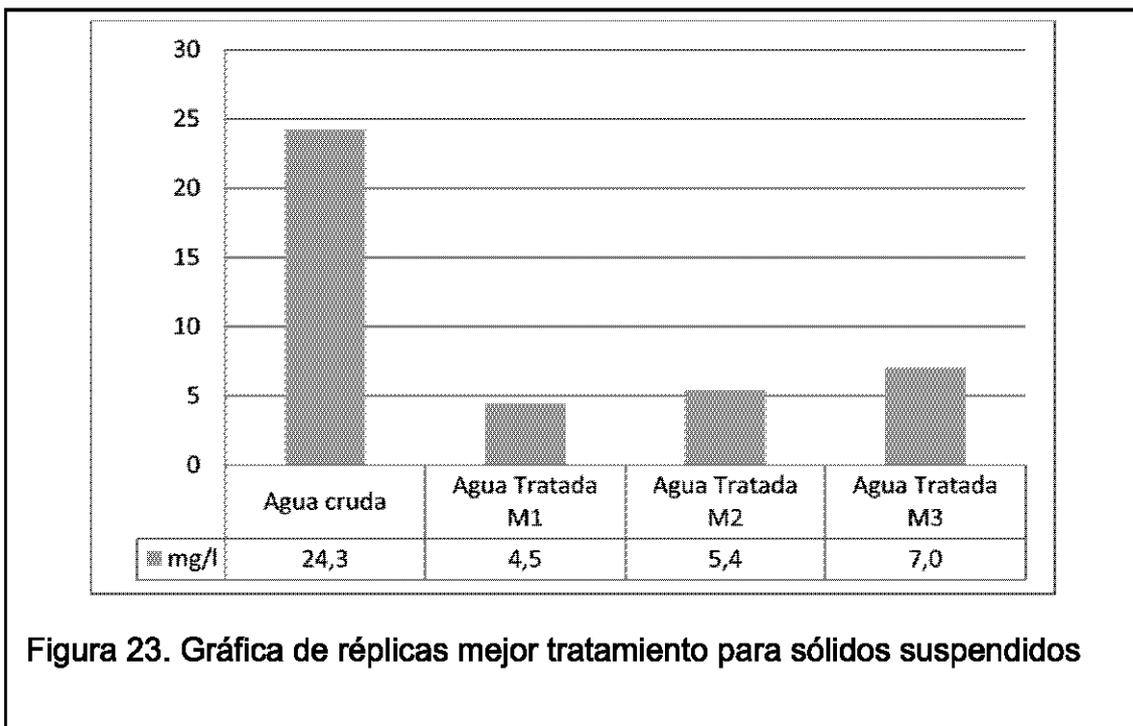


Figura 22. Gráfica de réplicas mejor tratamiento para DQO



En la figura 24 se muestra dos vasos de precipitación, el uno contiene el agua residual producto de la elaboración de yogurt y la segunda el agua tratada después de haber sido sometida a la electrocoagulación:



5. Análisis de resultados

5.1 Sobre la calidad del agua residual

Los parámetros analizados del agua residual previo al tratamiento de electrocoagulación nos permiten determinar las características del agua de estudio y los lineamientos para la reducción de los contaminantes. Así como los parámetros de operación del sistema de tratamiento propuesto.

La materia orgánica que se encuentra constituyendo las aguas residuales de la industria de yogurt pertenece a sustancias orgánicas (grasas, proteínas, aminoácidos y lactosa) que forman parte de la composición de la leche empleada en el proceso de producción de yogurt. Estas sustancias orgánicas permiten la presencia de DBO_5 en las aguas residuales (Arango y Garcés, 2008, pp. 180-182).

Este tipo de industria se caracteriza por la utilización de sustancias limpiadoras y detergentes, especialmente tensoactivos y sosa caustica, en sus procesos de lavado, los mismos que producen la presencia de DQO en las aguas residuales.

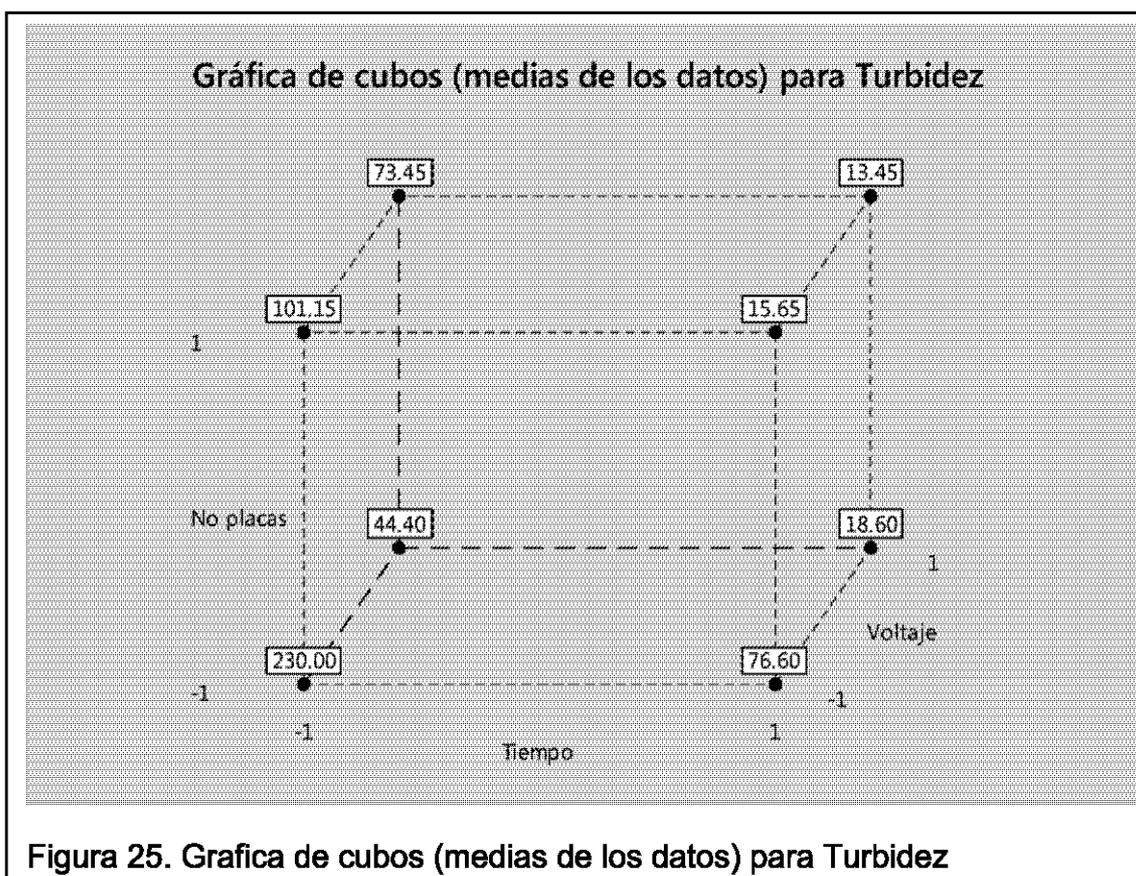
Para estos procesos de lavado se requiere de agua caliente, que al contacto con la sosa caustica de los detergentes, presenta una propiedad emulsionante y que permite la disolución de la grasa de la leche con el agua (Laval, 2003, p.17). Por esta razón al analizar los solidos sedimentables se obtuvo como resultado 0 ml/l, ya que las grasas procedentes de la leche se encuentran emulsionadas con el agua.

La caracterización del agua residual dio como resultado un DBO_5 de 420 mg/l y un DQO de 1044 mg/l, cuando el límite permitido en la ordenanza 213 de la ciudad de Quito tiene un DBO_5 de 120 mg/l y 240 mg/l para el DQO; demostrando que la industria en estudio excede los límites estipulados.

Las aguas residuales de la industria láctea tienden a volverse ácidas, gracias a la fermentación del azúcar de la leche, ya que se transforma en ácido lácteo. La lactosa hace que el agua residual pase a ácida, cuando estas se encuentran sin oxígeno, por esta razón el agua residual de la industria Kaarú presenta un pH 6 (Nemerow et al., 2009, pp. 445-446).

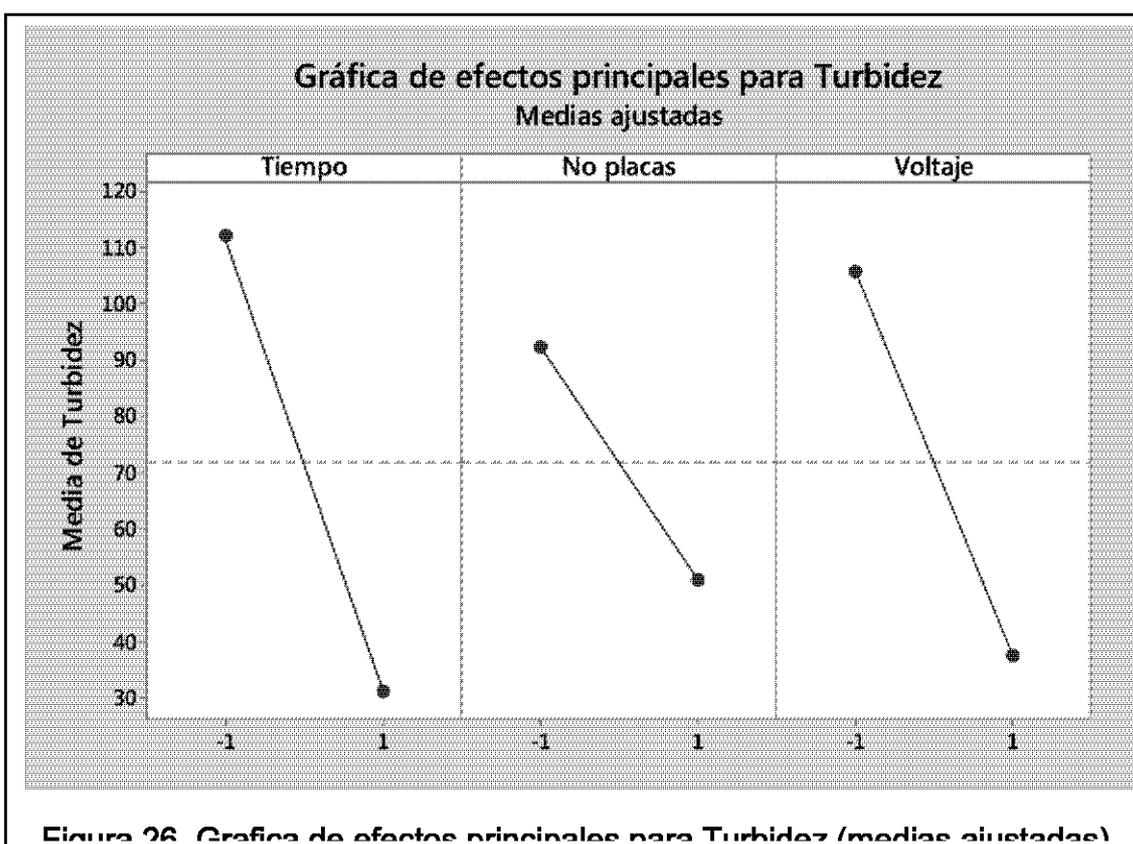
5.2 Efectos de los parámetros de estudio en función de la variable de respuesta

Para el presente estudio se tomó como base tres factores de operación: tiempo de reacción, número de placas y voltaje; con dos niveles cada uno. Para el análisis del diseño se utilizó el programa MINITAB 17, teniendo como variable de respuesta la disminución de la turbidez del agua tratada, tomando como referencia la turbidez del agua residual.



En la figura 25, se observa que el tiempo de reacción y el voltaje interactúan afectando la respuesta de turbidez. El mejor resultado para la disminución de turbidez se encuentra en la parte superior derecha del cubo, es decir, que la relación entre el número de placas, el tiempo de reacción y el voltaje en su nivel alto (1) respectivamente, permiten una disminución de 13.45 NTU. Otro dato significativo es la turbidez de 15.65 NTU, en donde interactúan el tiempo de reacción es su nivel alto (1), el voltaje en su nivel bajo (1) y el número de placas en el nivel alto (1).

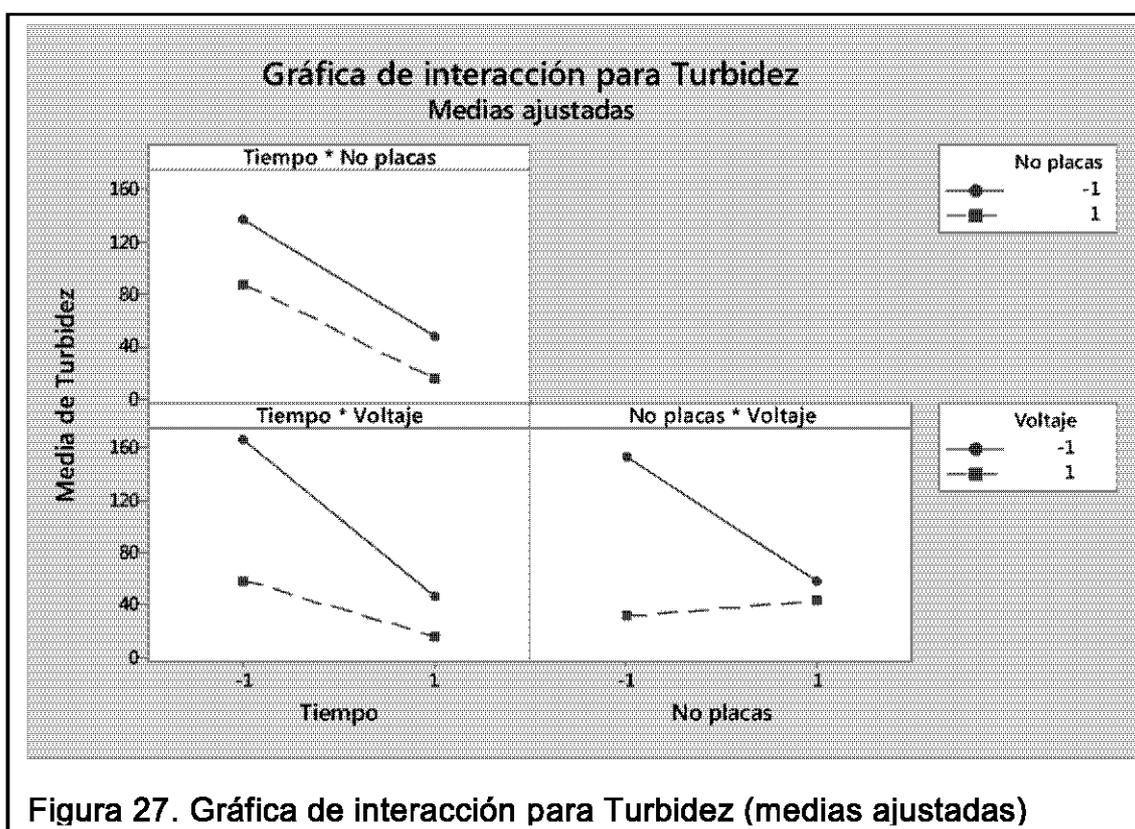
Sin embargo, a continuación se analizarán en mayor detalle la veracidad de este primer análisis.



La figura 26, indica que tanto el tiempo de reacción y el voltaje tienen efectos similares sobre la turbidez, ya que ambos factores presentan similitud en su pendiente al estar más inclinadas. La disminución en la turbidez para estos dos factores se da cuando pasan de su nivel bajo al nivel alto afectando directamente la variable de respuesta. La pendiente para el número de placas no es tan representativa como la de los otros dos

factores tanto para el nivel bajo como para el alto; sin embargo, se observa que existe una mejor respuesta en la variable al estar en el nivel mas alto del factor.

Se puede concluir que la saturación de cargas positivas que impediría la aglomeración de los coloidales y la precipitación de los sedimentos. La saturación de cargas negativas, al contrario generaría el aumento de sólidos de gran tamaño incapaces de precipitar.



En la figura 27, se muestra a cada uno de los tres factores y su interacción entre ellos. El mejor resultado de disminución de turbidez entre el tiempo de reacción y el número de placas, se da siempre que el tiempo está en su nivel alto, pero el número de placas en el nivel alto y bajo al ser paralelos no representa una interacción significativa al pasar de un nivel a otro.

Entre el tiempo de reacción y el voltaje se observa que existe un efecto significativo en la disminución de la turbidez cuando los dos factores

interactúan pasando del nivel bajo al alto, presentando mejores resultados en el nivel alto tanto para el tiempo como para el voltaje.

En la relación entre el número de placas y el voltaje, se muestra que cuando el número de placas se encuentra en su nivel alto y bajo, el voltaje no afecta de manera significativa a la variable de respuesta. Sin embargo, cuando el voltaje esta en su nivel alto afecta directamente sobre la turbidez.

El proceso se da gracias al desprendimiento de los iones de aluminio, con carga positiva, que desestabilizan las cargas negativas de los coloidales, permitiendo la aglomeración de los solidos en suspensión, afectando directamente con la turbidez del agua tratada.

El aumento del tiempo de reacción permite una mayor formación del hidróxido del metal, que promueve la remoción de los sólidos coloidales y de DQO. Por medio de la formación de flóculos que pueden precipitar fácilmente (Karichappan, Venkatachalam y Jeganathan, 2014, p. 7-8).

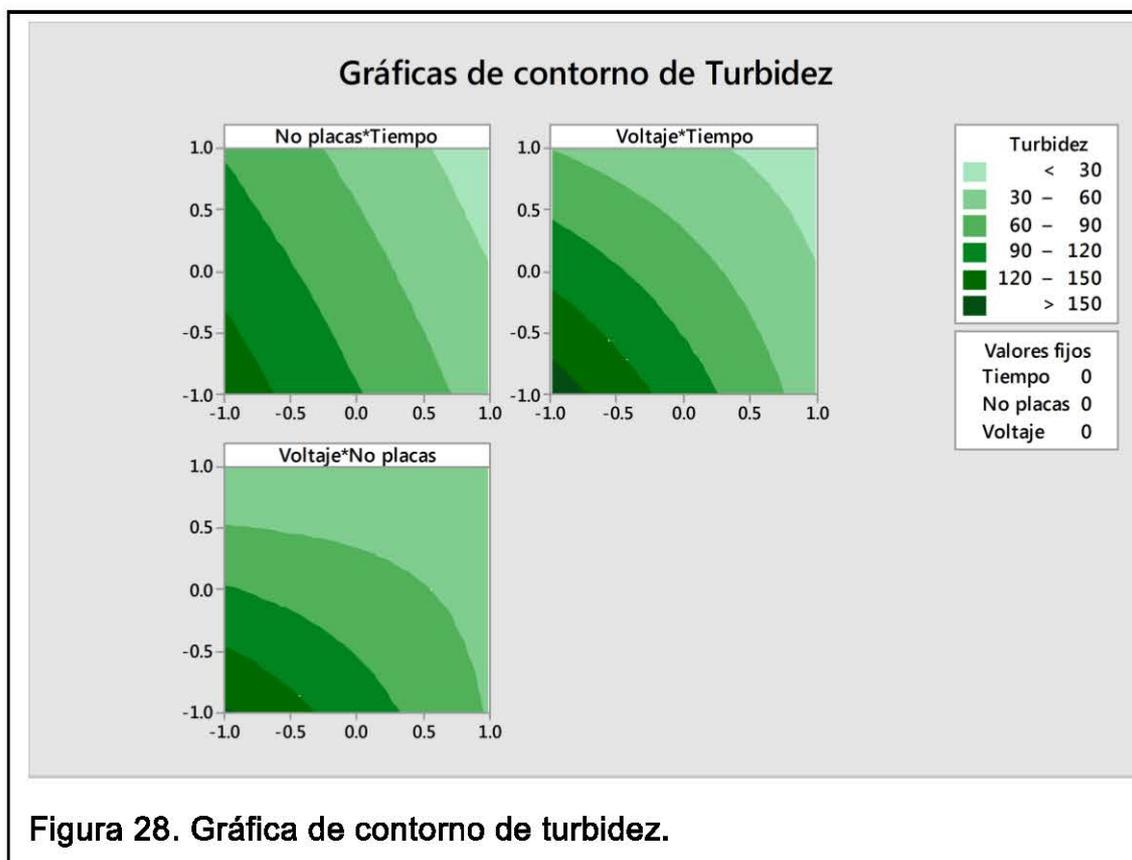


Figura 28. Gráfica de contorno de turbidez.

Como se observa en la figura 28, la gráfica de contorno nos permite apreciar que los mejores resultados en la disminución de turbidez se da cuando los tres factores se encuentran en su nivel alto.

La interacción entre el número de placas y el tiempo; así como entre el voltaje y tiempo se encuentran en parte superior derecha, donde se aprecia que para estos factores el nivel alto (1) influye sobre la variable.

La interacción entre el voltaje y el número de placas es la que presenta resultados óptimos para la disminución de la turbidez, cuando están ya sea en su nivel bajo o en su nivel alto.

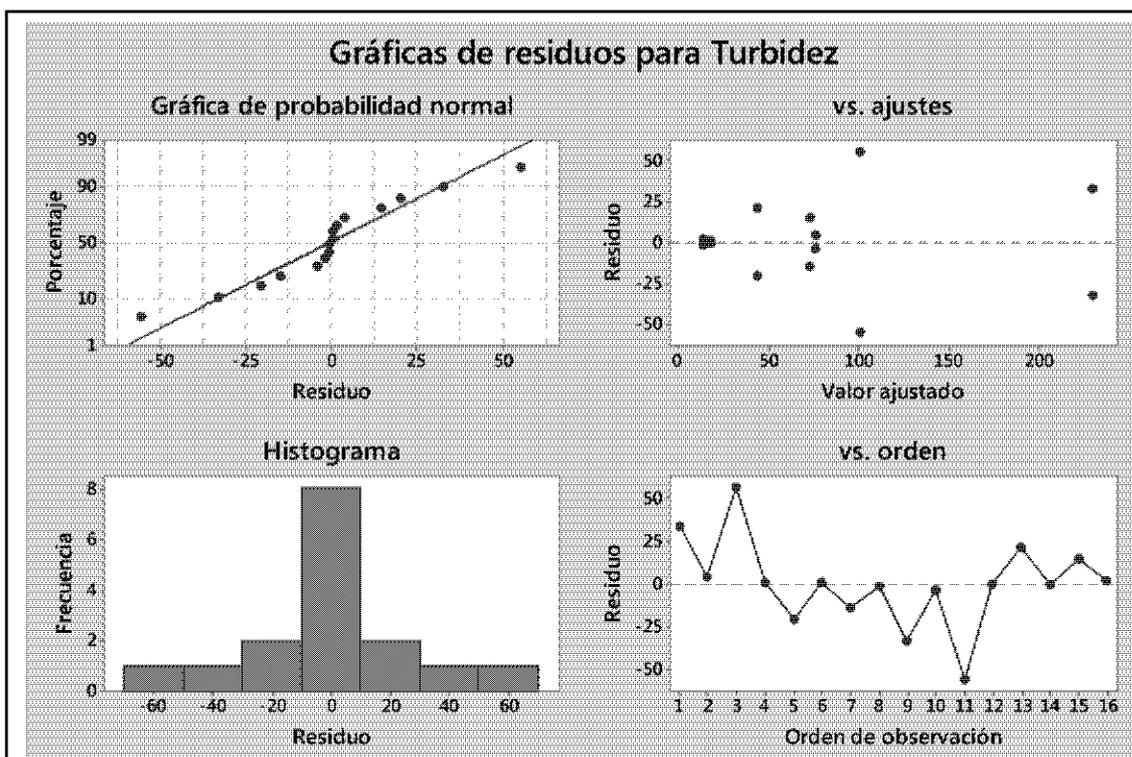


Figura 29. Gráfica de residuos para turbidez.

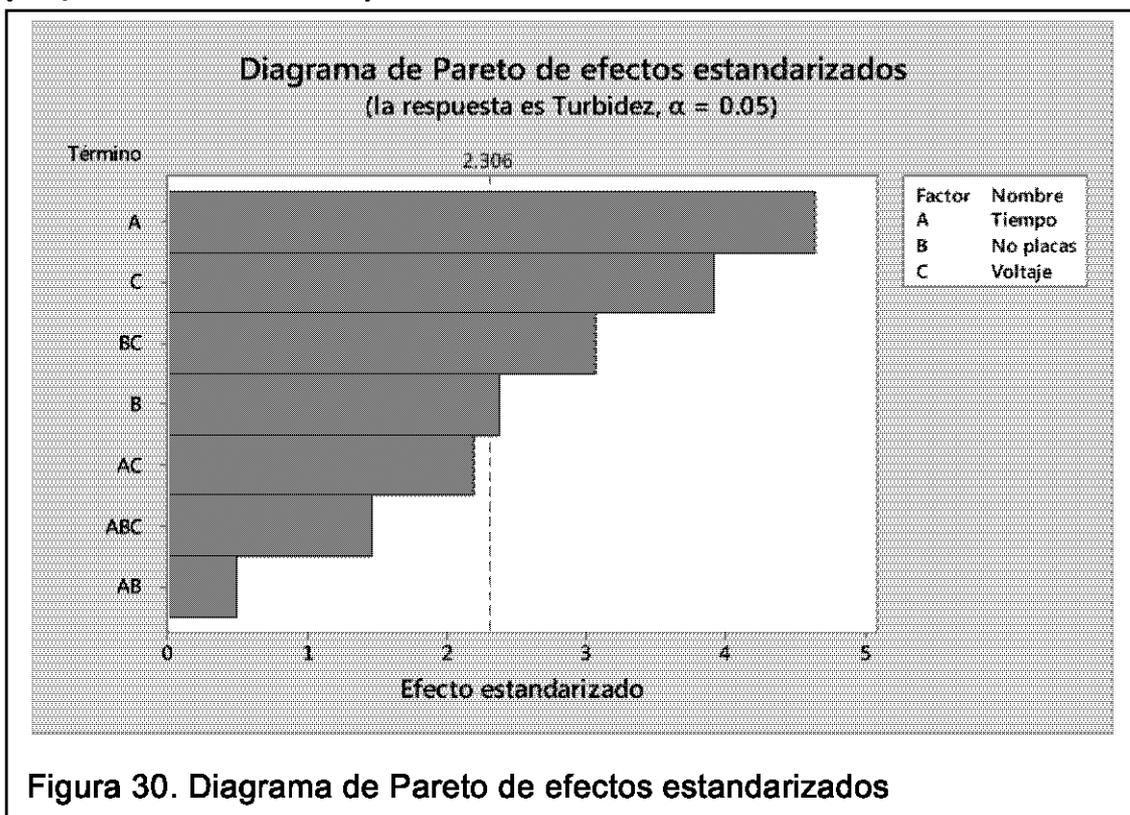
- a) Gráfica de probabilidad normal.
- b) Gráfica de residuos vs. Ajustes.
- c) Histograma.
- d) Gráfica de residuos vs. Orden de los datos

En la figura 29, se puede apreciar las gráficas de residuos para la variable de respuesta. La gráfica A pertenece a la gráfica de probabilidad normal de residuos, la que nos indica que sí se encuentran los residuos distribuidos normalmente, ya que los puntos se encuentran cerca o sobre la línea recta.

La gráfica B pertenece a los residuos versus los valores ajustados, la distribución de los residuos se presenta de forma aleatoria a los dos lados del cero, esto nos indica que se cumple el supuesto de varianza constante.

El histograma permite examinar las características generales de los residuos, la larga cola lateral se encuentra sobre el cero indicándonos que es la mayor frecuencia de los residuos. Indicando la distribución normal de residuos.

La última gráfica pertenece a los residuos versus el orden de datos, nos muestra todos los residuos en el orden en el que fueron tomados los datos. Los datos presentan una independencia entre ellos, ya que los puntos están distribuidos aleatoriamente a lo largo de la gráfica y no se correlacionan unos de otros. Se puede concluir que el error se encuentra bien distribuido, ya que a menor error mayor confiabilidad.



En la figura 30, se muestra que el factor que mayor influencia tiene sobre la variable de respuesta es el tiempo de reacción, siguiéndole el voltaje empleado durante el proceso de electrocoagulación.

La interacción entre el número de placas y el voltaje inciden significativamente en la disminución de la turbidez. Como se concluyó en las gráficas anteriores el número de placas es un factor no tan significativo al pasar del nivel bajo al nivel alto sobre el mejor resultado de turbidez. Sin embargo, de acuerdo con gráfico de Pareto los tres parámetros son significativos sobre la variable turbidez.

5.3 Análisis de la varianza

El análisis de la varianza permite verificar si hay diferencias estadísticas significativas entre medias de los tratamientos planteados.

Para este caso se plantea dos hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 \dots \mu_8$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_n$$

Donde: μ representa a las medias muestrales correspondientes a los tratamientos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

Si se acepta la hipótesis H_1 , se confirma que las medias son diferentes, con el objetivo de probar el supuesto de independencia y con ello la generación de efectos considerables entre los tratamientos.

Tabla 6. Tabla de Tratamientos (variable de respuesta: turbidez)

Número de Tratamientos							
1	2	3	4	5	6	7	8
263	80.7	157	16	23.7	19.3	58.8	11.7
197	72.5	45.3	15.3	65.1	17.9	88.1	15.2

Tabla 7. Tabla de resumen para cada tratamiento

RESUMEN					
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	
Columna 1	2	460	230	2178	
Columna 2	2	153.2	76.6	33.62	
Columna 3	2	202.3	101.15	6238.445	
Columna 4	2	31.3	15.65	0.245	
Columna 5	2	88.8	44.4	856.98	
Columna 6	2	37.2	18.6	0.98	
Columna 7	2	146.9	73.45	429.245	
Columna 8	2	26.9	13.45	6.125	

Tabla 8. Tabla ANOVA para Turbidez

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	72105.6375	7	10300.80536	8.457459723	0.003671872	3.500463855
Dentro de los grupos	9743.64	8	1217.955			
Total	81849.2775	15				

Como se muestra en la Tabla 8, la probabilidad al ser menor a 0,005 de confiabilidad; se comprueba que el supuesto H_1 es válido, ya que las medias son diferentes e independientes. Se concluye que si existen diferencias estadísticas significativas, con efectos positivos. Es decir los tres factores: tiempo de reacción, número de placas y voltaje, inciden en la disminución de la variable turbidez.

5.4 Análisis de la eficiencia del tratamiento de electrocoagulación

Una vez analizados los resultados del diseño experimental, se puso en marcha varias corridas del mejor tratamiento de electrocoagulación (tiempo de reacción, voltaje y número de placas en el nivel alto). Los parámetros escogidos para el análisis de la eficiencia del sistema de tratamiento propuesto, se tomó como referencia los especificados en la Ordenanza 213, resolución N°002, tabla B1, es decir, DBO, DQO y SS.

Para determinar el porcentaje de remoción de cada parámetro, se realiza la diferencia entre el dato inicial y el final, dividido para el inicial y multiplicado por el 100%. A continuación se muestra los resultados de cada parámetro. Las muestras tomadas están abreviadas como muestra 1, es M1 y así las demás muestras.

5.4.1 Remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), en el agua residual mediante electrocoagulación

En la figura 31, se observa los resultados obtenidos en los análisis de DBO_5 antes y después de la electrocoagulación. En donde se aprecia que existe aproximadamente un promedio de eficiencia del 93.33% de remoción de DBO_5 , entre los 420 mg/l de DBO_5 inicial y de 28 mg/l después del tratamiento de las tres réplicas.

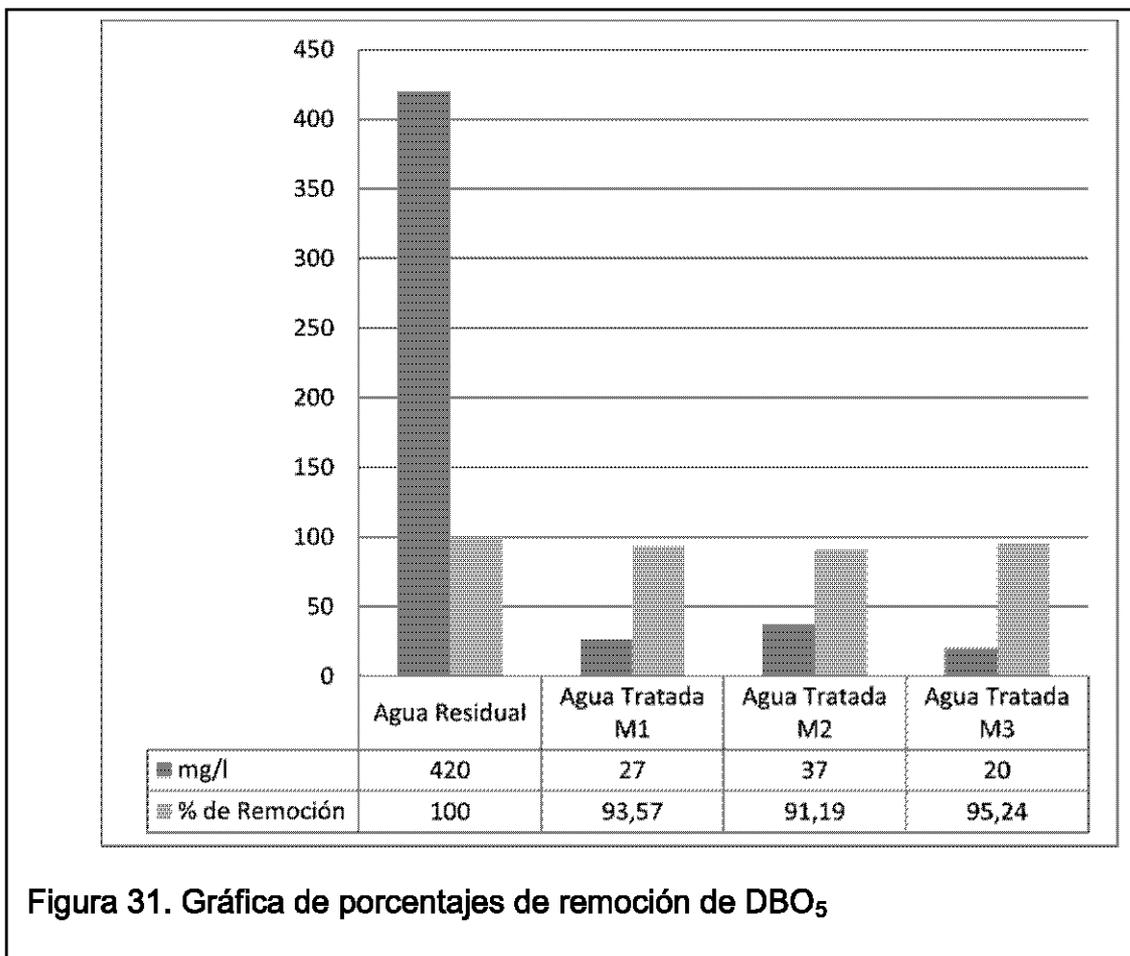


Figura 31. Gráfica de porcentajes de remoción de DBO₅

5.4.2 Remoción de la demanda química de oxígeno (DQO), en el agua residual mediante electrocoagulación.

Como se aprecia en la figura 32, entre el resultado inicial y los datos finales existe una reducción de 860.5 mg/l de DQO aproximadamente, que representa alrededor de un 82.42 % de remoción de este parámetro, promedio entre el agua tratada M1 y M2.

El proceso de electrocoagulación permite que tanto el DBO₅ como el DQO se reduzcan considerablemente, ya que las cargas positivas producto de la oxidación del Al, se liberan y se dispersan en el medio líquido; estos iones metálicos tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados (Callejas y Prieto, 2011, p. 203).

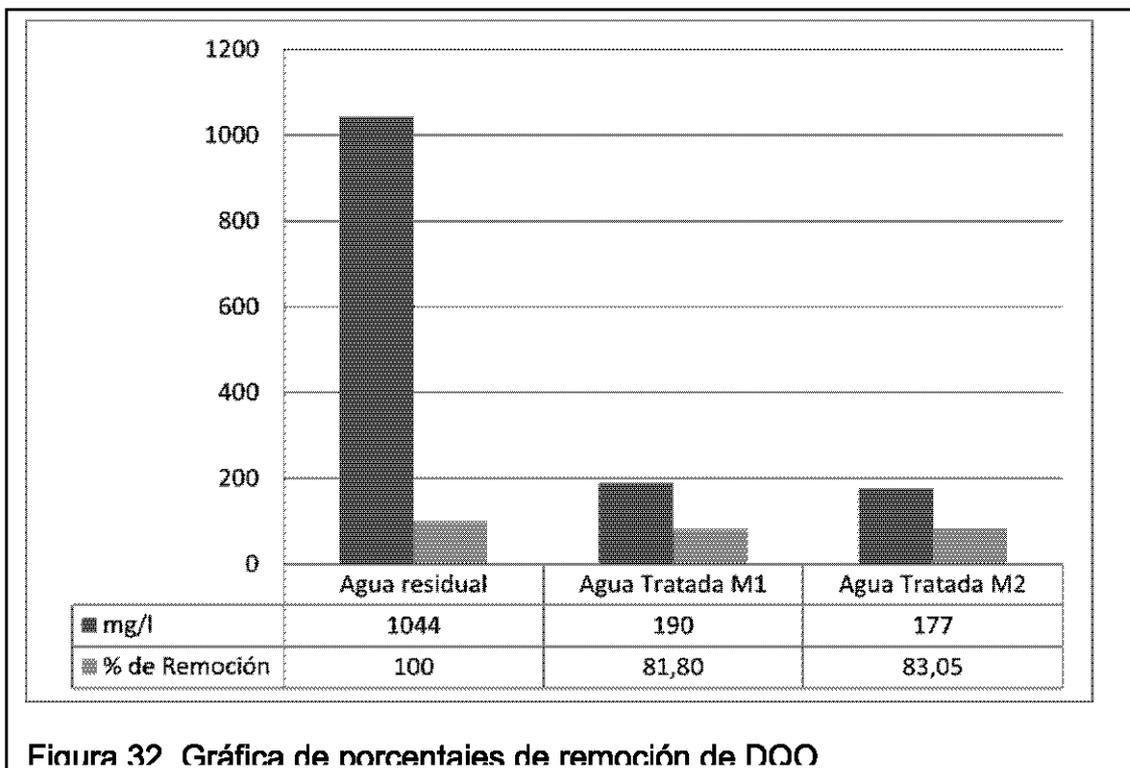


Figura 32 Gráfica de porcentajes de remoción de DQO

5.4.3 Remoción de sólidos suspendidos (SS), en el agua residual mediante electrocoagulación.

Como se aprecia en la figura 33, el agua cruda tiene un 24.3 mg/l de sólidos suspendidos, después del tratamiento los resultados de las muestras M1, M2, y M3 indican una reducción de SS de aproximadamente un 76.81%.

Esto se debe a que los sólidos en suspensión que se producen logran alcanzar la densidad adecuada para su floculación. La eliminación de las materias por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran, que acaba en el depósito de las materias en suspensión (Ramalho., 2003, p 92).

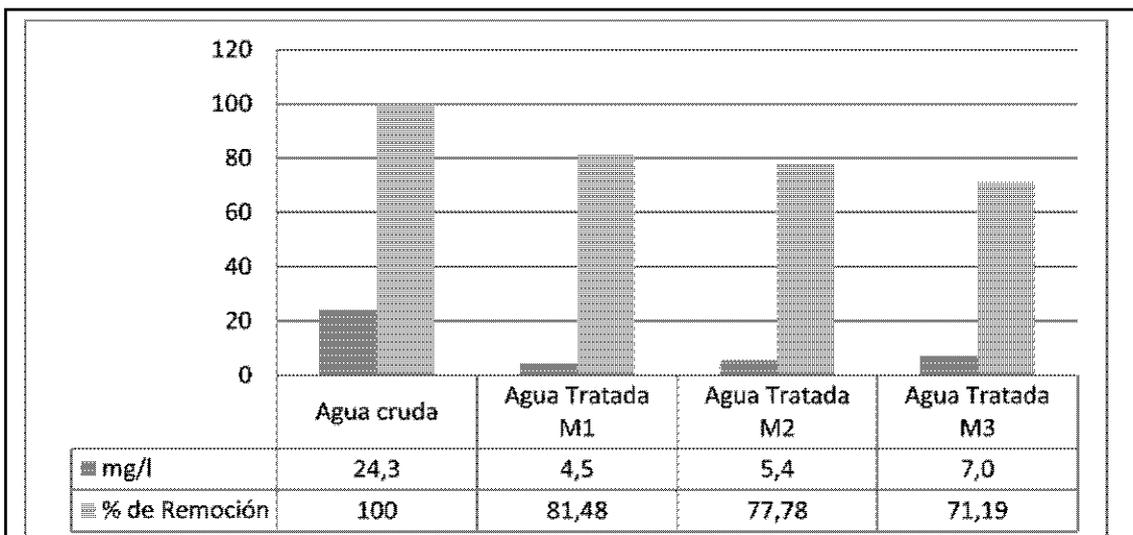


Figura 33. Gráfica de porcentajes de remoción de SS

6. Análisis Costo/Beneficio

En este capítulo se analiza los costos reales de la investigación teniendo en cuenta no solo el aspecto económico, sino también los sociales y ambientales. Mediante la valorización, la identificación de los costos y beneficios que intervienen en la implementación de un proyecto.

6.1 Análisis de los costos de construcción y operación del electrocoagulador a escala piloto

Este estudio se realizó a escala piloto para el tratamiento de 33 litros de agua residual de una industria dedicada a la elaboración de yogurt, mediante electrocoagulación.

Los costos de inversión empleados para la construcción del electrocoagulador y el costo del cargador de batería se detallan en la Tabla 9, que permitirán realizar una proyección de la inversión para una planta de a escala real, mediante esta técnica electroquímica de tratamiento de agua.

Tabla 9. Costos de Inversión inicial.

DESCRIPCIÓN MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Cubeta de plástico	1	13.85	13.85
Placas de aluminio	6	3.41	20.46
Placas de hierro	6	3.33	19.98
Caimanes	12	0.18	2.16
Alambre (metros)	24	0.80	19.20
Tornillos con turca y rodela de presión	12	0.10	1.20
Terminales de ojo	12	0.25	3.00
Conector de regleta	2	2.56	5.12
Válvula de bola	1	4.58	4.58
Adaptador 2"	1	2.08	2.08
DESCRIPCION ARTEFACTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Cargador de Batería	1	243.76	243.76
		Subtotal	335.39
		IVA 12%	40.25
		TOTAL	375.64

Para la construcción del electrocoagulador a escala piloto para el tratamiento de 33 litros de agua residual, se requiere una inversión de \$375.64. Los materiales utilizados para la construcción del electrocoagulador, son materiales de bajo costo y disponible en el mercado.

Además, en la tabla 10 se detallan otros costos utilizados para la puesta en marcha de la investigación.

Tabla 10. Otros costos de la investigación.

DESCRIPCION MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Tiras de pH caja 100 unidades	1	13.01	13.01
Termómetro	1	8.17	8.17
Envase Ámbar vidrio 500ml.	2	0.49	0.98
Canecas 20lt	3	6.50	19.5
Análisis de laboratorio Senerin	4	15.00	60.00
		Subtotal	101.66
		IVA 12%	12.20
		TOTAL	113.86

Entre la caracterización, toma de muestras del agua residual y los análisis realizados después del tratamiento propuesto se utilizaron \$113.86. Los análisis de DQO, aceites y grasa se realizaron en laboratorios acreditados externos. Todos los demás análisis se hicieron con material y equipos que se encuentran disponibles en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental-UDLA.

A continuación, se muestra la tabla 11 donde se detalla el consumo energético.

Tabla 11. Costos de operación de la unidad de electrocoagulación

TRATAMIENTO DE ELECTROCOAGULACIÓN					
Artefacto	Cantidad	Tratamientos al día	Horas de uso/día	Días de uso/mes	Costo Mensual
Cargador de Batería	1	1	1	30	\$ 22.07
TOTAL					\$ 22.07

Para el análisis del costo de operación del sistema de tratamiento a escala piloto, se tomó en consideración la energía requerida, para llevar a cabo la electrocoagulación del agua residual. Para el tratamiento de electrocoagulación

solo se toma en cuenta el consumo energético del cargador de batería, ya que es el único artefacto utilizado para este estudio.

6.2 Electrocoagulación vs. método convencional: costos de inversión y operación

Para el análisis costo/beneficio se realizó una proyección factorial de los costos de inversión y operación en función del sistema de electrocoagulación a escala piloto, y se los comparó con los costos de inversión y operación de un método convencional de tratamiento de aguas residuales, para la misma cantidad de agua.

Uno de los métodos más utilizados para el tratamiento de efluentes industriales, es el tratamiento físico-químico, mediante los procesos de coagulación y floculación. Estos procesos consisten en la dicción de reactivos químicos, conocidos como coagulante y floculante respectivamente.

La empresa Kaarú posee un caudal de descarga diario de 1392 litros, los costos de inversión inicial y operación de los dos tratamientos ha comparar están basados en este caudal. Para realizar la comparación se hizo la proyección factorial de los costos diarios de cada sistema.

Los costos de inversión inicial se obtuvieron mediante la depreciación del equipo para 10 años, de acuerdo a las Normas Internacionales de Información Financiera y luego se sumo los costos operativos.

6.2.1 Proceso de electrocoagulación

La construcción y montaje de la planta de electrocoagulación tiene un costo de \$ 19 014,22, en este precio se incluye la celda electrolítica, mano de obra, bomba, tuberías y accesorios. Aplicando la depreciación del equipo se obtuvo un costo de inversión inicial de \$ 0.22 por hora.

En los costos operativos se tomó en consideración el consumo energético del transformador de corriente. Como se muestra en la tabla 12, los costos de

operación mensual son de \$930,95; que se traduce en un costo de consumo energético diario de \$31.

Tabla 12. Costos de inversión y operación tratamiento electroquímico.

COSTOS TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO	
Concepto	Precio
Costos de inversión (construcción, mano de obra, bombas, tuberías y accesorios)	\$ 19.014,22
Costos de operación (energía consumida mensual)	\$ 930,95

Para el tratamiento de 1392 litros/día de agua residual mediante electrocoagulación, se necesita un costo total de \$ 31,22/día.

6.2.2 Proceso físico-químico

Los costos de inversión inicial y operación del tratamiento mediante coagulación y floculación, se obtuvieron siguiendo el mismo proceso que la electrocoagulación. En los costos de implementación se incluyen la construcción, mano de obra, bombas, tuberías y accesorios, dando como resultado un costo inicial de \$18 240; este dato se obtuvo de TRAHIEC, empresa dedicada a la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Aplicando la depreciación del equipo se obtiene un costo diario de \$5,06. En los costos de operación se incluye: los reactivos (coagulante, floculante, regulador de pH) y el consumo de energía de los artefactos empleados en el tratamiento; dando como resultado un costo de \$305,3/día.

Tabla 12. Costos de inversión y operación tratamiento fisicoquímico.

COSTOS TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO	
Concepto	Precio
Costos de inversión (construcción, mano de obra, bombas, tuberías y accesorios)	\$ 18.240
Costos de operación (reactivos y energía consumida mensual)	\$ 9.164

El costo total utilizado en el tratamiento físico-químico es de \$310,3 diarios.

Los costos de implementación y operación obtenidos en los dos procesos son equivalentemente comparables, ya que se considero el mismo caudal de descarga de la empresa de estudio para ambos casos.

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

Los objetivos planteados al inicio de la investigación a escala piloto, se lograron finalizar con éxito, se cumplió con la caracterización del agua residual, identificación de los parámetros influyentes en el proceso, la puesta en marcha del tratamiento a escala piloto y con el diseño del proceso de electrocoagulación para el agua residual de la industria de estudio.

- Se caracterizó el agua residual de la industria de yogurt, en base a los parámetros estipulados en el CIU de la Ordenanza 404, en donde se comprobó que los parámetros DBO₅ y DQO, superan el límite permitido, aproximadamente con un exceso del 350% de DBO₅ y un 435% de DQO.
- Se construyó un electrocoagulador a escala piloto para llevar acabo los diferentes ensayos, con materiales de bajo costo y de fácil acceso en el mercado.
- De los factores analizados: tiempo, voltaje y número de placas, en el diseño experimental, se concluye que los tres influyen significativamente en el proceso de electrocoagulación. Sin embargo el tiempo de reacción y el voltaje tienen mayor incidencia sobre los mejores resultados de remoción de la variable estudiada. La turbidez inicial de 770 NTU, disminuyó aproximadamente a 19,9 NTU después del tratamiento de estudio.
- El factor número de placas al pasar del nivel bajo al nivel alto no hay mayor incidencia en la variable de estudio, sin embargo con mas placas hay mejores resultados.
- Se concluyó que a menor distancia entre placas hay una mejor formación de flócs, es decir la distancia es inversamente proporcional a la formación de flóculos residuales. Este se debe a que entra las placas

existe una mayor movilidad de los iones deprendidos durante la electrolisis.

- En los diferentes ensayos llevados acabo se pudo determinar que la temperatura y el pH, no varían significativamente después de cada tratamiento, en comparación con los datos iniciales.
- La formación de burbujas de gas de H₂ en la superficie de los electrodos, permite que las partículas desestabilizadas en el proceso, queden suspendidas y se puedan separar con mayor facilidad.
- Las condiciones optimas de operación, en donde se pudo observar la mejor remoción para los 33 litros de agua residual, es con 12 placas, 6 voltios, a un tiempo de 60 minutos, distancia entre placas de 2,5 cm y placas de aluminio como electrodo de sacrificio.
- Al terminar el tratamiento de electrocoagulación, el agua presenta una remoción significativa en la disminución de DQO, DBO₅ y SS. Los porcentajes de remoción aproximadamente de DQO es de 93%, DBO₅ de 82 % y de SS de 76 %.
- El proceso de electrocoagulación a escala piloto, permite la disminución de los contaminantes del agua residual de la industria de yogurt Kaarú, en una sola operación. Debido a que este proceso permite la desestabilización de la materia orgánica contenida en el agua residual.
- Se realizó el análisis costo/beneficio del proceso de electrocoagulación, mediante la comparación con un sistema físico-químico de tratamiento de aguas residuales. Presentando a la electrocoagulación como un tratamiento económicamente viable para la empresa en estudio; ya que sus costos de inversión y operación son mucho más bajos que el otro tratamiento.

7.2 Recomendaciones

A partir de esta investigación a escala piloto, se recomienda la aplicación industrial del proceso de electrocoagulación, para la validación de las variables estudiadas. Además de la importancia de continuar con el análisis de otros factores de influencia en esta propuesta de estudio.

Se recomienda la caracterización de los flóculos residuales obtenidos en el proceso de electrocoagulación, y una investigación sobre la disposición final de los mismos. Además de la implementación de una tecnología que permita sacar los flóculos fuera del electrocoagulador.

El análisis de la cantidad de aluminio residual que puede contener el agua tratada, y algún tratamiento posterior a la electrocoagulación, que permita la remoción de Al.

La utilización de otro tipo de metal en los electrodos, tanto para el ánodo como para el cátodo, para conocer si existe mayor eficiencia con otro tipo de material. Realizar investigaciones sobre este proceso con otro tipo de aguas residuales de diferentes industrias.

REFERENCIAS

- Acosta, G., Bourdon, A., y Coy, C. (2013). Evaluación y regulación de parámetros en un equipo diseñado para la disminución de cromo (vi), provenientes de la industria de recubrimientos galvánicos. Recuperado el 25 de julio de 2014 de www.springer.com
- AINIA: Instituto Tecnológico Agroalimentario. (s.f). Mejores Técnicas Disponibles en la Industria Láctea. Recuperado el 10 de enero de 2014 de <http://www.prtr-es.es/data/images/la%20industria%20I%C3%A1ctea-3686e1a542dd936f.pdf>
- Arango, A. (2012). Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. Recuperado el 1 de diciembre de 2013 de dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4331975.pdf
- Arango, A. y Garcés, L. (2008). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea por electrocoagulación. Recuperado el 8 de abril de 2014 de <http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/458/14ARTICULOABR.pdf>
- Arango, A. y Garcés, L. (2009). Influencia de la conductividad eléctrica en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. Recuperado el 27 de noviembre de <http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/Vol4n2/53-64.pdf>
- Atkins, P. y Jones, L. (2005). Principios de Química: Los caminos del descubrimiento. (3ª. Ed.). Nueva York, Estados Unidos: H. W Freeman and Company.
- Bayramoglu, M. (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. In: Separation and Purification Technology. Vol.37, No. 2.
- Callejas, J. y Prieto, F. (2011). Depuración por electrocoagulación en un lactosuero: cinética del proceso. Querétaro, México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

- Cazco, A. y Jarrín, S. (2010). Diseño, construcción y análisis de los parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación. Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Nacional.
- Chang, R. (2007). Química. (9^a. Ed.). México DF, México: McGraw-Hill Interamericano.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. In: Separation and Purification Technology. Recuperado el 10 de enero de 2014 de http://www.jpcomplex.ir/content/media/image/2013/08/772_orig.pdf
- Comninellis, C. (2009). Electrochemistry for the Environment. London, U.K.: Springer
- Correa, A. (2004). Fenómenos químicos. (2^{da}. ed.). Medellín, Colombia: Fondo Editorial, Universidad de EAFIT.
- Díaz, F. (2008). Lecturas de Ingeniería 7: Principios de Electrodeposición. Recuperado el 27 de noviembre de 2013 de <http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx>.
- Geissler, G. y Arroyo, M. (2011). El agua como un recurso natural renovable. (1^a. Ed.). México: Trillas.
- Gómez, E. y Martínez, V. (2013). Estudio de optimización de variables de funcionamiento de un sistema de electrocoagulación para tratar aguas de la industria textil. Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Nacional.
- Gupta, V. y Ali, I. (2012). Environmental Water: Advances in Treatment, Remediation and Recycling. Oxford, U.K.:Elsevier Science.
- Kaaru (2014). Documentos Internos. Quito, Ecuador.
- Karichappan, T., Venkatachalam, S. y Jeganathan, P. (2014). Optimization of electrocoagulation process to treat grey wastewater in batch mode using response surface methodology. Recuperado el 25 de Julio de 2014 de <http://www.ijehse.com/content/12/1/29>
- Kumar, P., Chaudhari, S., Khilar. K. y Mahajan S. (2004). Removal of arsenic from water by electrocoagulation. In: Chemosphere. Vol. 55, No. 9.

- Larue, O., Vorobiev E., Durand B. y Vu, C. (2003). Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. In: Separation and Purification Technology. Vol. 31, No. 2
- Laval, A. (2003). Manual de industrias lácteas. Madrid, España: MUNDI-PRENSA LIBROS, S.A.
- Lichtfouse, E., Schwarzbauer, J. y Robert, D. (2013). Green Materials for Energy, Products and Depollution. London, U.K.:Springer London
- Mahawt, M., Seantet, R., Brule, G. y Schuck, P. (2004). Productos Lácteos Industriales. Zaragoza, España: Editorial ACRIBA, S.A.
- Mantell, C. (2003). Ingeniería Electro-Química. (4^a. Ed.) New York, USA: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Mariné, A. (2008). Funciones del Agua Corporal y su Equilibrio en el Organismo. Recuperado el 24 de octubre de 2013 <http://www.nutricion.org/publicaciones/pdf/Funciones>
- Navarro, F. (2007). Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. Ciudad Real, España: Universidad De Castilla-La Mancha.
- Nemerow, N. y Dasgupta, A. (2009). Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- Ordenanza 404. (2013). Resolución N°002, Guía de parámetros mínimos por sector productivo. Quito, Ecuador.
- Organización de servicio SEAT S.A. (s.f.) Conceptos Básicos de Electricidad. Recuperado el 10 de diciembre de 2013 de http://www.hacienda.go.cr/cifh/sidovih/cursos/material_de_apoyo-F-C-CIFH/3MaterialdeapoyocursosINA/Fundamentoselectronicaparainformaticos/Conceptosbaselect.pdf
- Prieto, C. (2004). El agua. Sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación. (2^a. Ed.). Bogotá, Colombia: Eco Ediciones.
- Ramalho R. S. (2003). Tratamiento de aguas Residuales. Madrid, España. Editorial Reverté S.A.

- Ramos, R., Sepúlveda, R. y Villalobos, F. (2003). El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis. Mexicali, México: Plaza y Valdés, S. A. de C. V.
- Red Ecuatoriana de Consultores Ambientales Independientes (RECAI). (2005). Diccionario Ambiental. Ecuador: Autor.
- Restrepo, A., Arango, A. y Ruiz, L. (2006). La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas residuales. Recuperado el 20 de noviembre de 2013 de http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/110567/514/1/pl_v1n2_58-77_electrocoagulacion.pdf
- Romero, J. (2004). Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño. (3^a. Ed.) Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Salas, V. (2014). Entrevista realizada por Pamela López. Quito, Ecuador.
- Seoanez, A. (2002). Manual de tratamiento, reciclado, aprovechamiento y gestión de las aguas residuales de las industrias agroalimenticias. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Ternium. (s.f.). Manual del contenido del participante: Electricidad Básica. Recuperado el 10 de diciembre de 2013 de <http://www.eet6sannicolos.edu.ar/biblioteca/alumnos/2%20polimodal/TX-TEP-0002%20MP%20Electricidad%20B%C3%A1sica.pdf>
- Universidad del Valle (2002). Conceptos Básicos de la Contaminación del Agua y Parámetros de Medición. Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- USON, (s.f.). Características de las aguas residuales. Recuperado el 03 de diciembre de 2013 de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/895/Capitulo3.pdf>
- Wiblbrett G., (2000). Limpieza y desinfección en la industria alimentaria. Zaragoza: acribia.
- Yilmaz, A., Boncukcoglu R., Kocakerim, M. y Keskinler, B., (2005). The investigation of parameters affecting boron removal by

electrocoagulation method. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 125, no. 1-3.

ANEXOS

ANEXO 1

Ordenanza 404, resolución N°002, Guía de parámetros mínimos por sector productivo.

CIU	Descripción	Q M ³ /d	pH	T °C	A & G m g/l	DB O ₅ mg /l	D Q O m g/l	SS ed ml/ l	S S T m g/l	Orga no clora dos	Organ o fosfor ados	Metale s pesado s	Otro s
D15 20	Elaboración de productos lácteos	x	x	x	x	x	x	x	x				Sulfuros

Tomado de Secretaría de Ambiente, 2013, p. 31.

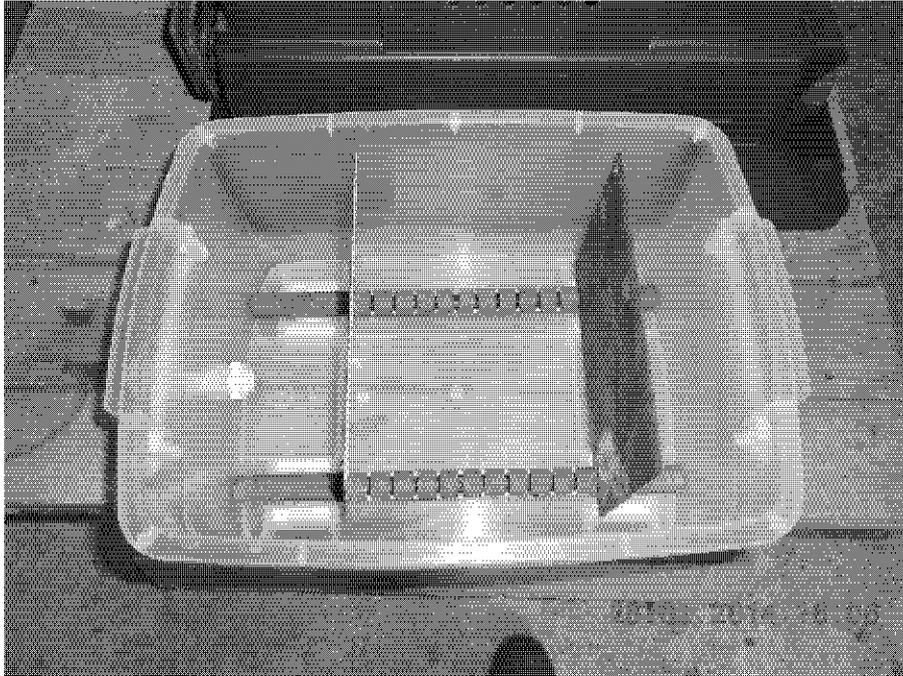
Ordenanza 213, resolución N°002, tabla B1, para todos los sectores productivos, exceptuando el sector textil y al sector de bebidas gaseosas, embotelladoras y cervecería.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límites Máximos Permisibles		
			Junio 2006 a Mayo 2008	Junio 2008 a mayo 2010	jun-10
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (5 DÍAS)	D.B.O5	mg/l	172 (A) 122 (C)	146(A) 96(C)	120(A) 70(C)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	D.Q.O	mg/l	344(A) 214(C)	292(A) 168(C)	240(A) 123(C)
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	SS	mg/l	137(A) 92(C)	116(A) 72(C)	95(A) 53(C)
CAUDAL	Q	l/s	4,5 ^a	4,5 ^a	4,5 ^a

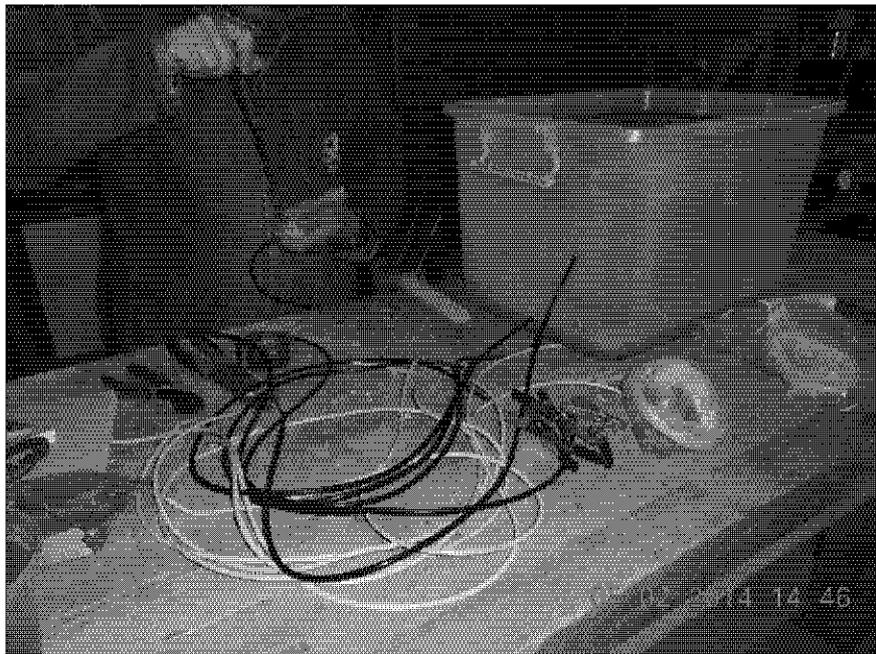
Tomado de Secretaría de Ambiente, 2013, p. 23.

ANEXO 2

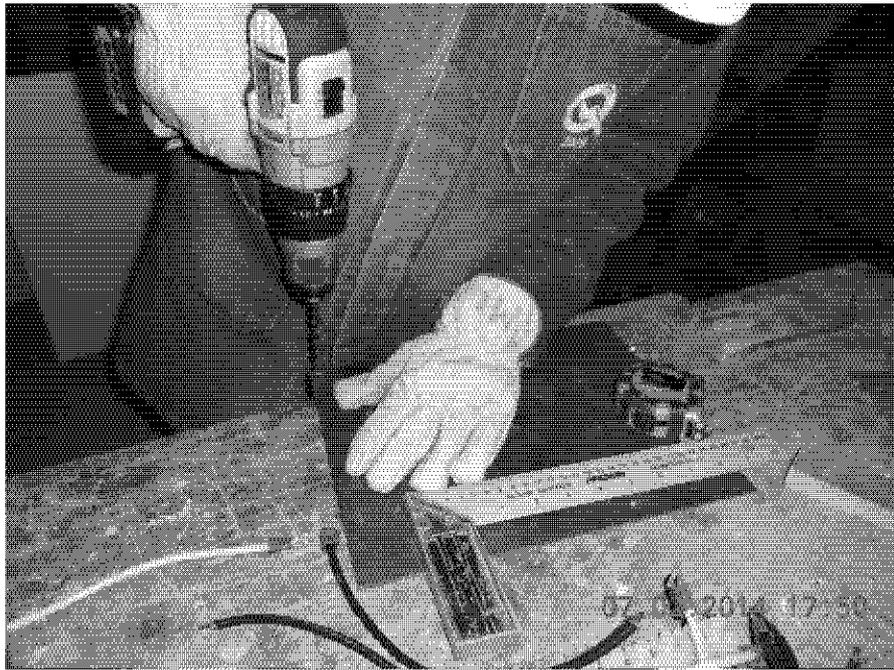
Registro Fotográfico



Colocación de tubos para la estabilidad de las placas dentro del reactor.



Instalación de conectores v alambre al cuerpo del reactor.



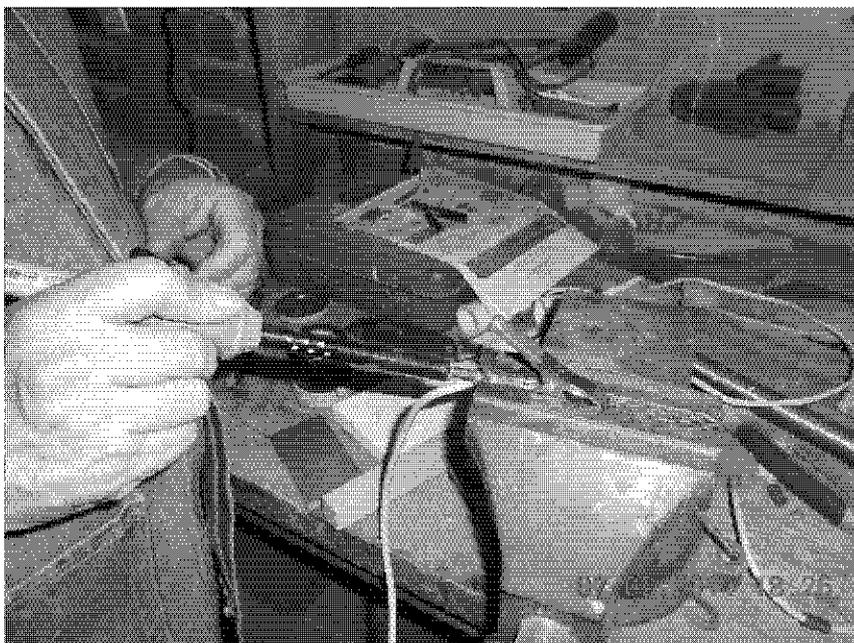
Perforación de placas de hierro.



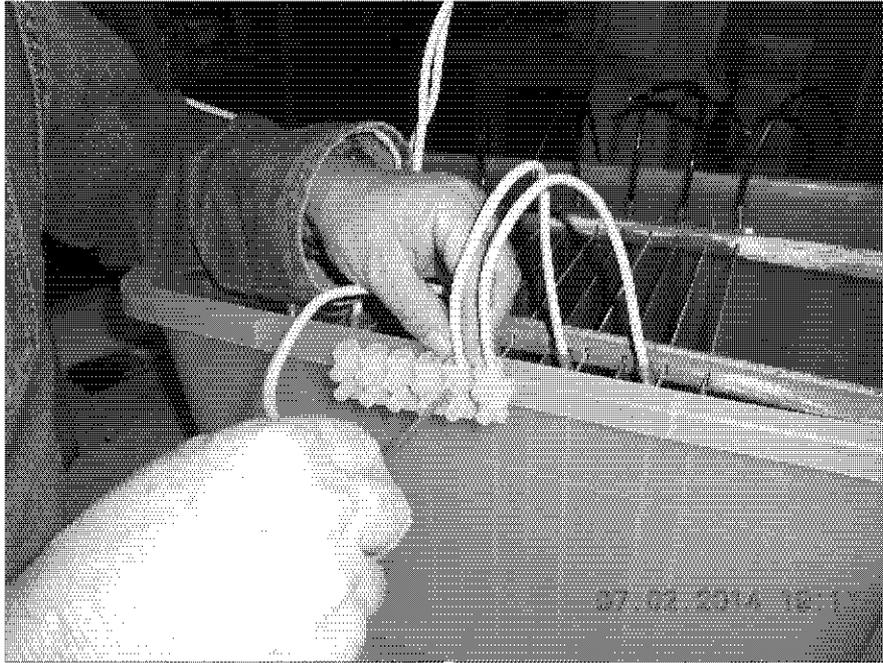
Colocación de terminales de ojo y tornillos en las placas.



Instalación de llave de agua.



Cauterización de lagartos.



Armado el electrocoagulador.



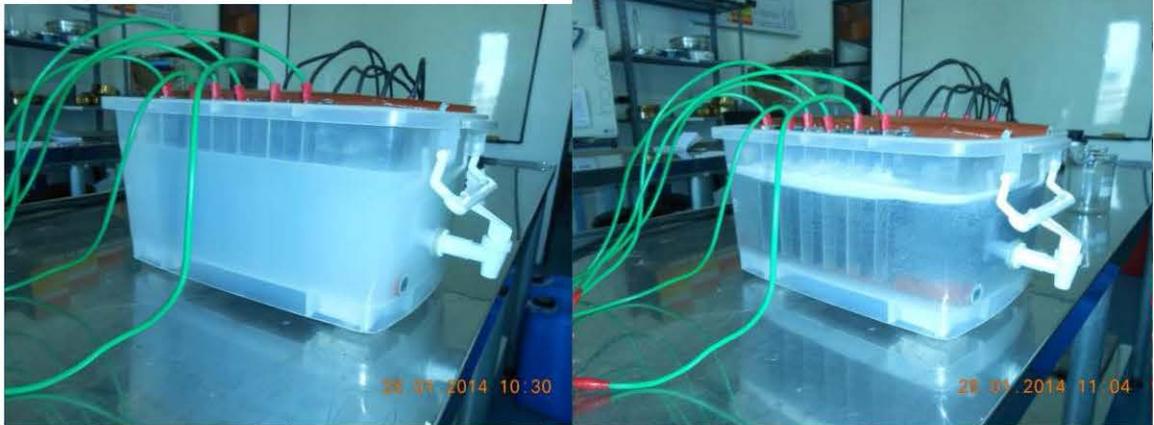
Cargador de batería.



Montaje del equipo filtración para la medición de sólidos suspendidos.



Botellas winkler y equipo oxitop, para la medición del DBO₅



Proceso de electrocoagulación a escala de laboratorio.

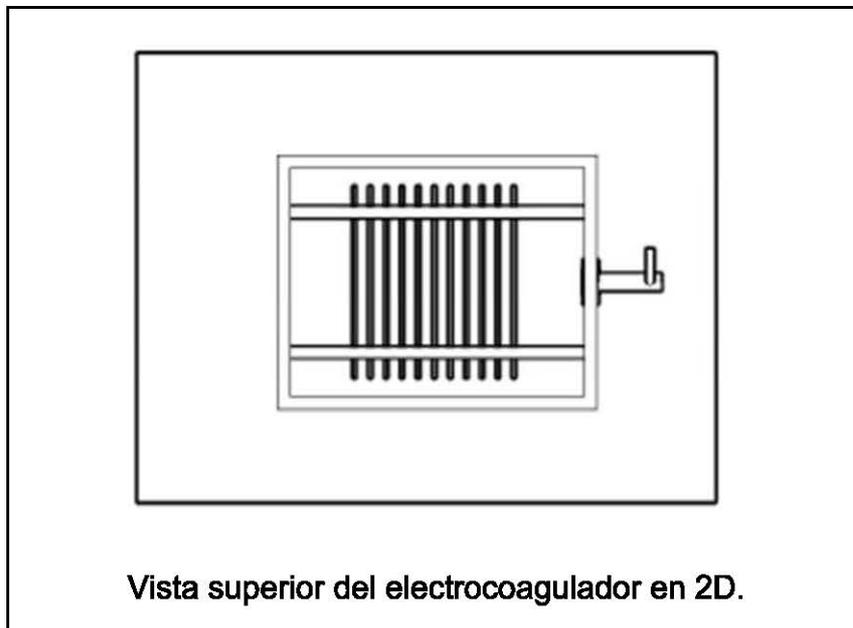


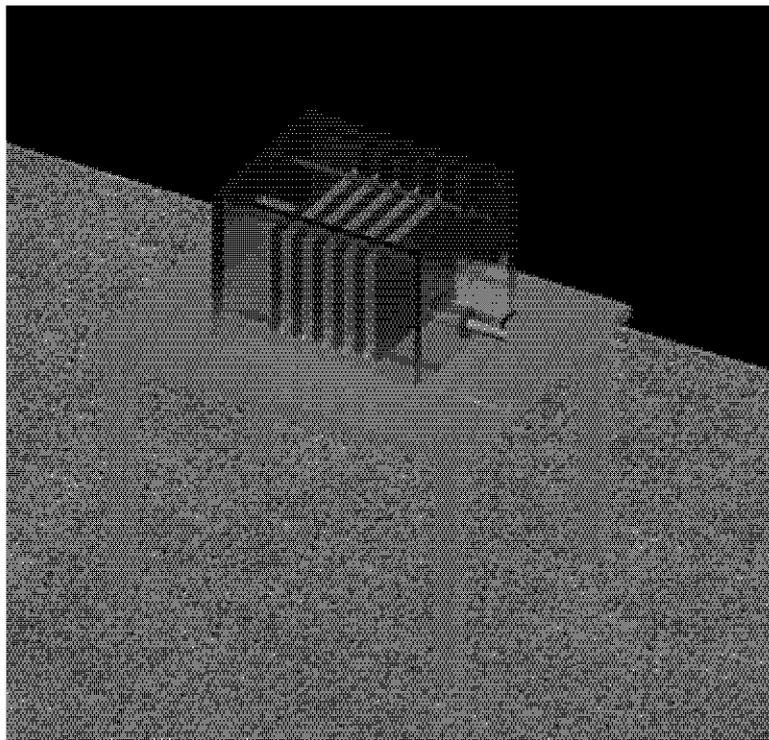
Proceso de electrocoagulación a escala piloto.



ANEXO 3

Esquemas del electrocoagulador en AUTOCAD





Vista frontal del electrocoagulador en 3D

ANEXO 5

Análisis de Laboratorio Certificado

		INFORME DE RESULTADOS DE MEDICIÓN	IR: AG 312/2014 <small>FMC 2203 Pag 1 de 1 Edición 2</small>
Nombre de la Empresa:	KAARU	Procedimiento de muestreo:	STD 1060
Dirección:	Salinas S1-44, Cumbayá	Fecha de toma de muestra:	2014-03-25
Teléfono:	2891-770	Lugar de la toma de muestra:	AGUA CRUDA
Responsable:	GUISELA LOPEZ	Fecha de Recepción:	2014-03-25
Fecha de Emisión:	2014-04-02	Fecha de Análisis:	2014-03-25
Recepcionado por:	DANIEL SOLIS		
Analizado por:	DANIEL SOLIS		
Análisis de:	Aguas residuales		

INFORMACIÓN DEL CLIENTE	CÓDIGO DEL LABORATORIO	ENSAYO	MÉTODO	UNIDADES	RESULTADO	LÍMITE MÁXIMO
KAARU MUESTRA AGUA CRUDA	AG1403312	ACEITES Y GRASAS	PEAGSEN12	mg/L	15	70
		DQO	PEAGSEN02	mg/L	1044	350

NOTAS IMPORTANTES:

El cliente realizó la toma de muestra.
 Los parámetros analizados se solicitaron por el cliente.
 Las condiciones ambientales no interfieren en los resultados de los análisis realizados.
 Los resultados de los análisis corresponden únicamente a las muestras detalladas y codificadas en el presente informe.
 Los resultados de los ensayos no pueden ser reproducidos total o parcialmente a menos que tenga una autorización del Laboratorio.

INCERTIDUMBRE METODOS

Parámetro	Rango	Incertidumbre
ACEITES Y GRASAS	11,4 - 48	± 10% mg/L
DQO	73 - 643	± 21% ppm

Responsable del análisis: DANIEL SOLIS

Responsable del Informe:



QUIM. DANIEL SOLIS
 DIRECTOR DE CALIDAD SENERIN CIA. LTDA. CENERIN

	INFORME DE RESULTADOS DE MEDICIÓN	IR: AG 303/2014
		<small>FMC 2003 Pág. 1 de 1 Edición 2</small>

Nombre de la Empresa:	KAARU	Procedimiento de muestreo:	STD 1060
Dirección:	Salinas 51-44, Cumbayá	Fecha de toma de muestra:	2014-03-20
Teléfono:	2891-770	Lugar de la toma de muestra:	MUESTRA M1
Responsable:	GUISELA LÓPEZ	Fecha de Recepción:	2014-03-20
Fecha de Emisión:	2014-03-26	Fecha de Análisis:	2014-03-26
Recepcionado por:	DANIEL SOLÍS		
Analizado por:	DANIEL SOLÍS		
Análisis de:	Aguas residuales		

INFORMACIÓN DEL CLIENTE	CÓDIGO DEL LABORATORIO	ENSAYO	MÉTODO	UNIDADES	RESULTADO	LÍMITE MÁXIMO
KAARU MUESTRA #1 AGUA TRATADA	AG1403303	DQO	PEAGSEN02	mg/L	190	240

NOTAS IMPORTANTES:

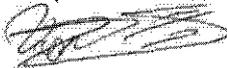
El cliente realizó la toma de muestra.
 Los parámetros analizados se solicitaron por el cliente.
 Las condiciones ambientales no interfieren en los resultados de los análisis realizados.
 Los resultados de los análisis corresponden únicamente a las muestras detalladas y codificadas en el presente informe.
 Los resultados de los ensayos no pueden ser reproducidos total o parcialmente a menos que tenga una autorización del Laboratorio.

INCERTIDUMBRE METODOS

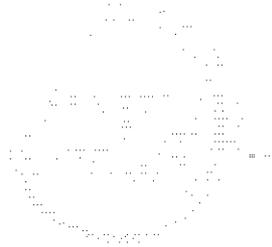
Parámetro	Rango	Incetidumbre
DQO	73 - 643	± 21% ppm

Responsable del análisis: DANIEL SOLÍS

Responsable del Informe:



QUIN, DANIEL SOLÍS
 DIRECTOR DE CALIDAD SENERIN CIA. LTDA. CENERIN



	INFORME DE RESULTADOS DE MEDICIÓN	IR: AG302/2014
		FMC 2201 Pág. 1 de 1 Edición 2

Nombre de la Empresa:	KAARU	Procedimiento de muestreo:	STD 1050
Dirección:	Salinas 51-44, Cumbayá	Fecha de toma de muestra:	2014-03-20
Teléfono:	2891-770	Lugar de la toma de muestra:	MUESTRA M2
Responsable:	GUISELA LOPEZ	Fecha de Recepción:	2014-03-20
Fecha de Emisión:	2014-03-26	Fecha de Análisis:	2014-03-20
Recepcionado por:	DANIEL SOLIS		
Analizado por:	DANIEL SOLIS		
Análisis de:	Aguas residuales		

INFORMACIÓN DEL CLIENTE	CÓDIGO DEL LABORATORIO	ENSAYO	MÉTODO	UNIDADES	RESULTADO	LÍMITE MÁXIMO
KAARU MUESTRA M2 AGUA TRATADA	AG1403302	DQO	PEACSEN02	mg/L	177	240

NOTAS IMPORTANTES:

El cliente realizó la toma de muestra.
 Los parámetros analizados se solicitaron por el cliente.
 Las condiciones ambientales no interfieren en los resultados de los análisis realizados.
 Los resultados de los análisis corresponden únicamente a las muestras detalladas y codificadas en el presente informe.
 Los resultados de los ensayos no pueden ser reproducibles total o parcialmente a menos que tenga una autorización del Laboratorio.

INCERTIDUMBRE METODOS

Parámetro	Rango	Incertidumbre
DQO	72 - 643	± 23% ppm

Responsable del análisis: DANIEL SOLIS

Responsable del Informe:

QUIM. DANIEL SOLIS
 DIRECTOR DE CALIDAD SENERIN CIA. LTDA. CENERIN