

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE CARGA
CONTAMINANTE DEL EFLUENTE DEL MATADERO MUNICIPAL DE TINGO
MARÍA.

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

YILSSA HELEN TAMANI AGUIRRE

Tingo María – Perú

2017



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 11 de Abril de 2017, a horas 11:18 a.m. en la Sala de Grados de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, para calificar la Tesis titulada:

“ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE CARGA CONTAMINANTE DEL EFLUENTE DEL MATADERO MUNICIPAL DE TINGO MARÍA”

Presentado por la Bachiller **YILSSA HELEN TAMANI AGUIRRE**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADA** con el calificativo de **“MUY BUENO”**

En consecuencia, la sustentante queda apta para optar el Título de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para la otorgación del Título correspondiente.

Tingo María, 25 de abril del 2017


Dr. **CÉSAR SAMUEL LÓPEZ LÓPEZ**
PRESIDENTE


Blgo. **CÉSAR AUGUSTO GOZME SULCA**
VOCAL


Ing. **VICTOR MANUEL BETETA ALVARADO**
VOCAL


M.Sc. **JOSÉ ANTONIO BLAS MATIENZO**
ASESOR

DEDICATORIA

A Dios y a mis padres; Zenaida y Abel, quienes han guiado mi vida, y me han ayudado en mi formación personal y profesional. Gracias por el amor que me siguen brindando.

A mis hermanos por sus consejos, por el apoyo, la confianza y el amor que me tienen.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme vida y salud para terminar esta investigación.

A mis padres y hermanos por brindarme su apoyo y motivarme a terminar este trabajo, siendo este un gran reto al terminar la universidad.

A mi prima Maily Brillyt por ayudarme en la recolección de las muestras del efluente del matadero municipal, que siendo muy joven no se negó en prestarme sus manos para apoyarme.

Al Dr. César López López por facilitarme el laboratorio de microbiología, ayudarme al desarrollo de esta investigación y escuchar sobre mis frustraciones. Asimismo, al Ing. Víctor Beteta Alvarado por guiarme en los análisis de resultados. Igualmente, al Profesor José Blas Matienzo por brindarme sus conocimientos y participar de esta investigación como mi asesor.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y sus docentes, por formarme profesionalmente.

A mis amigos Raúl, Natalia, Bárbara y Xiomara por motivarme en momentos difíciles en el desarrollo de esta investigación, y por brindarme su valiosa amistad y cariño.

A los técnicos de los laboratorios de química, física y microbiología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

INDICE

Contenido	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISION DE LITERATURA	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. El agua.....	5
2.2.1. Calidad de agua	5
2.2.2. Parámetros fisicoquímicos y biológicos de calidad de agua.....	6
2.3. Faenado de animales de abasto.....	10
2.3.1. Procesos para el faenado de animales de abasto.....	10
2.3.2. Contaminación generada por el faenado de animales	12
2.4. Electrocoagulación.....	14
2.4.1. Fundamentos de la electrocoagulación	14
2.4.2. Fases de la electrocoagulación	16
2.4.3. Reacciones presentes en el proceso de electrocoagulación.....	17
2.4.4. Factores que afectan el proceso de electrocoagulación	19
2.4.5. Celdas de electrocoagulación	24
2.4.6. Aplicación de la electrocoagulación	29
2.4.7. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación.....	37
III. MATERIALES Y METODOS.....	39

3.1. Zona de Estudio.....	39
3.2. Construcción de la celda de electrocoagulación	39
3.2.1. Celda de electrocoagulación	40
3.2.2. Electroodos	41
3.2.3. Sistema eléctrico y fuente de energía	43
3.3. Materiales y reactivos	43
3.4. Operación de la celda de electrocoagulación	43
3.5. Determinación de parámetros fisicoquímicos y biológicos del efluente	44
3.5.1. Determinación de Temperatura (°C)	44
3.5.2. Determinación de Conductividad.....	44
3.5.3. Determinación del pH.....	44
3.5.4. Determinación de Sólidos Totales.....	44
3.5.5. Determinación de Sólidos Suspendidos	45
3.5.6. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno	45
3.5.7. Determinación de Coliformes	46
3.6. Eficiencia de remoción.....	46
3.7. Diseño experimental	47
3.7.1. Tratamientos en estudio.....	48
3.7.2. Variables	48
3.7.3. Procesamiento de la muestra.....	49
3.8. Análisis e interpretación de datos	50
3.8.1. Análisis de varianza (ANOVA).....	50
3.8.2. Pruebas de múltiple rango de diferencia francamente significativa de Tukey (HSD Tukey)	50

IV. RESULTADOS	51
4.1. Caracterización fisicoquímica y biológica del efluente	51
4.2. Construcción de celda de electrocoagulación.....	52
4.3. Determinación del efecto de la intensidad de corriente y tiempo de operación en la reducción de carga contaminante, por medición de los siguientes parámetros: DBO ₅ , coliformes y sólidos; como también pH, conductividad y temperatura.....	54
4.3.1. Reducción de la demanda Bioquímica de Oxígeno.....	56
4.3.2. Reducción de Sólidos.....	60
4.3.3. Reducción de Coliformes	69
4.3.4. Variación de pH, conductividad y temperatura	79
4.3.5. Determinación de la eficiencia de reducción de la carga contaminante del efluente del matadero municipal de Tingo María, mediante la aplicación de la técnica de electrocoagulación.	82
V. DISCUSION	85
VI. CONCLUSIONES	93
VII. RECOMENDACIONES	94
VIII. ABSTRACT	95
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	96
ANEXOS	102

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Pág.
1. Caracterización de agua residual de una planta de sacrificio	13
2. Porcentaje de contaminantes eliminados por SCWW mediante EC	36
3. Especificaciones de los tratamientos	48
4. Caracterización del agua residual del matadero municipal	52
5. Características de la celda de electrocoagulación	53
6. Reducción de DBO_5	57
7. ANVA para la DBO_5	59
8. Prueba Tukey en función de la intensidad de corriente y la DBO_5	59
9. Prueba Tukey en función del tiempo y la DBO_5	60
10. Contraste entre tiempos de operación en la remoción de DBO_5	60
11. Remoción de sólidos totales	61
12. ANVA para sólidos totales.....	63
13. Prueba Tukey en función de la intensidad de corriente y ST	64
14. Prueba Tukey en función del tiempo de operación y ST	64
15. Contraste entre tiempos de operación en la remoción de ST	65
16. Remoción de sólidos suspendidos	66
17. ANVA para sólidos suspendidos	68
18. Prueba Tukey en función de la intensidad de corriente y SS	68

19. Prueba Tukey en función del tiempo de operación y SS.....	69
20. Contraste entre tiempos de operación en la remoción de SS	69
21. Reducción de coliformes totales	70
22. ANVA para coliformes totales	73
23. Prueba Tukey en función de la intensidad de corriente y CT	73
24. Prueba Tukey en función del tiempo de operación y CT.....	74
25. Contraste entre tiempos de operación en la reducción de CT	74
26. Reducción de coliformes fecales.....	75
27. ANVA para coliformes fecales.....	77
28. Prueba Tukey en función de la intensidad de corriente y CF	78
29. Prueba Tukey en función del tiempo de operación y CF.....	78
30. Contraste entre tiempos de operación en la reducción de CF	79
31. Valores de pH durante los tratamientos	79
32. ANVA para el pH.....	80
33. Valores de conductividad durante los tratamientos.....	80
34. ANVA para la conductividad.....	81
35. Valores de temperatura durante los tratamientos	81
36. ANVA para la temperatura	82
37. Eficiencia de reducción de carga contaminante.....	83
38. Medias, desviación estándar y coeficiente de variación para la eficiencia de reducción de carga contaminante mediante electrocoagulación	84

INDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1. Proceso de electrocoagulación	17
2. Estructura de una celda de electrocoagulación.....	25
3. Reactores para electrocoagulación tipo batch: (a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo, (b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie.....	28
4. Arreglo de electrodos	29
5. Celda de electrocoagulación	40
6. Sistema de anclaje de la celda de electrocoagulación.....	42
7. Diseño experimental	48
8. Celda de electrocoagulación	53
9. Proceso de electrocoagulación a 1A con 5 minutos.....	54
10. Proceso de electrocoagulación a 1.5A con 5 minutos.....	55
11. Proceso de electrocoagulación a 2A con 30 minutos.....	55
12. Medición de OD	56
13. DBO ₅ vs Intensidad de corriente	58
14. DBO ₅ vs Tiempo	58
15. Sólidos totales a 1.5A con 5,15 y 30 minutos.....	61
16. ST vs Intensidad de corriente.....	62

17. ST vs Tiempo	63
18. SS a 2A con 30 minutos.....	65
19. SS vs Intensidad de corriente	67
20. SS vs Tiempo.....	67
21. Coliformes totales a 1.5A con 30minutos	70
22. Coliformes totales vs Intensidad de corriente.....	71
23. Muestra de agua tratada a 1.5 A con 30 y 15 minutos	72
24. Coliformes totales vs Tiempo	72
25. Coliformes fecales (E. coli) a 1.5A con 30 minutos	75
26. E. coli vs Intensidad de corriente	76
27. E. coli vs Tiempo.....	77
28. Caracterización del efluente del matadero municipal.....	108
29. Medición de pH	108
30. Cortado de electrodos de acero galvanizado y aluminio.....	109
31. Inicio del proceso de electrocoagulación	109
32. Proceso de electrocoagulación a 20 – 30 minutos.....	110
33. Final del proceso de electrocoagulación	110
34. Toma de muestras	111

RESUMEN

La contaminación causada por el vertimiento directo del efluente del matadero municipal de Tingo María al río Huallaga, que afecta el ecosistema acuático sea convertido en un peligro para la salud de las personas, nos lleva a la necesidad de utilizar nuevas tecnologías para remover los contaminantes de este efluente, una alternativa de solución es la electrocoagulación. El objetivo de este estudio fue evaluar la técnica en mención para reducir la carga contaminante del efluente del matadero municipal, se realizaron 27 experimentos. Se construyó una celda de electrocoagulación tipo batch (lotes), con 5 electrodos de aluminio y 5 de acero galvanizado; los experimentos constaron de tres intensidades de corriente, tres tiempos de operación, cada una con 3 repeticiones. Los resultados obtenidos son alentadores, al aplicar la técnica de electrocoagulación; en 30 minutos y con una intensidad de corriente de 2 A se logró reducir el DBO₅ hasta en un 86%, sólidos totales en 86%, sólidos suspendidos en 96%, coliformes totales en 100% y coliformes fecales (*E. coli*) en 100%.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital de incalculable valor para las funciones metabólicas de los seres vivos, y para las distintas labores que realizan los seres humanos, entre los que destacan las actividades económicas esenciales para el desarrollo de un pueblo, ciudad y nación; sin embargo, estas producen enormes cantidades de agua residual. En nuestro país, el sector productivo, minería, industria, agricultura, ganadería, etc., generan aproximadamente 2118.50 millones de m³/año de agua residual (ANA, 2016).

La contaminación hídrica ha ido creciendo y posicionándose como uno de los principales problemas ambientales en nuestro país, alterando el equilibrio ecológico de los cuerpos de agua. Así el agua residual que proviene de la industria de carne procesada y del beneficiado de ganado vacuno, ovino y porcino en los mataderos municipales, es considerada como la principal fuente de contaminación de los sistemas acuáticos (FAO, 2017). Es por ello que proporcionar agua limpia a una población en constante crecimiento, es actualmente un gran desafío desde los puntos de vista ambiental, social y económico.

Hoy en día existen una serie de tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales, que están basados en los procesos

electroquímicos, entre ellos encontramos la técnica de electrocoagulación, esta surge como una alternativa interesante para el tratamiento de efluentes de todo tipo. Son muchas las ventajas de esta técnica, como el requerir de equipos simples y de fácil operación, elimina la necesidad de almacenamiento, uso de productos químicos y presenta una alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes (BARBOZA, 2011)

En la ciudad de Tingo María la principal actividad económica es el comercio. La ciudad cuenta con un matadero municipal, único proveedor de carnes rojas, que dispone sus aguas residuales directamente al río Huallaga, perturbando el ecosistema acuático e influyendo negativamente sobre la salud de las personas que utilizan este recurso hídrico.

Por lo argumentado, una solución a este problema es la aplicación de electrocoagulación, tecnología de poca o nula aplicación en nuestro país, que tiene como ventajas, no usar coagulantes (como el sulfato de aluminio o polímeros sintéticos), ya que estos se forman durante el proceso, es de fácil operación, y efectivo en la reducción de diversos contaminantes.

En ese orden se planteó el problema: ¿Será posible remover la carga contaminante del efluente del matadero municipal de Tingo María mediante el uso de la técnica de electrocoagulación?, asumiendo que el empleo de la técnica de electrocoagulación remueve la carga contaminante del efluente del matadero municipal de Tingo María.

Objetivos

Objetivo General

- Evaluar el efecto de la electrocoagulación como reductor de la carga contaminante del efluente del matadero municipal de Tingo María.

Objetivos específicos

- Caracterizar el efluente del matadero municipal de Tingo María.
- Determinar el efecto de la intensidad de corriente en la reducción de carga contaminante, por medición de los siguientes parámetros: DBO₅, coliformes y sólidos; como también pH, conductividad y temperatura.
- Determinar el porcentaje de eficiencia de reducción de la carga contaminante del efluente del matadero municipal de Tingo María mediante la aplicación de la técnica de electrocoagulación.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

MIRANDA (2015), realizó un trabajo de investigación en el camal municipal de Tingo María, donde estudió el efecto que produce el tiempo de retención hidráulico y flujo de aire en lodos activos para tratar las aguas residuales del matadero. Evaluó tres tiempos de retención (2, 3 y 4 horas) con tres flujos de aire (4, 8 y 12 L/min). Asimismo, para determinar la eficiencia del tratamiento, evaluó los siguientes parámetros (DBO₅, sólidos suspendidos (SS), pH y temperatura). Como resultado, obtuvo un porcentaje de eficiencia de 72 % en la reducción de la DBO₅ a 2 horas de tiempo de retención. Y aproximadamente 66 % en la remoción de sólidos suspendidos a 4 horas. El autor afirma que cada vez que el tiempo de retención es mayor, menor será la concentración de sólidos suspendidos, por lo tanto la eficiencia del proceso será mejor.

SALAZAR (2015) en su trabajo de investigación titulado “Diseño de un biorreactor aerobio para el tratamiento de las aguas residuales del matadero municipal de Tingo María”. El autor desarrolló cuatro biorreactores aerobios de lodos activos a escala laboratorio, con diferentes concentraciones de biomasa (1500, 2500, 3500 y 4500 mg/L), considerando que a mayor concentración de

biomasa, mayor eficiencia. El cuarto biorreactor (144 m³ de capacidad) obtuvo mejores resultados a comparación de los primeros tres, logrando eficiencias del 92 % en DBO₅ y 98 % en sólidos totales.

2.2. El agua

El agua es un recurso natural importante para los seres vivos, ya que todos lo utilizan como medio fundamental para el funcionamiento del metabolismo.

El agua es el disolvente natural más abundante e importante, y por lo mismo lleva en disolución diversas sustancias.

Es indispensable para la mayoría de actividades que desarrolla el ser humano, entre estas están: generación de energía eléctrica, explotaciones piscícolas, navegación, silvicultura, minería y recreación (JARAMILLO, 2012).

2.2.1. Calidad de agua

La calidad del agua ha de definirse en relación con el uso o actividad a que se le quiere dedicar, y por ello no podemos hablar de “buena” o “mala” calidad en abstracto, sino que cada actividad exige una calidad adecuada (BARBOZA, 2011).

Para definir la calidad de una corriente o una fuente del agua es necesario basarse en parámetros de calidad los cuales se clasifican en hidrológicos, físicos, químicos y biológicos. En cuanto a los parámetros físicos es importante tener en cuenta que no son índices absolutos de contaminación y sus valores normales pueden variar considerablemente (JARAMILLO, 2012).

Para evaluar los cambios en la calidad del agua, empleamos parámetros físicos, químicos y biológicos. A estos parámetros se les denomina indicadores de calidad del agua (BARBOZA, 2011). Los indicadores de calidad de las aguas se basan en el estudio de los mencionados y se llevan a cabo mediante toma de muestras de los cuerpos de agua (PRIETO *et al*, 2012).

Estos métodos dan información valiosa, pero se refieren únicamente al instante en que se obtuvo la muestra; por tanto, pueden dar resultados muy alarmantes o, al contrario, pasar desapercibidos. No indican el estado anterior al de la toma de muestras ni la capacidad de recuperación natural después de un aporte contaminante, tanto en el tiempo como en el espacio. Algunos tipos de indicadores físico-químicos son el color, la turbidez, el pH, la presencia de sistemas coloidales y de sustancias disueltas, suspendidas, totales, sedimentables y volátiles (PRIETO *et al*, 2012).

2.2.2. Parámetros fisicoquímicos y biológicos de calidad de agua

2.2.2.1. Temperatura

La temperatura del agua es un parámetro muy importante ya que influye en la solubilidad del oxígeno (un aumento de 10°C disminuye la solubilidad del oxígeno en un 20%), lo que tiene un gran efecto sobre los seres vivos que puede contener, sobre la velocidad de las reacciones químicas y bioquímicas y en sus posibilidades de utilización. Por tanto, un cuerpo de agua cuya temperatura sea unos 10 – 15 °C superior a su valor medio normal podría considerarse como “térmicamente contaminada” (BARBOZA, 2011).

2.2.2.2. pH

Es un término usado para expresar el grado de acidez o alcalinidad de una solución. Es un parámetro de interés en la caracterización de un cuerpo de agua, su variación indica las alteraciones producidas por agentes extraños (BARBOZA, 2011).

2.2.2.3. Conductividad

Es la expresión numérica de la capacidad del agua para transmitir la corriente eléctrica. Depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación. (BARBOZA, 2011).

Esta medida indica la facilidad con la que la corriente eléctrica pasa a través del agua residual. “Puesto que el agua pura es muy mala conductora de la corriente eléctrica, las conductividades elevadas indican la presencia de impurezas, y más concretamente de sales disueltas” (VEINTIMILLA, 2015). La medida de la conductividad resulta muy útil para detectar descargas procedentes de algunas industrias alimentarias y químicas. Además, la conductividad informa sobre la posibilidad de usar el agua residual tratada para riegos, ya que muchas plantas son sensibles al contenido en sales disueltas, y la exposición del terreno a riegos prolongados con aguas muy conductoras puede dar lugar a su inutilización como terreno de cultivo (HERNANDEZ, 2016).

Normalmente, entre mayor sea la concentración de sales disueltas en una solución acuosa, mayor será la conductividad; sin embargo cuando la

solución se satura, se restringe la libertad de movimiento, y la conductividad tiende a disminuir en lugar de aumentar (GARCIA, 2007).

2.2.2.4. Sólidos totales

El término de sólidos totales (ST) se refiere a la materia que permanece como residuo después de evaporación y secado de 103 a 105 °C (BARBOZA, 2011).

Los sólidos totales incluye la materia suspendida o no filtrable que representa aquella porción de sólidos retenidos después de proceso de filtración (CORDERO y MANRIQUE, 2009).

La presencia de sólidos suspendidos suele ser indeseable en muchos procesos de tratamiento. La separación de estos sólidos suelen hacerse mediante operaciones mecánicas; muchas veces para favorecer esa separación, se utilizan aditivos químicos, denominándolos así como tratamientos físico-químicos (PRIETO *et al*, 2012). En muchos casos parte de la materia en suspensión puede estar formada por partículas de muy pequeño tamaño ($10^{-6} - 10^{-9}$ m), lo que conforma una suspensión coloidal, también llamados sólidos coloidales. Estas suspensiones coloidales suelen ser muy estables, debido a interacciones eléctricas entre las partículas. Por tanto tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento tradicional (PRIETO *et al*, 2012)

2.2.2.5. Demanda bioquímica de oxígeno

Es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación de la materia orgánica en las muestras de agua.

Mide el oxígeno requerido por los organismos en sus procesos metabólicos al consumir materia orgánica presentes en las aguas residuales. Cuanto mayor sea el valor de este parámetro, más contaminada estará el agua (BARBOZA, 2011)

La DBO₅ Es la única prueba que se aplica y da una medida de la cantidad de materia orgánica biológicamente oxidable presente en la muestra, esta determinación es usada en estudios para medir la capacidad de purificación del curso de agua y para analizar la calidad del efluente (BARBOZA, 2011).

La DBO₅ es el parámetro más usado para evaluar los procesos de tratamiento y para fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras (JARAMILLO, 2012).

2.2.2.6. Coliformes

Los Coliformes son microorganismos bacilos gram negativos no esporulados, aerobios o anaerobios facultativos que fermentan la lactosa con producción de ácido y gas, aunque algunos pueden ser fermentadores tardíos o no fermentadores (CAMACHO *et al.*, 2009).

Son el número más probable (NMP) de unidades bacterianas y microorganismos del grupo Coliforme que se encuentran por cada 100 mL de agua. Dentro de este grupo se encuentran los coliformes fecales o *E. coli*, que tradicionalmente se los ha considerado como indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua (BARBOZA, 2011). Pueden transmitirse enfermedades por medio de estos organismos patógenos presentes en el agua residual (AGUILAR, 2015)

2.3. Faenado de animales de abasto

Es el proceso de sacrificio de animales para la obtención de carne. Los establecimientos donde se lleva a cabo el proceso de obtención de carne para consumo humano son denominados mataderos o camales municipales.

2.3.1. Procesos para el faenado de animales de abasto

2.3.1.1. Recepción y descanso

Luego del arribo de los animales al matadero, éstos pasan a los corrales de descanso por lo menos con 12 horas de antelación a su sacrificio (SIGNORINI *et al.*, 2006)

2.3.1.2. Inspección ate-mortem

La verificación sanitaria previa al sacrificio asegura que en la producción de carne para consumo humano sólo se acepten animales aparente o clínicamente sanos (SIGNORINI *et al.*, 2006).

2.3.1.3. Bañado

La importancia sanitaria del bañado de los animales antes del sacrificio radica, principalmente, en la eliminación o reducción de la suciedad presente en el cuero de los mismos (restos de excremento, orina, alimento, secreciones, ectoparásitos, etc.) que evita que, al momento del sacrificio, haya una contaminación excesiva tanto de las instalaciones como de las canales o de la sangre para consumo humano o industrial (SIGNORINI *et al.*, 2006)

2.3.1.4. Aturdimiento

Lugar donde se insensibiliza a los animales para permitir un adecuado beneficio (SIGNORINI *et al.*, 2006)

2.3.1.5. Sacrificio

Tras aturdir al animal se procede al sacrificio mediante un corte contundente (SIGNORINI *et al.*, 2006)

2.3.1.6. Desollado

En esta etapa se separan las patas y se procede al desollado, retirar la piel o cuero de las carcasas (SIGNORINI *et al.*, 2006)

2.3.1.7. Remoción de cabeza

Se remueven las cabezas de los ganados. En los cerdos, la cabeza no debe ser removida hasta que la canal haya sido verificada para la detección de cisticercos. La cabeza debe ser limpiada y lavada para su verificación (SIGNORINI *et al.*, 2006)

2.3.1.8. Eviscerado

Consiste en la higienización de las vísceras. La evisceración se realiza inmediatamente después del desollado (SIGNORINI *et al.*, 2006)

2.3.1.9. Escaldado, depilado y chamuscado (cerdos)

Con el objetivo es ablandar la piel para facilitar el depilado, los animales son introducidos 5 minutos aproximadamente en un tanque de escaldado con agua, a una temperatura de 60°C.

En los mataderos municipales el agua para el escaldado se encuentra siempre en ebullición (SIGNORINI *et al.*, 2006)

2.3.1.10. Inspección post-mortem

La inspección de carnes es integral, abarcando todos los aspectos higiénico-sanitarios de los productos cárnicos y sus derivados, desde la producción hasta su comercialización (SIGNORINI *et al.*, 2006)

2.3.2. Contaminación generada por el faenado de animales

La contaminación en los procesos de faenado generalmente es por agua residual. Los efluentes contienen sangre, excremento, contenido ruminal o estomacal, grasa, plumas y huesos. Estas aguas residuales, vertidas directamente en los cuerpos de agua, generan un ambiente propicio para el desarrollo de vectores capaces de incubar y multiplicar en su cuerpo microorganismos que, posteriormente, podrían ser la causa de enfermedades en ser el humano (SIGNORINI *et al.*, 2006). Cuando el agua residual contiene

una cantidad alta de materia orgánica, es propicia para el desarrollo de microorganismos patógenos (*Salmonella* spp., *Shigella* spp.), además de contener, entre otros elementos, huevos de parásitos, quistes de protozoarios, así como el cloro (limpieza de instalaciones), salmuera, entre otros. Resultando ser un contaminante potencial del suelo y el agua, en el que proliferan los malos olores por la descomposición de la materia orgánica (SIGNORINI *et al.*, 2006).

La cantidad de contaminantes que una planta de sacrificio o matadero produce, depende del tipo y cantidad de especies faenadas, así como de los residuos que se desechen y el tipo de tecnología empleada, entre otros factores (SIGNORINI *et al.*, 2006). Las aguas residuales se pueden caracterizar de manera general por especie de acuerdo al siguiente Cuadro.

Cuadro 1. Caracterización de agua residual de una planta de sacrificio

Parámetro (unidad)	Especies Faenadas		
	Porcinos	Bovinos	Aves
DBO ₅ (mg/l)	1250	2000	1550
DQO o COD (mg/l)	2500	4000	2500
Sólidos suspendidos (mg/l)	700	1600	ND
Nitrógeno total (mg/l)	150	180	150-400
Fosforo total (mg/l)	25	27	16-50
Grasa (mg/l)	150	270	ND
pH.	7.2	7.2	ND

Fuente: COWI y UNEP, 2000

El Programa de la Naciones Unidas para el ambiente COWI y UNEP (2000), en su guía titulado “Producción más limpia en el procesamiento

de Carne” afirman que el volumen de efluente generado en los mataderos son un reflejo del volumen de agua utilizada, del 80 al 95% del agua utilizada se desecha; sin embargo, otros estudios sugieren un rango de 97% al 100%, pues consideran como producto de desecho el agua contaminada que se evapora y la que se utiliza en la manufactura de subproductos (SIGNORINI *et al.*, 2006).

2.4. Electrocoagulación

La técnica de electrocoagulación (EC) para el tratamiento de los efluentes de mataderos no se encuentra muy estudiada o sencillamente no existe, sin embargo, existe bibliografía referente al tratamiento de aguas residuales procedentes de las industrias textiles, lácteas, curtiembre, entre otras, del cual daremos cuenta. La bibliografía también detalla sobre la estructura de las celdas de electrocoagulación y los factores que en ella influyen.

2.4.1. Fundamentos de la electrocoagulación

La electrocoagulación es un 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. (RESTREPO *et al.*, 2006)

El reactor electroquímico se compone de un depósito en el que se han sumergido dos electrodos (él ánodo o electrodo de sacrificio) y el cátodo o electrodo inerte), conectados a una fuente de alimentación (MARTINEZ, 2007).

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que estabiliza las moléculas contaminantes. Es así que los contaminantes presentes en el medio acuoso forman agregados, produciendo partículas sólidas que son menos coloidales y menos emulsificadas (o solubles). Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan, pudiendo removerse fácilmente por algún método de separación tipo secundario (RESTREPO *et al.*, 2006).

El agua sometida a una electrólisis se ve favorecida por la presencia de sales en disolución, que posibilitan la conducción de electricidad y que están presentes en todas las aguas residuales e industriales (CHAVEZ *et al.*, 2009).

RAMIREZ (2013) afirma que en un proceso de electrocoagulación se produce un desprendimiento de hidrógeno y oxígeno gaseoso en sus respectivos electrodos, estos gases al ascender a la superficie provocan tres fenómenos:

- Separación rápida de coloides, que evita que el electrodo se ensucie.
- Arrastre de sólidos desestabilizados a la superficie, los cuales forman una nata que posibilita una extracción por sedimentación clásica o por flotación.
- Debido a las microburbujas de gas se producen corrientes ascendentes y descendentes de la solución que ocasionan una mejor superficie de contacto y provocan un aumento en la eficiencia de desestabilización. Esta agitación “espontánea” evita la “mecánica”.

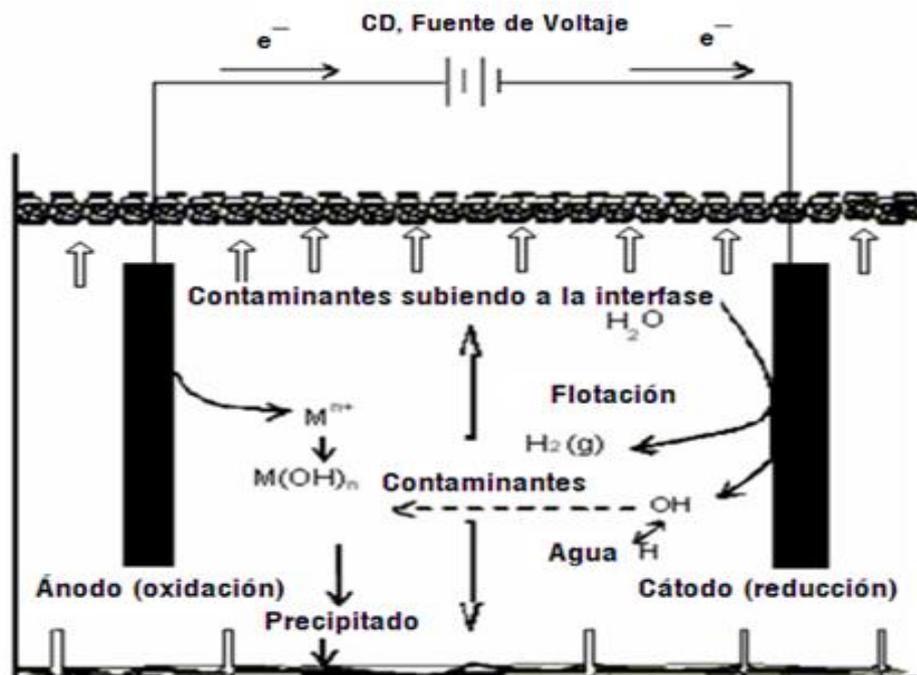
Estas microburbujas, que obviamente son inicialmente moleculares, se adhieren a las minúsculas partículas contaminantes presentes en la solución a tratar, provocando un proceso de flotación que transporta a la superficie, en forma de espuma compacta, a todas las sustancias contaminantes, que por su densidad, o por sus reducidas dimensiones son difíciles de precipitar y permanecen en suspensión (JARAMILLO, 2012).

2.4.2. Fases de la electrocoagulación

MARTINEZ (2007), menciona que el proceso de electrocoagulación presenta las siguientes fases:

- **Fase de desestabilización:** consiste en la neutralización de las cargas eléctricas.
- **Fase de coagulación:** consiste en la formación de partículas suspendidas de mayor tamaño a partir de las micropartículas desestabilizadas.
- **Fase de floculación:** consiste en el fenómeno de adsorción de pequeños flóculos presentes dentro de la solución, formado en la fase de coagulación. Esta fase da lugar a la formación de partículas de mayor tamaño.
- **Fase de flotación/sedimentación:** los gases liberados en el cátodo y en el ánodo (oxígeno e hidrogeno respectivamente) promueven la aglomeración y migración a la superficie de los flóculos de baja densidad. Al mismo tiempo se favorece la sedimentación de los flóculos

de mayor peso y tamaño. (Koren y Syversen, 1995; citado por MARTINEZ, 2007).



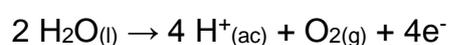
Fuente: MOLLAH *et al.*, 2004

Figura 1. Proceso de electrocoagulación

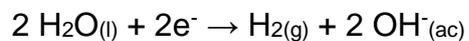
2.4.3. Reacciones presentes en el proceso de electrocoagulación

GILPAVAS, *et al.* (2008) afirma que en una celda simple de electrocoagulación donde solo hay un ánodo y un cátodo los cuales son hechos de un metal "M", se presentan en general las siguientes reacciones electroquímicas

En el ánodo se presentan las siguientes reacciones de oxidación:



En el cátodo se presentan las siguientes reacciones de reducción:

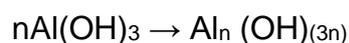
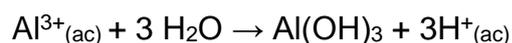
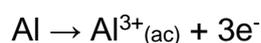


BARBOZA (2011). Afirma que los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son aluminio y hierro, porque ambos metales generan hidróxidos insolubles, probados extensamente como agentes coagulantes de una gran variedad de componentes del agua natural.

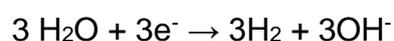
En el caso de que los electrodos sean de Aluminio, la disolución del ánodo produce especies como Al^{3+} , $Al(OH)_2^{+}$ los cuales producen espontáneamente los respectivos hidróxidos o polihidróxidos; estos dependen del pH de la solución iónica. Los hidróxidos y polihidróxidos formados en estas reacciones electroquímicas tienen una gran afinidad por partículas dispersas e iones, lo que permite la coagulación. Y los gases formados son los que realizan la flotación (GILPAVAS, *et al.*, 2008).

RESTREPO *et al.* (2006) muestra el siguiente mecanismo general:

En el ánodo:



En el cátodo:



“Los iones Al^{3+} en combinación con los OH^- reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^+$, y otras poliméricas tales como $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ y $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$, como se muestra en la reacción del ánodo. El $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades adsorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes” (RESTREPO *et al.*, 2006).

2.4.4. Factores que afectan el proceso de electrocoagulación

El proceso de electrocoagulación es afectado por diferentes factores. Entre los más importantes se encuentran la naturaleza y concentración de los contaminantes, el pH del agua residual y la conductividad. Estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante (RESTREPO *et al.*, 2006).

2.4.4.1. pH.

El pH influye en la formación del coagulante. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación, esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. Este puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. Cuando la conductividad es alta, el efecto del pH no es significativo. (RESTREPO *et al.*, 2006). El incremento de pH a condiciones ácidas ha sido atribuido a la reacción del hidrógeno en el

cátodo dada por $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ (ARANGO, 2005). En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso (RESTREPO *et al.*, 2006).

Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH, e incluso este rango puede ser amplio. En términos generales las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7 (RESTREPO *et al.*, 2006). No obstante a pH neutral el consumo de energía es alto, debido a que hay variación de la conductividad (ARANGO, 2005).

Las reacciones que se dan durante el proceso de electrocoagulación le dan al medio acuoso capacidad buffer. Especialmente en aguas residuales alcalinas, esta propiedad previene grandes cambios de pH, con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH (RESTREPO *et al.*, 2006).

2.4.4.2. Densidad de corriente

La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del medio acuoso, el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso (RESTREPO *et al.*, 2006).

La densidad de corriente o la carga eléctrica aplicada son algunos de los parámetros a optimizar en el proceso de coagulación asistida electroquímicamente, ya que determinan la cantidad de metal (Mn^{+}) que se libera en el sistema: altas densidades de corriente permiten unidades de electrocoagulación más pequeñas (RESTREPO *et al.*, 2006).

En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura (RESTREPO *et al.*, 2006). Además, que hay mayor probabilidad que se presente la pasivación de los electrodos a mayor densidad de corriente (DESHPANDE *et al.*, 2010).

CHEN (2004), recomienda el empleo de densidades de corriente inferiores a 20-25 A/m² para el buen funcionamiento del proceso de electrocoagulación.

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción (RESTREPO *et al.*, 2006).

La densidad de corriente empleada en el reactor determina la cantidad de burbujas generadas en los electrodos. Se ha podido observar de la experimentación que a bajas corrientes se producen bajas densidades de

burbujas, obteniéndose un bajo “flux de momentum” hacia arriba que hace que predomine la sedimentación sobre la flotación. Situación contraria se presenta cuando se aumenta la corriente, pues la densidad de burbujas aumenta resultando en un aumento del “flux de momentum” hacia arriba, favoreciendo la flotación de las partículas contaminantes (RESTREPO *et al.*, 2006).

2.4.4.3. Conductividad

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado. Para algunas conductividades del medio acuoso, el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad (RESTREPO *et al.*, 2006).

2.4.4.4. Temperatura

La velocidad de las reacciones electroquímicas aumenta cuando la temperatura de la disolución aumenta. La razón podría ser que al aumentar la temperatura aumenta la movilidad y las colisiones de los iones. Además, aumentando la temperatura se facilita la generación del radical oxhidrilo debido al aumento de la transferencia de masa de las diversas especies con la temperatura, y esto conduce a un incremento de la reacción de los radicales con el agente contaminante (ARBOLEDA y HERRERA, 2015).

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, punto donde se hace máxima para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo (RESTREPO *et al.*, 2006).

2.4.4.5. Tiempo de residencia y operación

Algunos autores indican que el tiempo de residencia determina que a mayor valor, mayor es la cantidad de sólidos formados, debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como la floculación y precipitación de los sólidos. Se producen más gases, que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación. Un pequeño cambio del tiempo representa una gran influencia en la cantidad de sólidos obtenidos. Sin embargo estos mismos autores señalan que sus variaciones resultan estadísticamente menos significativas que las variaciones de pH, ya que éste, está muy vinculado a la constante del producto de solubilidad (Kps) la cual debe de disminuir al elevarse el mismo, lo que significa que los sólidos son más insolubles y por tanto se obtiene una mayor precipitación de los mismos en la medida que el pH aumenta (PRIETO *et al.*, 2012).

2.4.4.6. Material del electrodo

En la electrocoagulación con ánodos de sacrificio, la selección del material del electrodo va a depender de la naturaleza y afinidad que tenga el

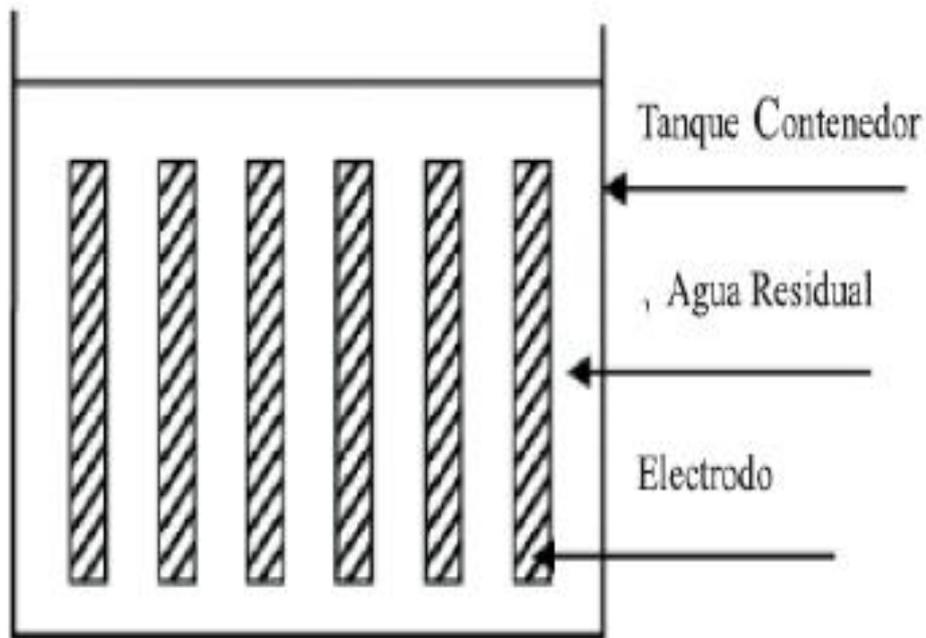
contaminante que se pretende remover con el coagulante producido, es decir, si se quiere remover material suspendido, el coagulante debe propiciar una desestabilización de los coloides para que éstos se aglutinen y posteriormente sean separados por precipitación. En el caso de elementos disueltos se busca que el coagulante los adsorba o los retenga mediante algún mecanismo fisicoquímico. Cuando se trata de electrodos inertes como el acero inoxidable, el titanio, platino, níquel, grafito, etc., el mecanismo de remoción es debido a que se presenta una reducción electroquímica del agua en el cátodo incrementándose el pH propiciando la formación de sales básicas poco solubles e hidróxidos de metales polivalentes que precipitan. Es oportuno mencionar, que la superficie de las placas de los electrodos empleados en la electrocoagulación, se deben lavar regularmente dado que, si se forman capas de óxido, los electrodos se pueden pasivar, disminuyendo la eficacia del tratamiento (ARBOLEDA y HERRERA, 2015).

2.4.5. Celdas de electrocoagulación

Un reactor o celda de electrocoagulación en su forma más simple tiene un ánodo y un cátodo, los cuales están conectados a una fuente de poder externa. Cuando el potencial es aplicado, el material del ánodo es oxidado, mientras el material del cátodo es reducido (GILPAVAS *et al.*, 2008).

Existen muy pocos tipos de reactores empleados en aplicaciones de recuperación de metales y remoción de contaminantes, los diseños más básicos son tanques de celdas, celdas en marco y plato, celdas rotativas,

sistemas complicados de reactores tridimensionales como lecho fluidizado, celdas de lecho empacado o celdas empacadas con carbono poroso (CORDERO Y MANRIQUE, 2009).



Fuente: JARAMILLO *et al.*, 2005

Figura 2. Estructura de una celda de electrocoagulación

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar (RESTREPO *et al.*, 2008).

Si analizamos el reactor tipo batch, encontramos que este debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene

también la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas. En investigaciones anteriores se ha observado que cuando en un reactor se usan dos placas, una como ánodo y otra como cátodo, no se presenta una buena disolución de iones metálicos. Para mejorar esta disolución se debe aumentar el área superficial de los electrodos, lo cual se logra aumentando el número de placas, disponiéndolas en serie en forma paralela monopolar o bipolar (RESTREPO *et al.*, 2008).

Una segunda clasificación de los reactores está dada en función de la flotación. Una vez que el contaminante ha sufrido el proceso de coagulación existen dos formas de separarlo del medio acuoso, a saber: flotación y sedimentación. Así pues, los reactores pueden diseñarse como reactores con sólo coagulación, o con coagulación y flotación (RESTREPO *et al.*, 2006).

El sistema para la electrocoagulación requiere de una fuente de corriente directa, un regulador de densidad de corriente y de un multímetro para leer los valores de corriente (AGUILAR, 2015). En estos sistemas existen cuatro tipos de conexiones.

a) Monopolar

Los electrodos están conectados en paralelo y sometidos al mismo potencial, lo cual genera mayor gasto de energía (AGUILAR, 2015).

b) Paralelo

En la disposición monopolar en paralelo la corriente eléctrica se reparte entre todos los electrodos en relación a la resistencia de las celdas individuales (AGUILAR, 2015).

c) Serie

En a disposición de electrodos monopolares en serie, cada par de electrodos de sacrificio " está conectado internamente uno con el otro, y no tiene interconexiones con los electrodos externo. Esta disposición de electrodos monopolares con celdas en serie es eléctricamente similar a una única célula con muchos electrodos e interconexiones. Para la disposición en serie de electrodos, se requiere una diferencia de potencial más alto se requiere para una corriente dada porque las celdas conectadas en serie tienen una mayor resistencia (AGUILAR, 2015).

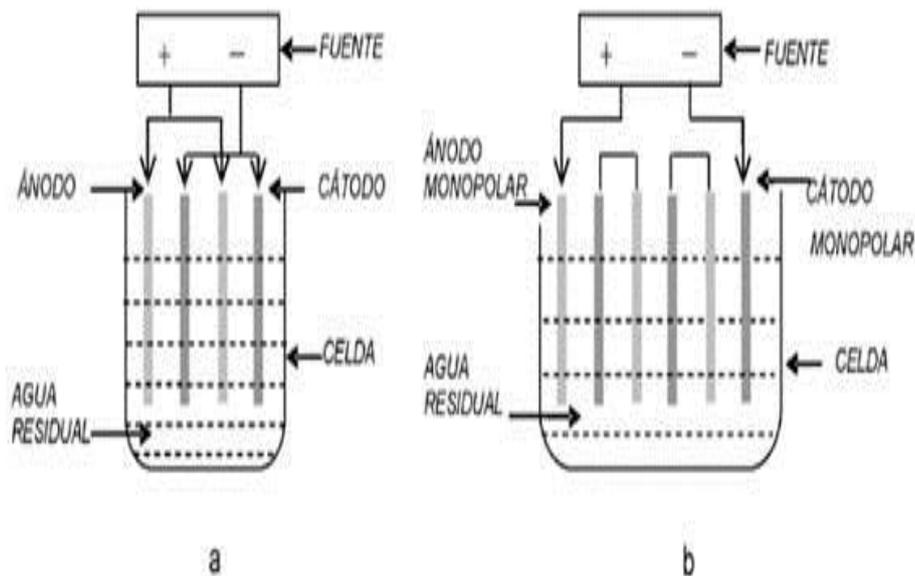
d) Bipolar

La configuración bipolar trabaja a menor intensidad y mayor voltaje que la monopolar. Las celdas bipolares tienen la ventaja de la sencillez de su disposición, ya que sólo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño. Sin embargo, el elevado potencial entre los electrodos alimentadores también origina que una parte de corriente fluya a través de la disolución causando un "by pass" de corriente a los electrodos bipolares y produciendo por tanto pérdidas de corriente, lo que debe ser tenido en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de electrodos (AGUILAR, 2015).

Los reactores se pueden clasificar en unidades de flujo horizontal y vertical.

Esta disposición puede tener importancia cuando se pretende aprovechar el movimiento provocado por el oxígeno y el hidrógeno generados

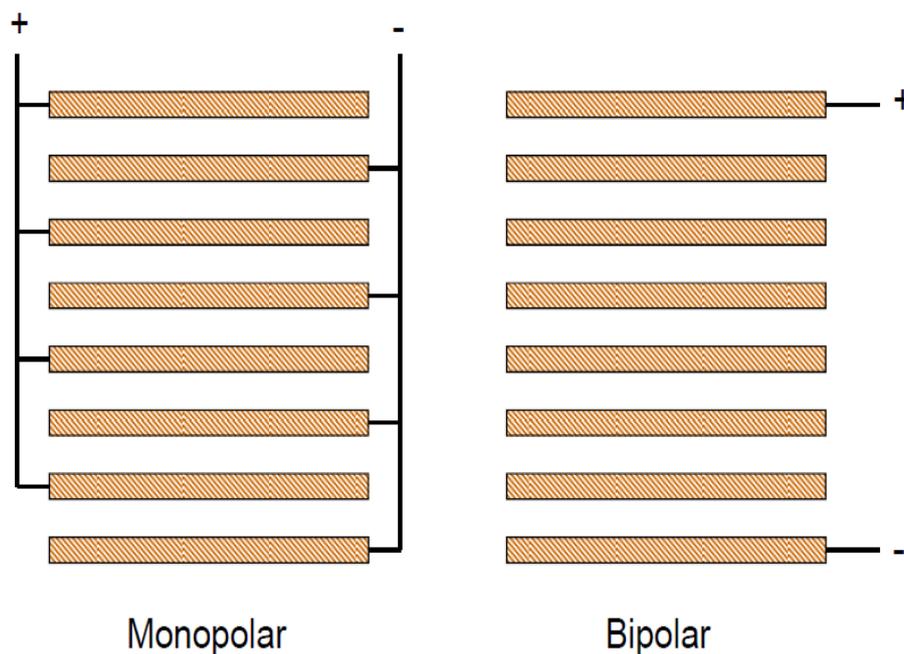
en los procesos anódicos y catódicos de oxidación y reducción del agua, respectivamente.



Fuente: RESTREPO *et al.*, 2006

Figura 3. Reactores para electrocoagulación tipo batch: (a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo, (b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie.

Además, en función del modo de circulación del agua a tratar entre los electrodos, se pueden encontrar celdas de canales múltiples o bien de un sólo canal, tal y como se observa en la Figura 4. La ventaja de las celdas de canales múltiples se encuentra en la sencillez de su disposición. Sin embargo debido al pequeño caudal de electrolito en cada uno de los canales, esta disposición puede favorecer el fenómeno de pasivación de los electrodos. (CHEN, 2004).



Fuente: PIÑA *et al.*, 2011

Figura 4. Arreglo de electrodos

2.4.6. Aplicación de la electrocoagulación

El primer uso de la electricidad para el tratamiento de agua fue propuesto en el Reino Unido en 1889; a partir de este momento se fueron desarrollando diferentes técnicas electroquímicas que se han establecido principalmente como tecnologías para la recuperación de metales, tratamiento de efluentes con presencia de metales pesados y tratamiento para agua de consumo (CHEN, 2004).

La electrocoagulación empleando electrodos de aluminio y hierro fue patentada en Estados Unidos en 1909. Se realizaron trabajos con aguas residuales de textiles usando electrodos de hierro y aluminio donde concluyeron que la demanda química de oxígeno (DQO) y la eficiencia de

remoción de turbidez están influenciadas por la conductividad y pH de las aguas residuales, así como por las variables del proceso: densidad de corriente y tiempo de operación (Kobyta *et al.*, 2003; citado por BARBOZA, 2011).

Asimismo, se usaron celdas de electrocoagulación batch, con electrodos de Al-Ti, para la remoción de materia orgánica de aguas residuales procedentes de un restaurant, determinando valores óptimos de pH menores a 4 (Chen *et al.*, 2000; citado por BARBOZA, 2011).

ARANGO y GARCES (2007), diseñaron una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea, utilizaron electrodos de hierro y aluminio con 2 cm de distancia entre estos. A 20 min de operación con pH = 7.5, con electrodo de aluminio y densidad de corriente = 32.43 A/m² obtuvo 42.70% de remoción de DQO; con electrodo de hierro obtuvo 47.60% de remoción. Más tarde, JARAMILLO (2012) diseñó y construyó un reactor de electrocoagulación con electrodos de hierro, para el estudio del tratamiento del agua residual de tintura y acabado textil, logrando remociones de: 20% en sólidos suspendidos, 40% en DQO y 65% en DBO₅; en ensayos tipo batch.

BARBOZA (2011), en su investigación titulada “Reducción de la carga de contaminantes de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá, Ayacucho, empleando la técnica de electrocoagulación”. Logró resultados alentadores en la reducción de turbidez, coliformes, dureza y DBO₅. Durante la aplicación de 25 minutos de electrocoagulación a las muestras de agua, utilizando electrodos de aluminio y acero inoxidable, con densidad de

corriente de 12,5 mA/cm² y 21 - 23 V, con pH de 7,33 - 7,34 permitió obtener 94,65% de remoción de turbidez, 65,1 % de remoción de coliformes fecales y 64,8 % de disminución de DBO₅. Y a 45 minutos de tratamiento logro disminuir hasta 89.5% de DBO₅ y 93% de coliformes fecales.

Asimismo, también se empleó la técnica de EC para la remoción de arsénico en celdas de electrocoagulación tipo batch de un solo ánodo y un solo cátodo, donde la relación de electrodos Al-Fe y Fe-Fe permitieron la remoción del 99.6 %, de arsénico y los electrodos Al-Al redujeron en un 97.2% la concentración del contaminante. Al mismo tiempo se realizaron investigaciones sobre la remoción de Ni, Cu y Zn en una celda de electrocoagulación batch, determinando que la remoción aumentó con el tiempo de residencia, y que la alta densidad de corriente presenta altos niveles de remoción en menor tiempo (Gomes, *et al.* 2007; Mouedhen *et al.* 2007; citado por GILPAVAS *et al.*, 2008).

DAVILA *et al.* (2009), en su investigación denominada: “Reducción de demanda química de oxígeno, carbono orgánico total y sólidos totales en vinazas mediante electro-flotación / oxidación”, evaluaron diversos tipos de electrodos (hierro, aluminio y acero galvanizado) adicionando NaCl y/o H₂O₂. Concluyeron que el material utilizado influye en la eficiencia del proceso, puesto que implica el desarrollo de diferentes procesos como flotación, coagulación y oxidación. El acero galvanizado presentó el mejor desempeño (59% remoción de ST a pH inicial 10.5 y concentración H₂O₂ = 60 ppm).

Se ha aplicado la electrocoagulación para la remoción de diversos contaminantes. En muchos casos se hace una combinación de esta técnica

con flotación promovida también por electrólisis (electroflotación), cuya finalidad es aumentar la eficiencia de remoción del contaminante. Esto se realiza en un proceso en la misma celda, o en celdas consecutivas (Morantes, 2002; Jiang, 2002; citado por PRIETO *et al.*, 2012). Una de las aplicaciones más conocidas y populares de la electrocoagulación ha sido el tratamiento de aguas residuales de la industria de galvanoplastia y electroplateado metálico, proceso que busca remover la carga de metales solubles en las descargas de una industria por demás contaminante (Adhoum *et al.*, 2004; citado por PRIETO *et al.*, 2012).

La industria metalúrgica, la de producción de cromo, las curtiembres y la industria de fertilizantes, utilizan en sus procesos cromo (+6), elemento de una alta toxicidad. Las descargas de cromo son muy reguladas a nivel mundial y para su remoción se utilizan métodos convencionales que incluyen adsorción, precipitación química y degradación biológica, entre otros. La electrocoagulación combinada con electroflotación ha sido probada como alternativa para la remoción del cromo. Este tratamiento ha permitido obtener aguas tratadas con concentraciones de cromo por debajo de 0.5ppm (Ping, 2005; citado por PRIETO *et al.*, 2012).

La industria mecánica, las refinerías, los talleres de reparación automotriz, el transporte, la distribución y almacenamiento de aceites, producen aguas residuales con altos contenidos de elementos propiamente aceitosos y grasos, que se caracterizan por presentar una gran estabilidad química de sus emulsiones aceite-agua. Esto representa una problemática ambiental importante. La electrocoagulación ha mostrado alta efectividad en desestabilizar dichas emulsiones y la consecuente remoción de los aceites y

grasas (Chem *et al.*, 2002; Bergmann, 2003; Adhoum *et al.*, 2004; citado por PRIETO *et al.*, 2012).

MALAKOOTIAN y YOUSEFI (2009) realizaron una investigación denominada: “La eficiencia del proceso de electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio en la eliminación de la dureza del agua”. Determinaron la eficiencia del sistema a tres diferentes pH (5.3, 7.2 y 10.1), tensiones (5, 10 y 20 V) e intervalos de tiempo (20, 40 y 60 minutos). Lograron un 80.6% de eficiencia en la reducción de dureza con un pH de 7.2, 20 V y 60 minutos; con un pH de 5.3, 20 V y 60 minutos de tratamiento lograron una eficiencia del 47%. Y con un pH básico de 10.1, 20 V y 60 minutos de tratamiento obtuvieron la mayor eficiencia (95.6%).

La electrocoagulación también ha sido utilizada en el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria, estas aguas se caracterizan por altos contenidos de DBO y DQO además de altos porcentajes de grasas. Una investigación realizada con las aguas residuales de los restaurantes de Hong Kong, las cuales fueron tratadas por electrocoagulación y electroflotación, mostró remociones de 99 y 88 % en grasas y DQO respectivamente (Wiblbrett, 2000; citado por PRIETO *et al.*, 2012).

KIRZHNER, ZIMMELS y. SHRAIBER. (2007), realizaron un estudio sobre tratamiento combinado de aguas residuales de bodegas altamente contaminadas, en el utilizaron plantas acuáticas para remover DBO₅ y COD previo tratamiento con electrocoagulación. Trabajaron con electrodos de aluminio, 2.5A y con tiempos de operación de 10 a 40 minutos, se demostró

que a mayores periodos de tratamiento existe mejor eficiencia en la remoción de contaminantes, a 10 minutos se produjo entre 16.4 -27.9% de reducción de la demanda bioquímica de oxígeno y a los 40 minutos se obtuvo 54.2%.

SARALA (2012), en la India, trató las aguas residuales domesticas de la ciudad de Hyderabad con la técnica de electrocoagulación, mediante electrodos de hierro, a diferentes intervalos de tiempo (5, 10,15 y 20 minutos) e intensidades de corriente (0.12A, 0.25A, 0.36A). Determinaron que la máxima eficiencia (90%) para reducir DQO, sólidos totales disueltos y suspendidos fue con 0.25A y 0.36A a 20 minutos de tratamiento.

También ha sido probada en el tratamiento de las aguas residuales de lavanderías, tintorerías e industria textil, obteniendo eficiencias importantes en la remoción de materia orgánica, turbiedad y color (Kobyta *et al.*, 2003; citado por PRIETO *et al.*, 2012). Es importante resaltar que el paso de la corriente eléctrica a través del agua a tratar tiene efecto desinfectante en cuanto que destruye, en porcentajes por encima del 99%, los microorganismos presentes en el agua (Powell *water system*, 2001; citado por PRIETO *et al.*, 2012). Asimismo, se ha venido estudiando la electrocoagulación con buenos resultados en el tratamiento de aguas para consumo humano contaminadas con arsénico, contaminación ésta que puede afectar la salud de la población mundial ya que puede ocurrir en cualquier región o país (Kumar y Rannar, 2004; citado por PRIETO *et al.*, 2012).

Otras posibles aplicaciones de la electrocoagulación están dadas en la remoción de nitratos en aguas superficiales y subterráneas contaminadas

por nitratos lixiviados, procedentes de los fertilizantes artificiales usados en los cultivos. Finalmente, la electrocoagulación también ha sido probada en el tratamiento de aguas cuyos contaminantes son materia orgánica, como DBO en aguas residuales domésticas (Powell wáter system, 2001; koparal *et al.*; Ogutveren, 2002, citados por PRIETO *et al.*, 2012).

La técnica de electrocoagulación también se ha usado para la reducción de *Escherichia coli*. Ghernaout *et al.* (2008) realizaron una investigación sobre la electrocoagulación como “electro desinfección artificial” de las aguas residuales contaminadas con *E. coli* no patógenas, se utilizaron 3 tipos de electrodos (aluminio, acero inoxidable y acero ordinario), del cual el aluminio presentó una mejor eficiencia y sólo se requería de 30 minutos de electrocoagulación para lograr la eliminación total de *E. coli*. El mecanismo principal de actuación fue el cambio en la carga eléctrica de los microorganismos debido al campo eléctrico aplicado y a la presencia del catión metálico, seguido por su flotación y/o sedimentación. Se evaluaron diferentes condiciones operacionales, variando la intensidad de corriente entre 0.25 A y 1 A, con potencial de 2V y 12V. La mayor eficiencia se obtuvo para un tiempo de electrocoagulación de 35 minutos, con intensidades de corriente superiores a 0.5 A (MARIN, 2009).

Santa Clara de Aguas Residuales (SCWW) es una empresa privada de procesamiento y el tratamiento de corrientes de aguas residuales no peligrosos ubicado en el Condado de Ventura y en todo California. Anteriormente esta empresa utilizaba productos químicos para el tratamiento de aguas residuales incluyendo alumbre, cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato

ferroso, y lima. La desventaja inherente asociado con la mayoría de procesos químicos es que son procesos aditivos. SCWW estaba gastando hasta 100.000 dólares por mes en químicos-aditivos para la recuperación de metales pesados. Mediante la instalación de un sistema de electrocoagulación (CE), SCWW fue capaz de reducir sus costos de productos químicos mensuales a 10.000 dólares al mes y al mismo tiempo mejorar el proceso de tratamiento de aguas residuales (NATURAL SYSTEMS, sf)

El tratamiento por electrocoagulación de SCWW se puede utilizar para sustituir el tratamiento químico y reducir / eliminar el uso de polímeros en una estación de depuración. El agua tratada es adecuada para el riego y los bio sólidos adecuados para compost. Esto podría reducir la necesidad de variaciones desviando la descarga típica del océano, ya que mata todos los virus y las bacterias, creando agua en vez tratada adecuada para el riego de jardines. Se puede utilizar como una forma efectiva para tratar el agua potable para eliminar sílice, arsénico, uranio, perclorato, MTBE, virus y bacterias, incluyendo *E. coli* (NATURAL SYSTEMS, sf).

Cuadro 2. Porcentaje de contaminantes eliminados por SCWW mediante EC

Contaminantes	Porcentaje eliminado
DBO	90%
SST	99%
Grasas, aceites	93-99%
Agua de lodos	50-80%
Metales pesados	95-99%
Fosfatos	93%
<i>E. Coli</i>	99.99%

Fuente: NATURAL SYSTEMS, sf

2.4.7. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación

Las ventajas de la electrocoagulación, según MOLLAH *et al*, (2001).

- Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos biológicos y químicos.
- Las celdas de electrocoagulación no requieren de obras civiles importantes para su instalación, en comparación con los sistemas biológicos y químicos que sí lo hacen. Requiere de equipos simples y de fácil operación.
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que disminuye el problema de disposición final de lodos.
- Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada.
- Alta efectividad de remoción en un amplio rango de contaminantes.
- Purifica el agua y permite su reciclaje.
- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.
- El tiempo de residencia del proceso de electrocoagulación es mucho menor en comparación con sistemas biológicos.
- El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en

el caso de ser reusados. Puede generar agua potable, incolora e inodora.

- Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad
- Los flóculos formados por electrocoagulación pueden ser filtrados fácilmente

Las desventajas de la electrocoagulación, según MOLLAH *et al*, (2001).

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
- Puede ser un tratamiento costoso en lugares en las cuales el precio de la energía eléctrica sea alto
- No es efectivo en la remoción de DBO soluble, proveniente de solventes y anticongelantes.
- El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Zona de Estudio

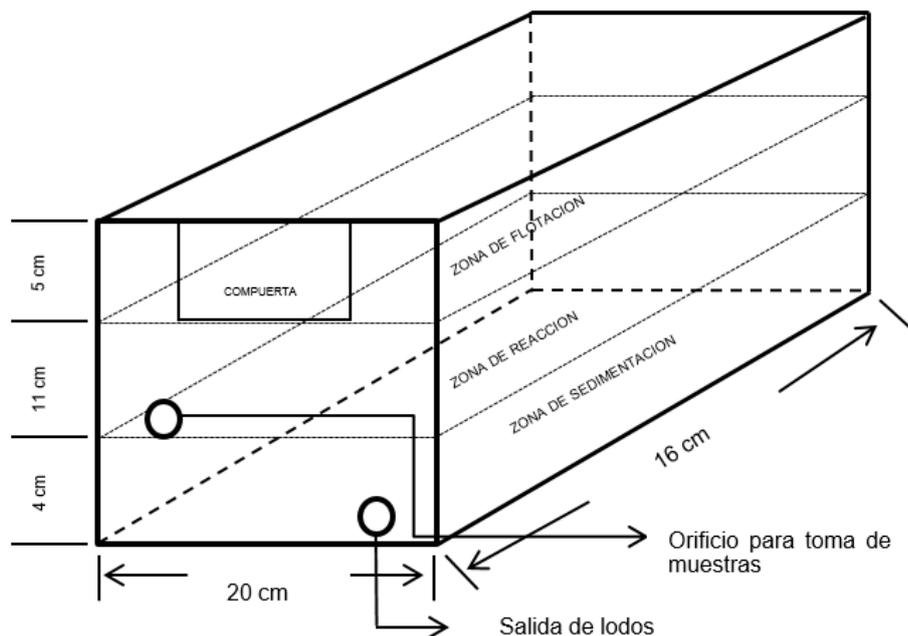
Las muestras de agua residual fueron obtenidas en la zona de descargas del matadero municipal de Tingo María ubicado en las coordenadas UTM 390162E y 8972708S, 18L. Estas fueron analizadas en los laboratorios de química, microbiología y física de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. La construcción de la celda de electrocoagulación se llevó a cabo en el laboratorio de física.

3.2. Construcción de la celda de electrocoagulación

La celda electrolítica se construyó para reducir la carga contaminante del agua residual proveniente del matadero municipal de Tingo María, el diseño se basó en investigaciones anteriores en el ámbito de electrocoagulación, por lo que se decidió trabajar con un sistema que opera como reactor batch (lotes), por ser un equipo sencillo y de fácil operación (ARANGO y GARCES, 2007), se utilizaron placas de aluminio y acero galvanizado, por ser efectivas en el tratamiento de aguas residuales de diferentes características y estar al alcance en el mercado.

3.2.1. Celda de electrocoagulación

La celda electrolítica fue construida según la metodología de ARANGO y GARCÉS (2007), esta contó con capacidad para tratar aproximadamente 4.5 litros de agua residual, mediante un sistema batch que opera por volúmenes, la celda tiene forma rectangular con base inclinada para facilitar la sedimentación, cuyas dimensiones son: 20 cm de ancho, 20 cm de profundidad y 16 cm de largo cuenta con tres zonas, la zona de lodos, la zona de reacción y la zona de flotación. Además, esta cuenta con dos orificios de salida, una en la zona de reacción y otra en la zona de lodos como se muestra en la Figura 5.



Fuente: ARANGO y GARCÉS, 2007

Figura 5. Celda de electrocoagulación

Dentro de la celda, los electrodos fueron sumergidos en su totalidad y dispuestos en paralelo, sostenidos mediante reglas dentadas, con 1 cm de separación uno de otro y conectados a una fuente de corriente directa que posee controles regulables.

3.2.2. Electrodos

Se dispuso el uso electrodos de aluminio y acero galvanizado, por presentar mejores resultados en investigaciones anteriores; así mismo son de fácil acceso en el mercado local.

Los electrodos se diseñaron como placas rectangulares de 11 cm de alto y 16 cm de ancho, con un espesor de 0.2 cm.

El área de cada placa se definió mediante la siguiente fórmula:

$$Ar = L \times A$$

Dónde:

L = Alto de la placa (cm)

A = Ancho de la placa (cm)

Entonces:

$$Ar = 176 \text{ cm}^2$$

Se usó 10 electrodos en la celda, 5 placas de Aluminio y 5 de Acero galvanizado, cada uno de estos tiene las siguientes dimensiones: 16 cm de ancho y 11 cm de alto, con un espesor de 2 mm (medida comercial). El número de electrodos que se empleó en el reactor fue determinado según la

metodología de ARANGO y GARCÉS (2007), y está dado por la siguiente expresión:

$$\text{Número de electrodos} = \frac{(\text{ancho de celda}) - 2 \times (\text{dist. electrodo a cara lateral})}{(\text{dist. maxima entre electrodos} + \text{espesor de placa})}$$

Se estableció una distancia de 2 cm desde las placas hasta las caras laterales, frontal y posterior de la celda, para permitir el flujo del agua residual durante la electrolisis. La distancia entre electrodos fue de 1 cm y se instalaron de forma paralela e intercalada como se muestra en la Figura 6.

$$\text{Numero de electrodos} = \frac{160\text{mm} - 2 * (20\text{mm})}{10\text{mm} + 2\text{mm}}$$

$$\text{Numero de electrodos} = 10 \text{ placas}$$

Anclaje y separación de electrodos: Se construyeron dos reglas dentadas (Ancho =0.5cm, L=16cm) de fibra de vidrio, estas fueron pegadas a la base de la celda y a las caras frontal y posterior, la distancia entre dientes fue de 1 cm.

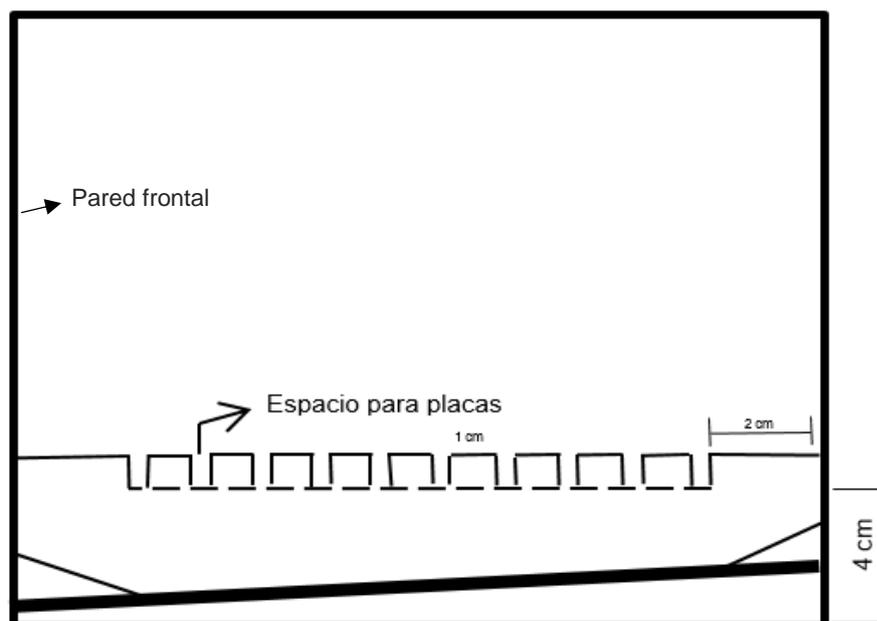


Figura 6. Sistema de anclaje de la celda de electrocoagulación

3.2.3. Sistema eléctrico y fuente de energía

Los electrodos fueron conectados en paralelo, ya que en investigaciones anteriores se reportan óptimos resultados con este tipo de conexión.

Se instaló un circuito utilizando cables calibre 5, con 10 pinzas tipo cocodrilo, conectados a una fuente de energía de 10 - 6A y 0 - 24 V, marca Frederiksen, con reguladores de corriente y voltaje. Los parámetros eléctricos fueron monitoreados con un multímetro marca Steren.

3.3. Materiales y reactivos

Se utilizaron materiales y reactivos que permitieron el desarrollo de la investigación, entre ellos: Fuente de poder de 10 – 6 A y 0 – 24 V de marca Frederiksen, conductímetro, voltímetro, electrodos de aluminio y acero galvanizado y otros de uso general.

3.4. Operación de la celda de electrocoagulación

La celda de electrocoagulación operó mediante un sistema por lotes, con 4.5 L de agua residual, esta fue obtenida de la MC de agua residual del matadero municipal. La celda contenía 10 electrodos, 5 de aluminio y 5 de acero galvanizado, conectados a la fuente de energía a través de 10 pinzas cocodrilo para conducir la electricidad.

Se sometía 4.5 L de agua residual a intensidades de corriente de: 1, 1.5 y 2 amperios, y se realizaba muestreos a los 5, 15 y 30 minutos.

3.5. Determinación de parámetros fisicoquímicos y biológicos del efluente

Todos los análisis para la determinación de DBO₅, Coliformes y sólidos se realizaron en los laboratorios de Microbiología y Química, respectivamente. El pH y la conductividad fueron medidos in situ. Asimismo, los análisis se realizaron al inicio, a los 5 minutos, 15 minutos y al final de cada tratamiento.

Los análisis se realizaron según el APHA (2005). Métodos para el análisis de agua y agua residual.

3.5.1. Determinación de Temperatura (°C)

La temperatura se determinó con un termómetro digital marca ROAC, tipo lapicero.

3.5.2. Determinación de Conductividad

Se determinó mediante electrometría con el electrodo de conductímetro HACH.

3.5.3. Determinación del pH

Se determinó mediante potenciómetro de electrodo selectivo (pHmetro) de marca HANNA.

3.5.4. Determinación de Sólidos Totales

Los sólidos suspendidos se midieron según lo establecido en el método 2540 (APHA, 2005), y calculados mediante la siguiente expresión:

$$ST, \frac{mg}{L} = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000}{V}$$

Dónde:

ST: sólidos totales en mg/L.

P₁: peso de porcelana en mg.

P₂: peso de porcelana más el residuo seco a 103-105°C en mg.

V: volumen de muestra tomado en mL

3.5.5. Determinación de Sólidos Suspendidos

Los sólidos suspendidos se midieron según lo establecido en el método 2540 (APHA, 2005), y calculados mediante la siguiente expresión:

$$SST, \frac{mg}{L} = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000}{V}$$

Dónde:

SST: sólidos suspendidos totales en mg/L.

P₁: peso del filtro en mg.

P₂: peso del filtro más el residuo seco a 103-105°C en mg.

V: volumen de muestra tomado en mL

3.5.6. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno

La DBO₅ se determinó mediante electrodo de membrana, según el método 5210 (APHA, 2005). Se midió el oxígeno disuelto con un Oxímetro digital al iniciar y al finalizar la incubación. Las diluciones se realizaron al 0.5%, 1% y 3%, en frascos de 325 ml.

Los resultados fueron calculados mediante la siguiente expresión:

$$DBO_5, \frac{mg}{L} = ((D_1 - D_2) - (S)V_5)/P$$

Dónde:

OD₁: OD de la muestra diluida inmediatamente después de su preparación, mg/L

OD₂: OD de la muestra diluida después de 5 días de incubación a 20 ° C, mg/L

S: el consumo de oxígeno de las semillas (siembra), OD/ml suspensión de siembra añadido por botella (S= 0 si las muestras no se siembran)

Vs: volumen de semilla en la botella de la prueba respectiva, ml

P: fracción volumétrica decimal de muestra utilizada; 1/P, dilución factor.

3.5.7. Determinación de Coliformes

Los análisis de coliformes se realizaron mediante de método del número más probable N° 9221, ver anexo A del apéndice 2, según lo establecido por el APHA, 2005.

3.6. Eficiencia de remoción

Se calculó mediante una correlación porcentual entre la concentración inicial y final de los parámetros evaluados (DBO₅, coliformes y sólidos) presentes en cada muestra del efluente procesado dentro de la celda de electrocoagulación, según el tratamiento del mismo, mediante la siguiente formula (TAKE *et al.*, 2012):

$$ER = \left(\frac{Ci - Cf}{Ci} \right) * 100$$

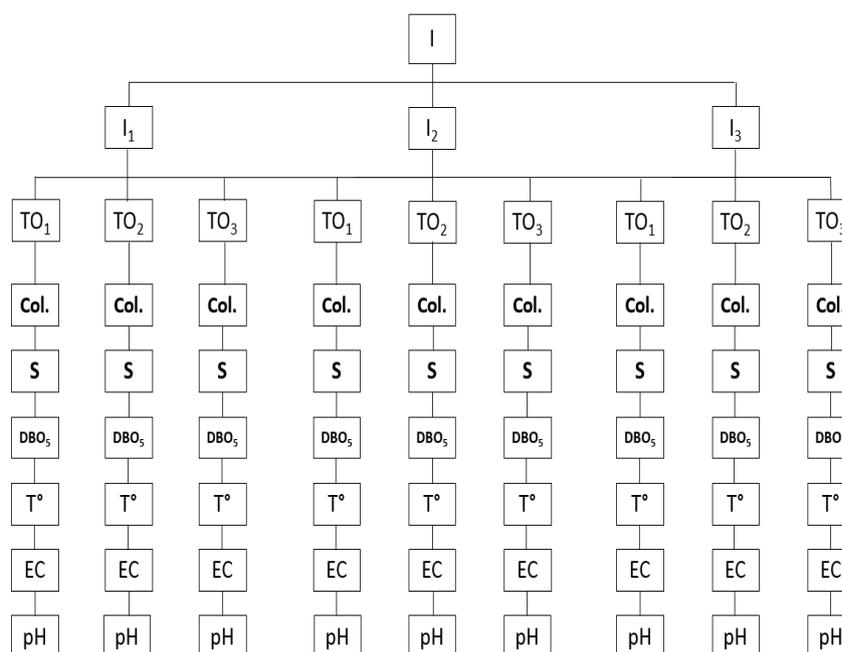
Dónde:

ER: Eficiencia de remoción de parámetros evaluados (DBO₅, coliformes y sólidos, %), Ci: Concentración inicial parámetros evaluados (DBO₅, coliformes

y sólidos) y Cf: concentración final parámetros evaluados (DBO_5 , coliformes y sólidos).

3.7. Diseño experimental

Se adoptó un diseño experimental con estímulo creciente, que obedece a variaciones de intensidad de corriente (1A, 1.5A y 2A), con muestreos en tres tiempos de operación (5, 15 y 30 minutos), con tres repeticiones por tratamiento, evaluándose 3 parámetros (coliformes, DBO_5 y sólidos) para determinar la eficiencia de la técnica de electrocoagulación. Asimismo se también midió los siguientes parámetros: pH, temperatura y conductividad, como referencia, para observar su comportamiento.



Leyenda: [I], intensidad de corriente; [I₁], intensidad de corriente de 1A; [I₂], intensidad de corriente de 1.5A; [I₃], intensidad de corriente de 2A; [TO₁], tiempo de operación igual a 5 minutos; [TO₂], tiempo de operación igual a 15 minutos; [T₃], tiempo de operación igual a 30 minutos; [Col], coliformes totales y fecales; [S], sólidos totales y suspendidos; [DBO₅], demanda bioquímica de oxígeno y [T°], temperatura; [EC], conductividad; [pH], pH.

Figura 7. Diseño experimental

3.7.1. Tratamientos en estudio

En el Cuadro 3 se muestra los tratamientos en estudio con sus características y especificaciones.

Cuadro 3. Especificaciones de los tratamientos

Numero	Corriente (A)	Densidad de corriente (A/m ²)	Tiempo de residencia (min)	Repeticiones	Distancia de electrodos (cm)	Tipo de electrodos
T1	1 A	56	5	3	1	Al y Acero galvanizado
	1 A	56	15	3	1	Al y Acero galvanizado
	1 A	56	30	3	1	Al y Acero galvanizado
T2	1.5 A	85	5	3	1	Al y Acero galvanizado
	1.5 A	85	15	3	1	Al y Acero galvanizado
	1.5 A	85	30	3	1	Al y Acero galvanizado
T3	2 A	114	5	3	1	Al y Acero galvanizado
	2 A	114	15	3	1	Al y Acero galvanizado
	2 A	114	30	3	1	Al y Acero galvanizado

3.7.2. Variables

3.7.2.1. Variables dependientes

Entre las variables dependientes que se evaluaron tenemos:

- Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L).
- Sólidos totales y suspendidos (mg/L).
- Coliformes totales y fecales (NMP/100mL)

3.7.2.2. Variables independientes

Entre las variables independientes que se evaluaron tenemos:

- Intensidad de corriente, medida en amperios (A)

3.7.3. Procesamiento de la muestra

Las muestras de agua residual se obtuvieron de la zona de vertido en el matadero municipal de Tingo María.

Antes de emprender con el estudio experimental se realizó la caracterización del efluente, se determinó que durante un día de trabajo normal, el matadero municipal produce 2 tipos de agua residual relevantes, una con alta concentración de sangre, resultado del desangrado, y otra con grandes cantidades de excremento, producto del eviscerado. Debido a esto, se colectaron dos muestras simples de cada clase de efluente para conformar una muestra homogénea de 12 litros. La caracterización del agua residual se realizó durante dos días en los cuales se midieron los siguientes parámetros in situ: pH, conductividad, temperatura, pH.

En una jornada de trabajo de 3 horas se recolectaron 2 muestras simples (MS) para formar una muestra compuesta (MC) de 12 litros, esta muestra fue pasada por un colador para remover residuos de gran tamaño que puedan entorpecer el estudio. De la muestra compuesta se extrajo 4.5 litros, para someterla a electrocoagulación.

Una vez se haya alimentado el reactor o celda de electrocoagulación con 4.5 Litros de agua residual, regulado el amperaje y medido el tiempo de operación, se tomó una muestra por cada tiempo establecido en el diseño. De cada tratamiento se hicieron 3 repeticiones.

3.8. Análisis e interpretación de datos

3.8.1. Análisis de varianza (ANOVA)

Los resultados fueron evaluados mediante un análisis de varianza multivariable (ANVA). Se distribuyeron las variables estadísticas y los tratamientos de acuerdo al diseño experimental, se utilizó el modelo estadístico completamente al azar (DCA), utilizando el programas Statgraphics Centurión XVII, versión española, a un nivel de significancia de 5%.

En esta parte del trabajo consideramos que los resultados experimentales obtenidos son observaciones muestrales, mas no poblacionales. Sin embargo, esta técnica estadística nos permitirá escoger el tratamiento que mejores resultados ha mostrado.

3.8.2. Pruebas de múltiple rango de diferencia francamente significativa de Tukey (HSD Tukey)

Se empleó la diferencia francamente significativa de Tukey (HSD Tukey), con el fin de poder determinar entre que tratamientos había diferencias significativas, con un nivel de significancia del 5 %. Utilizando el programa Statgraphics centurión XVII, versión española.

IV. RESULTADOS

4.1. Caracterización fisicoquímica y biológica del efluente

El efluente presenta a simple vista un color rojo, proveniente de la sangre, con una DBO₅ aproximadamente de 1024 y 1008 mg/L, evidenciando su alto grado de contaminación. La caracterización del agua residual se realizó dos veces, en la primera caracterización de agua residual se encontró altas concentraciones de sólidos suspendidos y DBO₅ a comparación de la segunda caracterización.

Con respecto al pH y conductividad, que son 2 variables que influyen en el proceso de electrocoagulación, están en valores normales, el pH es 6.7 y 7.2 casi neutro y está en el intervalo de valores que la bibliografía recomienda. La conductividad presentó valores de 2467 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 962 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el primer valor pertenece al efluente del eviscerado y el segundo es resultado del degüello. Entonces se procedió a mezclar los tipos de agua para homogenizar los parámetros a evaluar, y encontrar valores promedio de conductividad y pH aceptables para el proceso de electrocoagulación

El Cuadro 4 indica las condiciones generales del agua residual del matadero municipal de Tingo María.

Cuadro 4. Caracterización del agua residual del matadero municipal

Parámetro	Unidad	Resultados		Método
		Prueba 1	Prueba 2	
Conductividad	μS/cm	2467	962	Electrométrico
Temperatura	°C	26.5	24.9	Electrométrico
Ph	-	6.7	7.2	Electrométrico
Sólidos Totales	mg/L	3813	2273	Gravimétrico
SST	mg/L	1978	1023	Gravimétrico
DBO ₅	mg/L	1024	1008	Medición de OD.
Coliformes totales	NMP/100mL	>1100x10 ³	>1100x10 ³	NMP-Tubos múltiples
<i>E. coli</i>	NMP/100mL	>1100x10 ³	>1100 x10 ³	NMP-Tubos múltiples

4.2. Construcción de celda de electrocoagulación

La construcción de la celda de electrocoagulación estuvo basada en los estudios de ARANGO y GARCÉS (2007).

Con respecto a los materiales y accesorios, se utilizó vidrio para construir el reactor, cuyo volumen total de reacción es de 4.5 Litros. En cuanto al material de los electrodos, se empleó aluminio y acero galvanizado, ya que en estudios anteriores estos mostraron buenos resultados en la remoción de diferentes contaminantes, entre ellos materia orgánica, DBO₅, sólidos, etc. Se utilizaron 10 electrodos de 2 mm, 11 cm de alto y 16 cm de ancho (5 de acero galvanizado y 5 de aluminio).

El sistema de anclaje de electrodos se construyó de fibra de vidrio, consistió de dos reglas dentadas de 16 cm de largo; el ancho de los dientes fue de 1 cm, la distancia estimada de un electrodo a otro. Este sistema separa los electrodos de las caras frontales y laterales hasta 2 cm.

Cuadro 5. Características de la celda de electrocoagulación

Características	Unidades/Material	Valor
Material del Ánodo	Acero galvanizado	-
Material de Cátodo	Aluminio	-
Reactor	Vidrio	-
Volumen del reactor	Litros (L)	4.5
Intensidad máxima de la fuente de poder	Amperios (A)	10
Tensión máxima de la fuente de poder	Voltios (V)	24
Numero de electrodos		10
Área de electrodos	Metros cuadrados (m ²)	0.0176
Distancia de separación de electrodos	Centímetros (cm)	1
Material de anclaje	Fibra de vidrio	-

La Figura 8 muestra la celda de electrocoagulación en su etapa final de construcción.

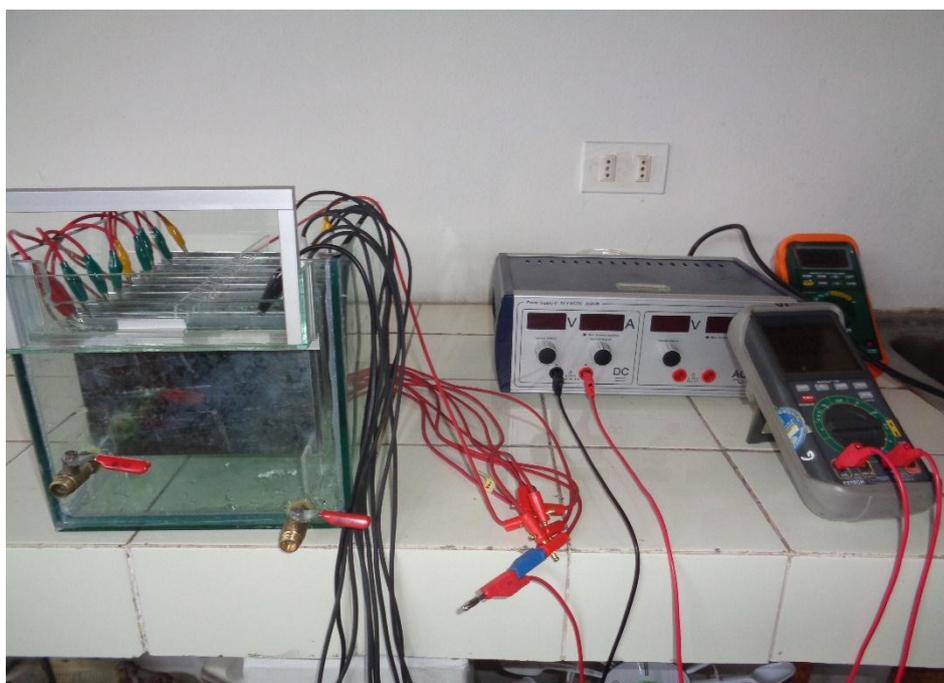


Figura 8. Celda de electrocoagulación

4.3. Determinación del efecto de la intensidad de corriente y tiempo de operación en la reducción de carga contaminante, por medición de los siguientes parámetros: DBO₅, coliformes y sólidos; como también pH, conductividad y temperatura

Se hicieron tres pruebas por cada tratamiento, tomando muestras a los 5, 15 y 30 minutos. Todas las evaluaciones se realizaron sin ninguna modificación, la única variable controlada fue la intensidad de corriente.

La Figura 9 muestra el proceso de electrocoagulación a 5 min de iniciado el tratamiento con intensidad de corriente de 1A (primera muestra). Se observa mayor formación de sedimentos que espumas.



Figura 9. Proceso de electrocoagulación a 1A con 5 minutos

La Figura 10 muestra el proceso de electrocoagulación a 5 min de iniciado el tratamiento con intensidad de corriente de 1.5A (primera muestra). Se observa mayor formación de espumas que sedimentos.



Figura 10. Proceso de electrocoagulación a 1.5A con 5 minutos

La Figura 11 muestra el proceso de electrocoagulación a 30 min de iniciado el tratamiento con intensidad de corriente de 2A (tercera muestra). Se observa mayor formación de espumas que sedimentos.

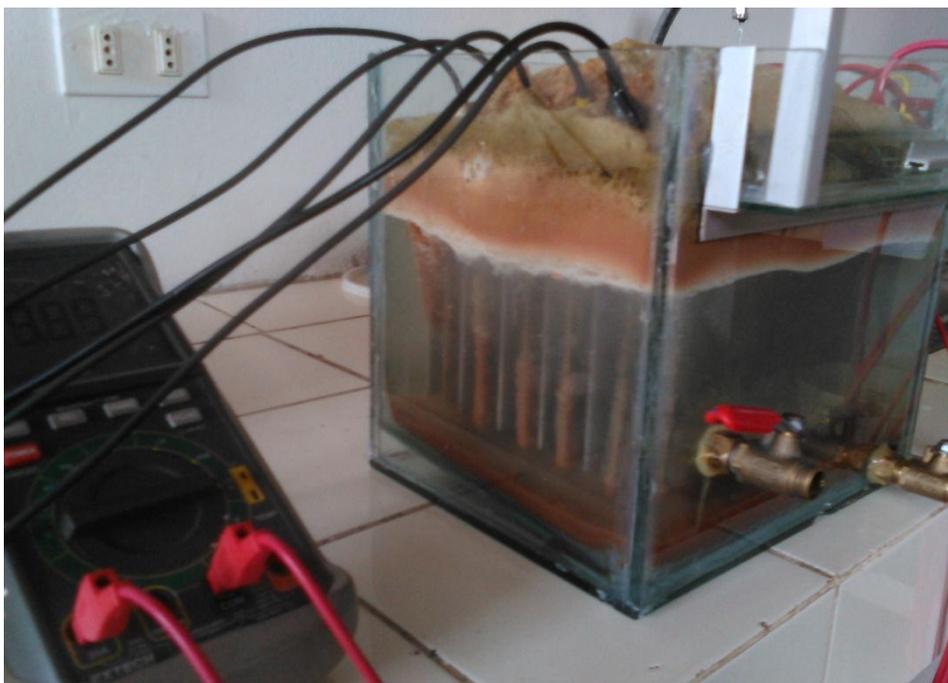


Figura 11. Proceso de electrocoagulación a 2A con 30 minutos

4.3.1. Reducción de la demanda Bioquímica de Oxígeno.

Para los análisis de la demanda bioquímica de oxígeno se tomaron muestras a los 5, 15 y 30 minutos de cada tratamiento (1A, 1.5A y 2A), con 3 repeticiones cada uno. Las mayores remociones se obtuvieron a 30 minutos de cualquier tratamiento. Se midió la DBO_5 al iniciar y finalizar los tratamientos para evaluar el porcentaje de remoción. Los valores generales se muestran en el anexo A del apéndice 1.



Figura 12. Medición de OD

El Cuadro 6 muestra los resultados promedio y las medias del % de eficiencia, respecto a la concentración de la DBO_5 , tiempo de operación e intensidad de corriente durante el proceso de electrocoagulación. Se obtiene buenos resultados a cualquier intensidad de corriente a partir de 15 minutos de tratamiento. La técnica de electrocoagulación presenta mejores resultados al transcurrir más tiempo de operación.

Cuadro 6. Reducción de DBO₅

Tratamiento	Tiempo (min)	Resultados promedio (mg/L)
1 A	0	1046
	5	923
	15	545
	30	232
1.5 A	0	1037
	5	881
	15	523
	30	183
2 A	0	1076
	5	891
	15	456
	30	156

En la Figura 13, se observa las medias de los resultados del proceso de electrocoagulación con respecto a la reducción de DBO₅. El tratamiento de 2 amperios muestra valores mínimos, por lo que se entiende que este logró reducir la DBO₅ en mayor cantidad, en comparación a los otros tratamientos; por lo tanto, a mayor intensidad de corriente mayor porcentaje de reducción.

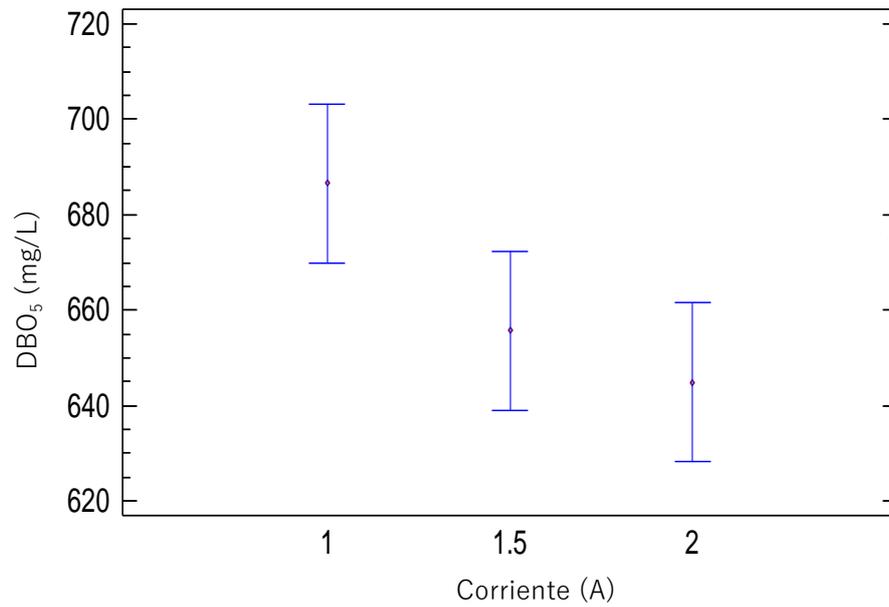


Figura 13. DBO₅ vs Intensidad de corriente

La Figura 14 muestra las medias de los resultados de la reducción de DBO₅ durante el proceso de electrocoagulación en función del tiempo.

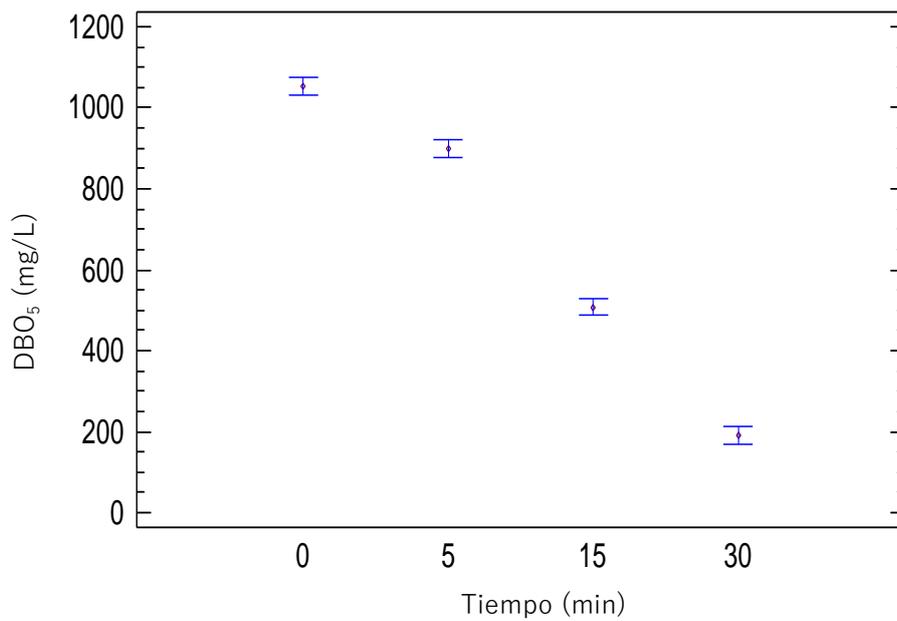


Figura 14. DBO₅ vs Tiempo

Se realizó un análisis de varianza para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la demanda bioquímica de oxígeno. Puesto que el valor-P del factor “tiempo” y el factor “corriente” son menores que 0.05, estos tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la DBO₅ con un 95.0% de nivel de confianza.

Cuadro 7. ANVA para la DBO₅

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A:Corriente	11230.1	2	5615.03	5.13	0.0122
B:Tiempo	4.09491E6	3	1.36497E6	1246.22	0.0000
Residuos	32858.6	30	1095.29		
Total (corregido)	4.139E6	35			

El Cuadro 8 hace una comparación múltiple, mediante la prueba Tukey, para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Se ha colocado un asterisco junto al par 1-2, indicando que este muestra diferencias estadísticamente significativas, con un nivel del 95.0% de confianza. Se han identificado 2 grupos homogéneos (2A y 1.5A) según las letras comunes que se repiten, alineadas en columna. El tratamiento 1.5 A es estadísticamente significativo. Asimismo, existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos 1A y 2A.

Cuadro 8. Prueba Tukey en función de la intensidad de corriente y la DBO₅

Corriente	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos	Contraste	Significancia.	Diferencia
2	12	644.917	9.55374	a	1-1.5		30.91
1.5	12	655.667	9.55374	a b	1-2	*	41.66
1	12	686.583	9.55374	c	1.5-2		10.75

Tratamiento con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Los Cuadros 9 y 10 hacen comparaciones múltiples mediante la prueba Tukey. Según las letras comunes los tiempos operación son diferentes en todos los casos. Los asteriscos que se encuentran al lado de los 6 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. Por lo tanto la técnica de electrocoagulación tiene efectos positivos en la reducción, a cualquier tiempo de operación.

Cuadro 9. Prueba Tukey en función del tiempo y la DBO₅

Tiempo	Casos	Media LS	Sigma LS	Significancia
30	9	190.222	11.0317	a
15	9	508.0	11.0317	b
5	9	898.444	11.0317	c
0	9	1052.89	11.0317	d

Tratamiento con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 10. Contraste entre tiempos de operación en la remoción de DBO₅

Contraste	Sig.	Diferencia
0 – 5	*	154.444
0 – 15	*	544.889
0 – 30	*	862.667
5 – 15	*	390.444
5 – 30	*	708.222
15 – 30	*	317.778

4.3.2. Reducción de Sólidos

Se analizaron sólidos totales y sólidos suspendidos, tomando muestras a los 5, 15 y 30 minutos de cada tratamiento (1A, 1.5A y 2A), con 3 repeticiones cada uno. Las mayores remociones se obtuvieron a 30 minutos de

cualquier tratamiento. Los valores generales se muestran en el anexo B del apéndice 1.

La Figura 15 muestra los “residuos” o sólidos totales del efluente, después de ser sometidos a una intensidad de corriente de 1.5A, con 5, 15 y 30 minutos (tiempos de operación) de tratamiento.



Figura 15. Sólidos totales a 1.5A con 5,15 y 30 minutos

El Cuadro 11 muestra los resultados promedio, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente durante el proceso de electrocoagulación, y el porcentaje de remoción de sólidos totales.

Cuadro 11. Remoción de sólidos totales

Tratamiento	Tiempo (min)	Resultados promedio (mg/L)
1 A	0	2789
	5	2368
	15	1603
	30	859

1.5 A	0	3152
	5	2535
	15	1620
	30	712
2 A	0	3065
	5	2362
	15	1320
	30	432

La Figura 16 muestra las medias de los resultados de la remoción de sólidos totales durante el proceso de electrocoagulación en función de la corriente.

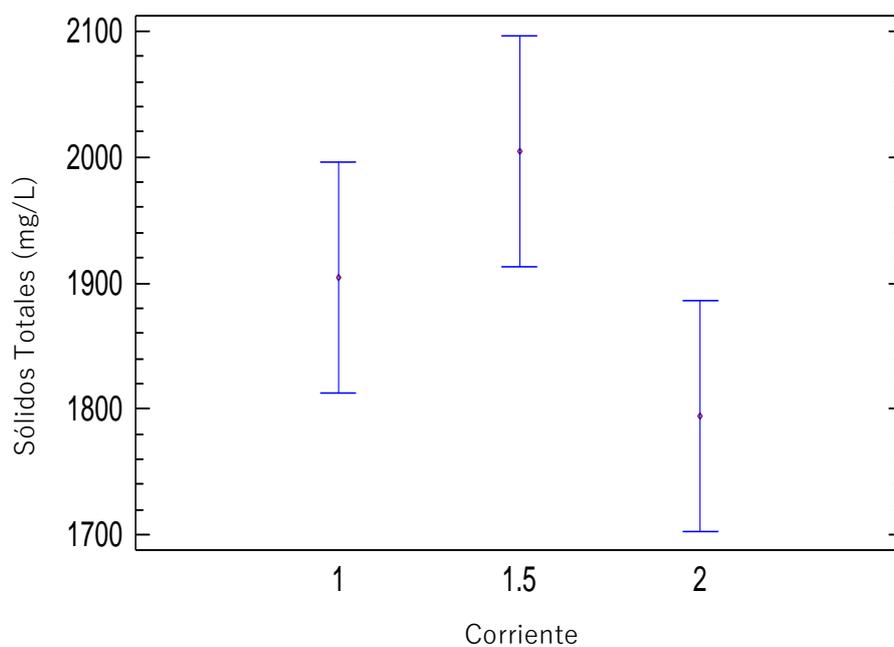


Figura 16. ST vs Intensidad de corriente

La Figura 17 muestra las medias de los resultados de la remoción de sólidos totales durante el proceso de electrocoagulación en función del tiempo.

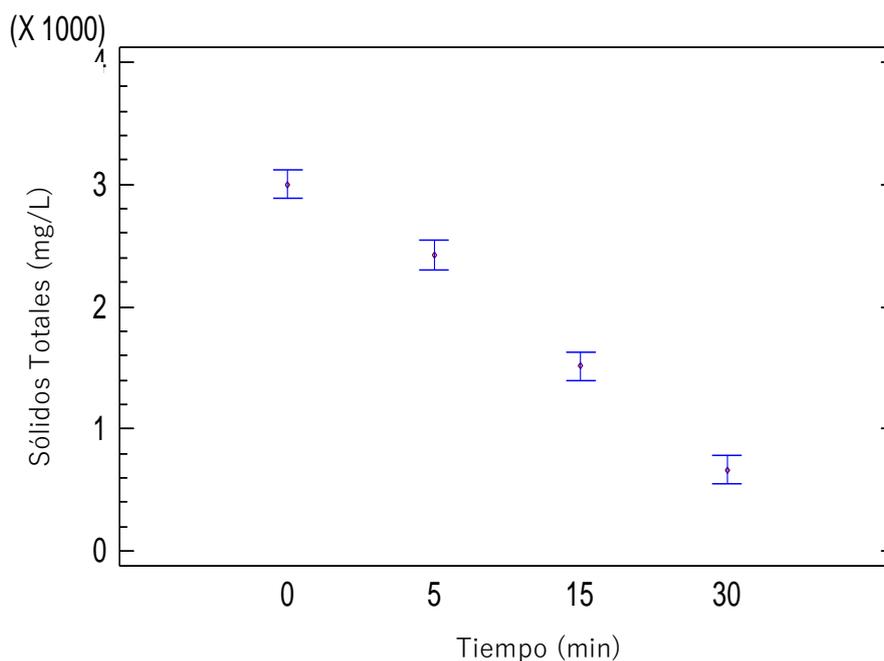


Figura 17. ST vs Tiempo

Se realizó un análisis de varianza para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre los sólidos totales. Puesto que el valor-P de los factores “tiempo” y “corriente” son menores que 0.05, estos tienen un efecto estadísticamente significativo sobre los ST con un 95.0% de nivel de confianza.

Cuadro 12. ANVA para sólidos totales

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A:Corriente	264394.	2	132197.	3.99	0.0291
B:Tiempo	2.83874E7	3	9.46248E6	285.64	0.0000
Residuos	993826.	30	33127.5		
Total (corregido)	2.96457E7	35			

El Cuadro 13 hace una comparación múltiple, mediante la prueba Tukey, para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de

otras. Se han identificado dos grupos homogéneos (1A y 2A) según las letras comunes que se repiten, alineadas en columna; es decir, que estos dos tratamientos han logrado reducir sólidos suspendidos en cantidades similares. Asimismo, existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos 1.5A y 2A.

Cuadro 13. Prueba Tukey en función de la intensidad de corriente y ST

Corriente	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	Contraste	Sig.	Diferencia
2	12	1794.58	52.5417	a	1-1.5		-99.75
1	12	1904.67	52.5417	a b	1-2		110.083
1.5	12	2004.42	52.5417	c	1.5-2	*	209.833

Tratamiento con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Los Cuadros 14 y 15 hacen comparaciones múltiples mediante la prueba Tukey. Según la alineación de las letras comunes, los tiempos operación son diferentes en todos los casos. Los asteriscos que se encuentran al lado de los 6 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. Por lo tanto, la técnica de electrocoagulación muestra resultados alentadores a cualquier tiempo de operación.

Cuadro 14. Prueba Tukey en función del tiempo de operación y ST

Tiempo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
30	9	667.444	60.6699	a
15	9	1514.11	60.6699	b
5	9	2421.44	60.6699	c
0	9	3001.89	60.6699	d

Tratamiento con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 15. Contraste entre tiempos de operación en la remoción de ST

Contraste	Sig.	Diferencia
0 – 5	*	580.444
0 – 15	*	1487.78
0 – 30	*	2334.44
5 – 15	*	907.333
5 – 30	*	1754.0
15 – 30	*	846.667

La mayor remoción en sólidos suspendidos se obtuvo a los 30 minutos de cada tratamiento, en la primera, segunda y tercera prueba respectivamente (Anexo C del apéndice 1).

En la Figura 18 se observa el procedimiento para medir la cantidad de sólidos suspendidos; de la muestra del tratamiento de 2A con 30 minutos de operación. Se puede ver un efluente relativamente más transparente.



Figura 18. SS a 2A con 30 minutos

El Cuadro 16 muestra los resultados promedio, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente durante el proceso de electrocoagulación, y el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos.

Cuadro 16. Remoción de sólidos suspendidos

Tratamiento	Tiempo (min)	Resultados promedio (mg/L)
1 A	0	1772
	5	1415
	15	901
	30	372
1.5 A	0	2057
	5	1546
	15	894
	30	309
2 A	0	2071
	5	1562
	15	776
	30	91

La Figura 19 muestra las medias de los resultados de la remoción de sólidos suspendidos durante el proceso de electrocoagulación en función de la corriente. Y la Figura 20 muestra las medias de los resultados de la remoción de sólidos suspendidos durante el proceso de electrocoagulación en función del tiempo.

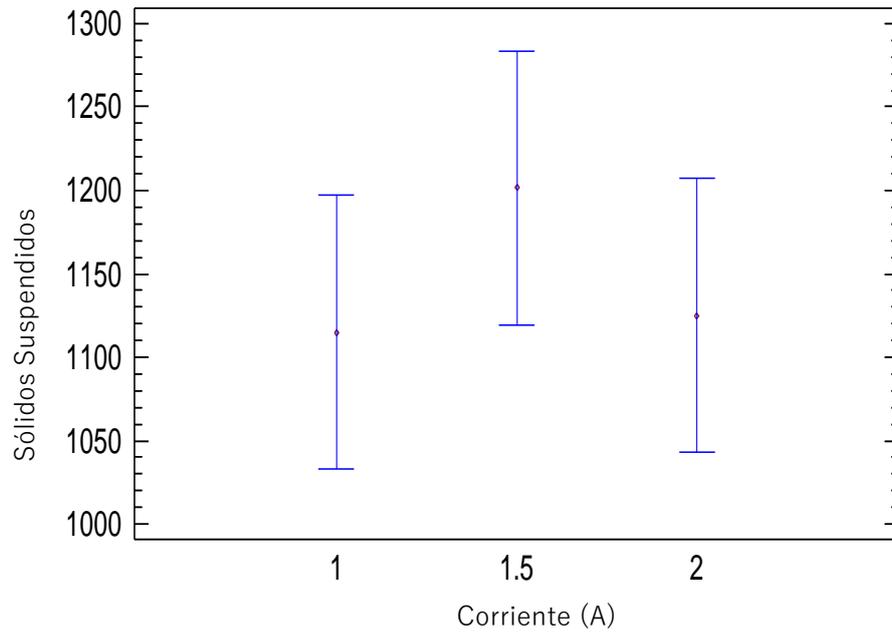


Figura 19. SS vs Intensidad de corriente

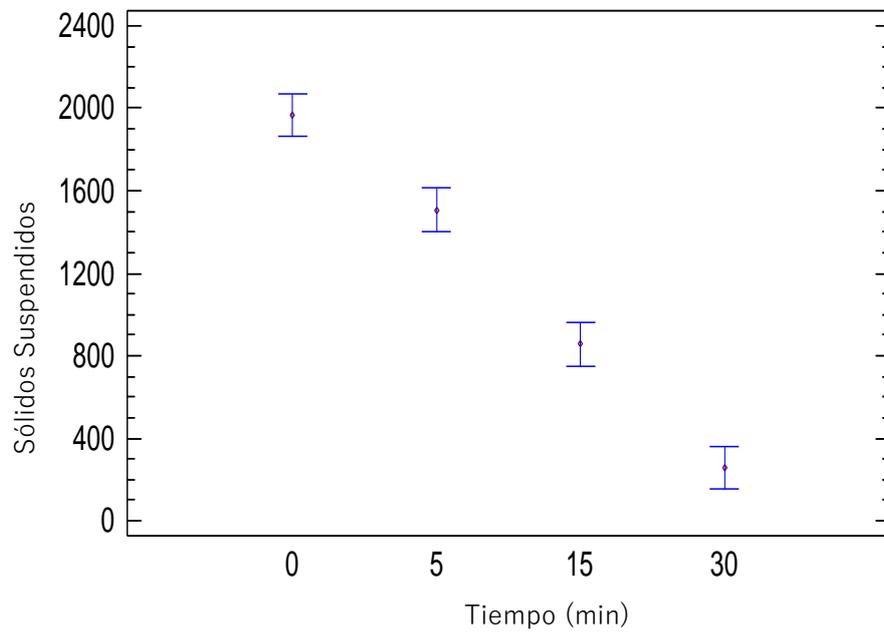


Figura 20. SS vs Tiempo

Se realizó un análisis de varianza para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre los sólidos suspendidos. Puesto que el valor-P del factor “tiempo” es menor que 0.05, estos tienen un

efecto estadísticamente significativo sobre los SS con un 95.0% de nivel de confianza.

Cuadro 17. ANVA para sólidos suspendidos

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: Corriente	53846.7	2	26923.4	1.01	0.3750
B: Tiempo	1.51024E7	3	5.03413E6	189.51	0.0000
Residuos	796912.	30	26563.7		
Total (corregido)	1.59531E7	35			

El Cuadro 18 hace una comparación múltiple, mediante la prueba Tukey, para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Se han identificado 3 grupos homogéneos (1A, 1.5A y 2A) según las letras comunes repetidas, alineadas en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

Cuadro 18. Prueba Tukey en función de la intensidad de corriente y SS

Corriente	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	Contraste	Sig.	Diferencia
1	12	1115.0	47.0494	a	1-1.5		-86.5833
2	12	1125.0	47.0494	a	1-2		-10.0
1.5	12	1201.58	47.0494	a	1.5-2		76.5833

Tratamiento con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Los Cuadros 19 y 20 hacen comparaciones múltiples mediante la prueba Tukey. Según la alineación de las letras comunes, los tiempos operación son diferentes en todos los casos. Los asteriscos que se encuentran

al lado de los 6 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza.

Cuadro 19. Prueba Tukey en función del tiempo de operación y SS

Tiempo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
30	9	257.222	54.3279	a
15	9	856.889	54.3279	b
5	9	1508.0	54.3279	c
0	9	1966.67	54.3279	d

Tratamiento con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 20. Contraste entre tiempos de operación en la remoción de SS

Contraste	Sig.	Diferencia
0 – 5	*	458.667
0 – 15	*	1109.78
0 – 30	*	1709.44
5 – 15	*	651.111
5 – 30	*	1250.78
15 – 30	*	599.667

4.3.3. Reducción de Coliformes

Se analizaron coliformes totales y fecales, y se tomaron muestras a los 5, 15 y 30 minutos de cada tratamiento (1A, 1.5A y 2A), con 3 repeticiones cada uno. Los mejores resultados se obtuvieron a 30 minutos de cualquier tratamiento, a excepción del tratamiento de 2A, donde se logró disminuir el total de coliformes fecales a partir de los 15 minutos. Los valores generales se muestran en el anexo D del apéndice 1.

La Figura 21 muestra la etapa final del procedimiento NMP de coliformes totales, del tratamiento de 1.5A a 30 minutos de iniciada la prueba.

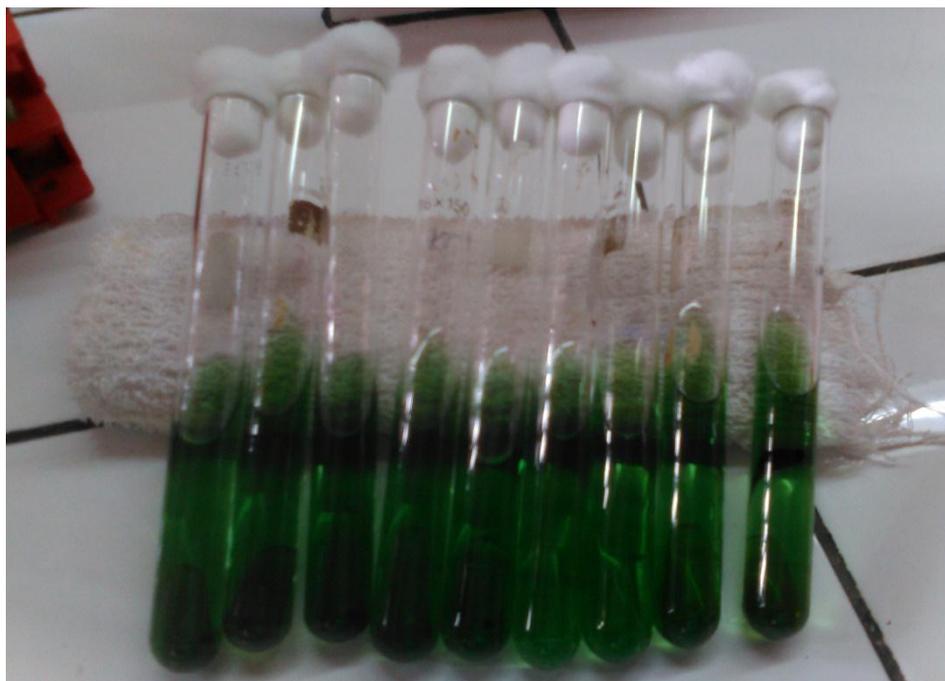


Figura 21. Coliformes totales a 1.5A con 30 minutos

El Cuadro 21 muestra los resultados promedio, por cada tiempo de operación e intensidad de corriente durante el proceso de electrocoagulación, y el porcentaje de reducción de coliformes totales.

Cuadro 21. Reducción de coliformes totales

Tratamiento	Tiempo (min)	Resultados promedio (NMP/100mL)
1 A	0	1101×10^3
	5	1101×10^3
	15	387×10^3
	30	4×10^3
1.5 A	0	1101×10^3
	5	403×10^3
	15	19×10^3
	30	2×10^3
2 A	0	1101×10^3
	5	220×10^3
	15	16×10^3
	30	0

La Figura 22 muestra las medias de los resultados de la reducción del NMP de coliformes totales durante el proceso de electrocoagulación en función de la corriente. Y en la Figura 23 se muestra el agua residual después de ser sometida a tratamiento durante 30 y 15 minutos, a 1.5 A.

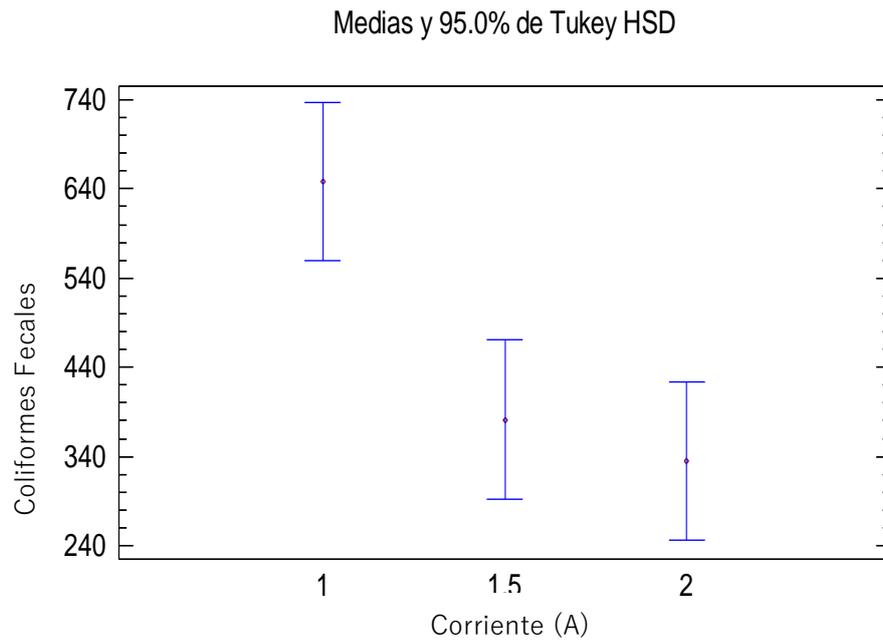


Figura 22. Coliformes totales vs Intensidad de corriente



Figura 23. Muestra de agua tratada a 1.5 A con 30 y 15 minutos

La Figura 24 muestra las medias de los resultados de la reducción del NMP de coliformes totales durante el proceso de electrocoagulación en función del tiempo.

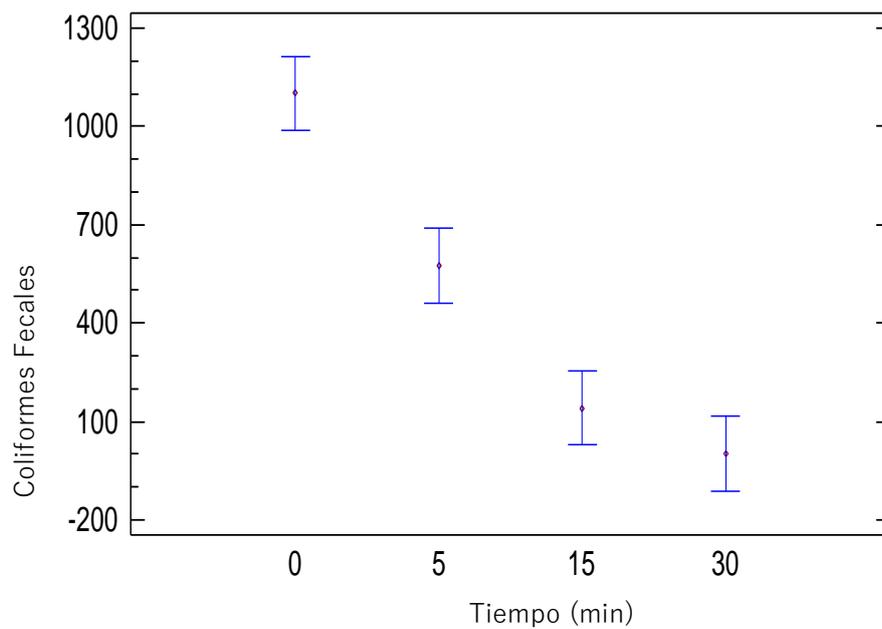


Figura 24. Coliformes totales vs Tiempo

Se realizó un análisis de varianza para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre coliformes totales. Puesto que el valor-P del factor “tiempo” y el factor “corriente” son menores que 0.05, estos tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Coliformes totales con un 95.0% de nivel de confianza.

Cuadro 22. ANVA para coliformes totales

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A:Corriente	687068.	2	343534.	11.04	0.0003
B:Tiempo	6.62137E6	3	2.20712E6	70.91	0.0000
Residuos	933746.	30	31124.9		
Total (corregido)	8.24218E6	35			

El Cuadro 23 hace una comparación múltiple, mediante la prueba Tukey, para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Se ha colocado un asterisco junto a los pares 1-1.5 A y 1-2 A, indicando que estos muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. Se han identificado 2 grupos homogéneos (2A y 1.5A) según la alineación de las letras comunes que se repiten, alineadas en una columna. Existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos 1A-2A y 1A-1.5A.

Cuadro 23. Prueba Tukey en función de la intensidad de corriente y CT

Corriente	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	Contraste	Sig.	Diferencia
-----------	-------	----------	----------	-------------------	-----------	------	------------

2	12	334.333	50.9288	a	1-1.5	*	266.667
1.5	12	381.417	50.9288	a	1-2	*	313.75
1	12	648.083	50.9288	b	1.5-2		47.083

Tratamiento con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Los Cuadros 24 y 25 hacen comparaciones múltiples mediante la prueba Tukey. El asterisco que se encuentra al lado de los 5 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza; es decir que sólo los tiempos de operación de 15 y 30 minutos no tienen diferencias significativas, son “iguales”. Existen 2 grupos homogéneos según la alineación de las letras comunes, los tratamientos sometidos a 15 y 30 minutos; es decir que estos tuvieron resultados similares.

Cuadro 24. Prueba Tukey en función del tiempo de operación y CT

Tiempo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
30	9	1.88889	58.8075	a
15	9	140.778	58.8075	a
5	9	574.778	58.8075	b
0	9	1101.0	58.8075	c

Tratamiento con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 25. Contraste entre tiempos de operación en la reducción de CT

Contraste	Sig.	Diferencia
0 – 5	*	526.222
0 – 15	*	960.222
0 – 30	*	1099.11
5 – 15	*	434.0
5 – 30	*	572.889
15 – 30		138.889

En el Cuadro 26 se muestran los resultados promedio de los NMP de coliformes fecales encontrados durante cada tratamiento y sus repeticiones. A los 30 minutos de los tres tratamientos (1A, 1.5A y 2A) se logró remover hasta un 100% de coliformes fecales (*E. Coli*). El tratamiento de 2A mostró resultados alentadores a partir de los 15 minutos, ver anexo E del apéndice 1.

La Figura 25 muestra la etapa final del procedimiento NMP de coliformes fecales o *E. coli*, del tratamiento de 1.5A a 30 minutos de iniciada la prueba.



Figura 25. Coliformes fecales (*E. coli*) a 1.5A con 30 minutos

Cuadro 26. Reducción de coliformes fecales

Tratamiento	Tiempo (min)	Resultados promedio (NMP/100mL)

1 A	0	1101 x10 ³
	5	135 x10 ³
	15	52 x10 ³
	30	0
1.5 A	0	1101 x10 ³
	5	140 x10 ³
	15	7 x10 ³
	30	0
2 A	0	1101 x10 ³
	5	87 x10 ³
	15	2 x10 ³
	30	0

La Figura 26 muestra las medias de los resultados de la reducción del NMP de coliformes fecales en función de la corriente.

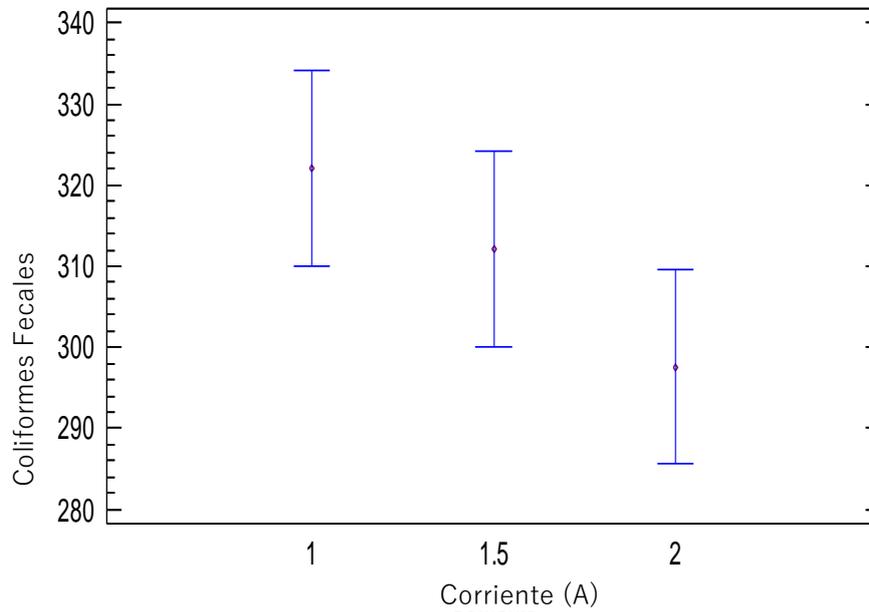


Figura 26. *E. coli* vs Intensidad de corriente

La Figura 27 muestra las medias de los resultados de la reducción del NMP de coliformes fecales en función del tiempo.

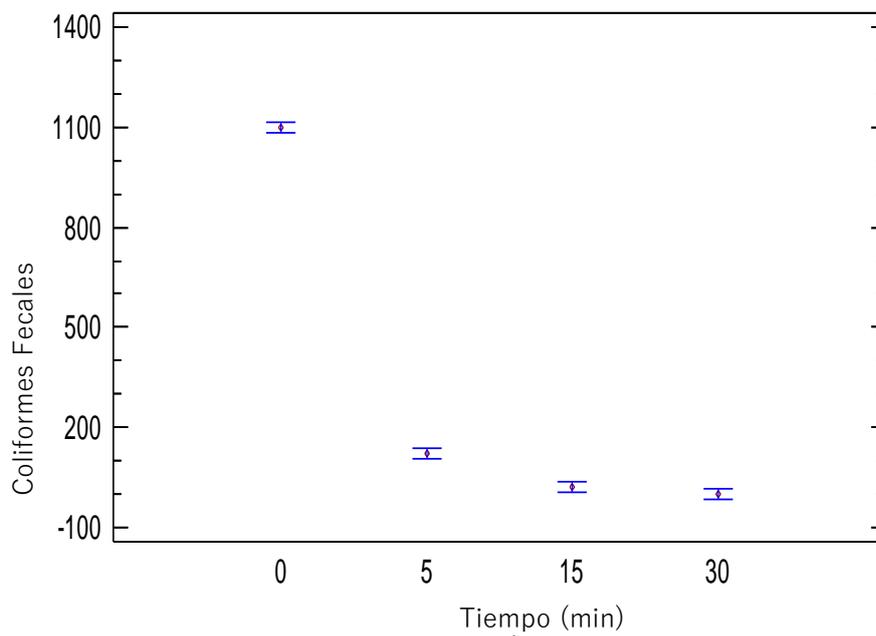


Figura 27. *E. coli* vs Tiempo

Se realizó un análisis de varianza para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Coliformes fecales. Puesto que el valor-P del factor “tiempo” es menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Coliformes fecales con un 95.0% de nivel de confianza.

Cuadro 27. ANVA para coliformes fecales

Fuente	Suma de Cuadrados	G.l	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A:Corriente	3642.0	2	1821.0	3.19	0.0553
B:Tiempo	7.57206E6	3	2.52402E6	4427.07	0.0000
Residuos	17104.0	30	570.133		
Total (corregido)	7.59281E6	35			

El Cuadro 28 hace una comparación múltiple, mediante la prueba Tukey, para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Se ha colocado un asterisco junto a los tratamientos 1A-2A, indicando

que estos muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. Se han identificado 2 grupos homogéneos (2A y 1.5A) según la alineación de las letras comunes en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos 2A y 1.5A.

Cuadro 28. Prueba Tukey en función de la intensidad de corriente y CF

Corriente	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	Contraste	Sig.	Diferencia
2	12	297.583	6.89283	a	1-1.5		10
1.5	12	312.083	6.89283	ab	1-2	*	24.5
1	12	322.083	6.89283	c	1.5-2		14.5

Tratamiento con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Los Cuadros 29 y 30 hacen comparaciones múltiples mediante la prueba Tukey. El asterisco que se encuentra al lado de los 5 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza; es decir que sólo los tiempos de operación de 15 y 30 minutos no tienen diferencias significativas, son “iguales”. Existen dos grupos homogéneos según la alineación de las letras comunes, los tratamientos a 30 y 15 minutos. Con estos tiempos de operación se obtuvieron resultados similares.

Cuadro 29. Prueba Tukey en función del tiempo de operación y CF

Tiempo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
30	9	0.0	7.95915	a
15	9	20.6667	7.95915	a
5	9	120.667	7.95915	b
0	9	1101.0	7.95915	c

Tratamiento con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 30. Contraste entre tiempos de operación en la reducción de CF

Contraste	Sig.	Diferencia
0 – 5	*	980.333
0 – 15	*	1080.33
0 – 30	*	1101.0
5 – 15	*	100.0
5 – 30	*	120.667
15 – 30		20.6667

4.3.4. Variación de pH, conductividad y temperatura

Durante las pruebas se observaron el aumento de pH y la temperatura, y la disminución de la conductividad, resultado de la estabilización de los coloides.

El Cuadro 31 muestra los resultados promedio del pH, obtenidos en durante cada tratamiento y sus repeticiones

Cuadro 31. Valores de pH durante los tratamientos

Tratamiento	Tiempo (min)	Resultados promedio
1 A	0	7
	5	8
	15	9
	30	10
1.5 A	0	7
	5	9
	15	10
	30	10
2 A	0	7
	5	8
	15	9.8
	30	10.6

Se realizó un análisis de varianza para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el pH. Puesto que el valor-P de los factores “tiempo” y “corriente” son menores que 0.05, estos tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el pH con un 95.0% de nivel de confianza.

Cuadro 32. ANVA para el pH.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: Corriente	1.32389	2	0.661944	8.84	0.0010
B: Tiempo	56.3311	3	18.777	250.67	0.0000
Residuos	2.24722	30	0.0749074		
Total (corregido)	59.9022	35			

El Cuadro 33 muestra los resultados promedio de conductividad, obtenidos en durante cada tratamiento y sus repeticiones.

Cuadro 33. Valores de conductividad durante los tratamientos

Tratamiento	Tiempo (min)	Resultados promedio ($\mu\text{S/cm}$)
1 A	0	2017
	5	1875
	15	1321
	30	808
1.5 A	0	2161
	5	1829
	15	1409
	30	713
2 A	0	1969
	5	1566
	15	1120
	30	605

Se realizó un análisis de varianza para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la conductividad. Puesto que el valor-P de los factores “tiempo” y “corriente” son menores que 0.05, estos tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la conductividad con un 95.0% de nivel de confianza.

Cuadro 34. ANVA para la conductividad

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: Corriente	328418.	2	164209.	10.88	0.0003
B: Tiempo	9.27507E6	3	3.09169E6	204.87	0.0000
Residuos	452740.	30	15091.3		
Total (corregido)	1.00562E7	35			

El Cuadro 35 muestra los resultados promedio de temperatura, obtenidos en durante cada tratamiento y sus repeticiones.

Cuadro 35. Valores de temperatura durante los tratamientos

Tratamiento	Tiempo (min)	Resultados promedio (°C)
1 A	0	24.7
	5	24.8
	15	26.0
	30	27.6
1.5 A	0	25.6
	5	26.0
	15	27.3
	30	29.1
2 A	0	25.5
	5	26.2
	15	27.8
	30	29.9

Se realizó un análisis de varianza para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la temperatura. Puesto que el valor-P de los factores “tiempo” y “corriente” son menores que 0.05, estos tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la temperatura con un 95.0% de nivel de confianza.

Cuadro 36. ANVA para la temperatura

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: Corriente	16.805	2	8.4025	9.99	0.0005
B: Tiempo	72.7222	3	24.2407	28.82	0.0000
Residuos	25.2328	30	0.841093		
Total (corregido)	114.76	35			

4.3.5. Determinación de la eficiencia de reducción de la carga contaminante del efluente del matadero municipal de Tingo María, mediante la aplicación de la técnica de electrocoagulación.

En el Apéndice 1. Se observan los resultados generales, obtenidos durante el proceso de electrocoagulación, estos datos se utilizaron para determinar la eficiencia del proceso, en cada parámetro evaluado. De esta manera, el Cuadro 37 muestra los resultados de la eficiencia de reducción de carga contaminante, evaluado mediante los siguientes parámetros: DBO₅, sólidos y coliformes. Se evaluaron a diferentes intensidades de corriente (1 A, 1.5 A y 2 A), analizando la reducción de la carga contaminante a 5, 15 y 10 minutos de operación.

Cuadro 37. Eficiencia de reducción de carga contaminante

T	Tiempo (min)	% Reducción DBO ₅	% Reducción ST	% Reducción SS	% Reducción CT	% Reducción CF
1 A	0	0	0	0	0	0
	5	12	15	20	0	87.7
	15	48	43	49	65	95.2
	30	78	69	79	100	100
1.5 A	0	0	0	0	0	0
	5	15	20	25	63	87.3
	15	50	49	57	98	99.3
	30	82	77	85	100	100
2 A.	0	0	0	0	0	0
	5	17	23	25	80	92.1
	15	58	57	63	98.5	99.8
	30	86	86	96	100	100

En el Cuadro 38, se presentan las medias de la eficiencia de remoción (%), su desviación estándar (sd) y su coeficiente de variación (cv), observándose que con una intensidad de corriente de 2 amperios se obtiene una mejor eficiencia de reducción en coliformes totales, por encima del 95%; sin embargo, el tratamiento con 1.5 amperios muestra porcentajes de eficiencia similares al de 2 A. asimismo aquellos tratamientos con una menor desviación estándar indican que los datos obtenidos durante el proceso de electrocoagulación a 5, 15 y 30 minutos de operación no son tan dispersos dentro de las repeticiones respecto al valor de la media, y que el proceso logra remover la carga contaminante en todos los caso a partir de 5 minutos de operación.

Cuadro 38. Medias, desviación estándar y coeficiente de variación para la eficiencia de reducción de carga contaminante mediante electrocoagulación

T	Parámetro Estadístico	Coliformes Totales	Coliformes Fecales	DBO ₅	Sólidos Suspendidos	Sólidos Totales
1 A	Media	55.0	94.3	46.0	49.3333	42.33
	DS	50.74	6.19	33.04	29.50	27.00
	CV	92.26%	6.57%	71.83%	59.80%	63.79%
1.5 A	Media	95.53	87.0	49.0	55.66	48.66
	DS	7.13	20.80	33.51	30.02	28.50
	CV	7.47%	23.91%	68.39%	53.93%	58.56%
2 A	Media	97.3	92.83	53.66	55.33	61.33
	DS	4.50	11.13	34.70	31.53	35.52
	CV	4.62%	11.99%	64.66%	56.98%	57.92%

V. DISCUSIÓN

El agua residual del matadero municipal de Tingo María presenta dos tipos de efluente relevante, agua con predominio de excremento y el segundo con sangre; el primero es de aguas residuales producto de la evisceración y el segundo efluente es resultado del degüello de los animales a beneficiar. Ambos tipos de efluente presentan altos contenido de DBO₅ diferenciándose más en la cantidad de sólidos presentes (efluente con excremento) y la conductividad, esta última presenta valores más elevados en aguas con alto contenido de sangre. Este efluente contiene diversos microorganismos patógenos, entre ellos el grupo coliforme, presente en más de 1100×10^3 NMP/100mL de acuerdo a los análisis. SIGNORINI *et al.* (2006) afirma que la cantidad de contaminantes que una planta de sacrificio o matadero produce, depende del tipo y cantidad de especies faenadas, tecnología empleada y residuos desechados. Según el PNUMA y COWI (2000) un matadero relativamente pequeño, que faena porcinos y bovinos, como el de la ciudad de Tingo María debe presentar valores de DBO₅ entre 1250-2000 mg/L, sólidos suspendidos entre 700-4000 mg/L y un pH cercano al neutral, 7.2.

La temperatura presenta valores de 26.5 y 24.9, el pH del agua residual se mantiene regular, con valores de 6.7 y 7.2. PRIETO *et al.* (2012)

afirma que con los parámetros fisicoquímicos no se puede definir la calidad de agua puesto que son evaluados en un determinado tiempo, por lo que sus resultados son únicamente del instante en que se obtuvo la muestra. En la caracterización estos parámetros fueron tomados de manera referencial para confirmar que estos no fueran elevados y afectaran el proceso de electrocoagulación.

El reactor tipo batch fue construido de forma muy sencilla, de acuerdo a los estudios realizados por ARANGO y GARCES (2007). Con 5 electrodos de acero galvanizado (ánodo) y 5 electrodos de aluminio (cátodo). El mismo autor utilizó electrodos de aluminio y hierro para tratar aguas residuales de la industria láctea, logrando resultados de 42.7% en DQO con electrodos de aluminio. Por otro lado, DAVILA *et al.* (2009), afirmó que el material utilizado como electrodo influye en la eficiencia del proceso, en su investigación, el electrodo de acero galvanizado presentó un mejor desempeño que el de aluminio, 59% remoción de ST. De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación se obtuvieron remociones entre 69-86% de sólidos totales con los dos electrodos, esto se detallará más adelante. Por otro lado, GILPAVAS *et al.* (2008) afirma que los electrodos de aluminio tienen facilidad para formar hidróxidos insolubles con gran afinidad por partículas dispersas, lo que permite la coagulación y la flotación.

Al respecto JARAMILLO (2012) diseñó y construyó un reactor de electrocoagulación tipo batch para aguas residuales de tintura y acabado textil, logrando remociones de 20% en sólidos y 65% en DBO₅.

Los resultados acerca de la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno mostraron que a mayor tiempo de operación se obtienen mejores resultados, puesto que, con cada intensidad de corriente, 1A, 1.5A y 2A se obtuvieron 78%, 82% y 86% de reducción de la DBO₅ respectivamente. De los tres tratamientos, el que mejores resultados mostró fue el trabajado con 2 amperios; sin embargo, ésta genera una película inerte sobre la superficie de los electrodos de aluminio (cátodo) y causa pérdida de energía, esto es debido a la elevada intensidad de corriente y al material de los electrodos que presentan alta disposición a la pasivación, DESHPANDE *et al.* (2010) indica que a mayor intensidad de corriente, mayor pasivación; por lo tanto disminuye la eficiencia del tratamiento. Entonces debido a que este efecto aparece a partir de los 30 minutos de tratamiento con 2A donde se obtuvo el mejor resultado, este no se vio influenciado por este efecto.

Autores como KIRZHNER, ZIMMELS y. SHRAIBER (2007) lograron reducir hasta 54.2% de DBO₅ a 40 minutos de tratamiento con una intensidad de corriente de 2.5A y electrodos de aluminio, de aguas residuales de bodegas, altamente contaminadas. Por otro lado, BARBOZA, 2011 trató el efluente de una planta de tratamiento, logrando disminuir la DBO₅ hasta un 89.5% a 45 minutos de tratamiento, con electrodos de aluminio y acero inoxidable, a 0.1A (12.5 mA/cm²).

De acuerdo al análisis de varianza y a la prueba Tukey, la intensidad de corriente y el tiempo ejercen fuerte influencia en la reducción de DBO₅, ver Cuadro 6, estos resultados concuerdan con los autores señalados anteriormente. Entre las intensidades de corriente, 1.5A y 2A no obtuvieron

diferencias significativas; es decir que sus resultados fueron estadísticamente iguales. Al contrario, sucede con las intensidades 1A y 2A que si muestran diferencias significativas, ya que con 1A se obtuvieron desde 12% hasta 78% y con 2A, de 17% a 86%.

Con respecto a sólidos totales y suspendidos, los resultados son alentadores a partir de los 15 minutos de tratamiento con cada intensidad de corriente. El mejor resultado en sólidos totales se obtuvo a los 30 minutos con 2A; sin embargo, el segundo tratamiento (1.5A) mostró resultados similares, ya que los valores iniciales de sólidos fueron mayores. En sólidos suspendidos se logró mejores resultados, 49%, 57% y 63% sólo con 15 minutos y 79%, 85% y 96% a 30 minutos con cada intensidad de corriente, puesto que estos son más fáciles de remover a comparación de los coloidales que también son parte de los totales y que no fueron parte de esta investigación. Investigaciones anteriores como las de JARAMILLO (2012), quien diseñó un reactor batch para tratar aguas residuales de textiles logrando remociones de 20% en sólidos suspendidos, y DAVILA *et al.* (2009), también evaluó la remoción de sólidos totales por electrocoagulación en vinazas, con electrodos de acero galvanizado, donde alcanzó una eficiencia del 59%. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en esta investigación ya que este tipo de efluente presenta mayor cantidad de material suspendido que coloidal a comparación de los efluentes textiles y características similares a las de aguas residuales de vinazas.

De acuerdo al análisis de varianza y a la prueba Tukey, la intensidad de corriente y el tiempo ejercen fuerte influencia en la reducción de

sólidos totales. Entre las intensidades de corriente, 1A y 2A no obtuvieron diferencias significativas; es decir que sus resultados fueron estadísticamente iguales, esto se debe a que en las pruebas de 1.5A se iniciaron con valores elevados a comparación de los otros dos tratamientos, los cuales iniciaron con valores similares y por lo tanto sus resultados fueron muy parecidos. En sólidos suspendidos sólo influye el tiempo de operación; es decir que a cualquier tratamiento con un tiempo prolongado se logra buenos resultados. Este comportamiento también se puede ver en una de las investigaciones realizadas por la SARALA (2012), donde trató aguas residuales domésticas y los mejores resultados fueron a mayor tiempo de operación (20 min) y las más altas intensidades de corriente, 0.25A y 0.36A.

La reducción de coliformes totales y fecales se dio en todos los casos a partir de los 30 minutos, a excepción del tratamiento de 2A que en la tercera repetición a 15 minutos alcanzó a eliminar el 100% de coliformes fecales, ver anexo E. En todas las pruebas se logró eliminar a más del 63% en coliformes totales, los resultados más alentadores fueron en los tratamientos 1.5A y 2A. Y en coliformes fecales o *E. coli* se logró eliminar desde los primeros 5 minutos en todos los tratamientos hasta el 87.3% llegando a reducir hasta el 100% este microorganismo. Los resultados de coliformes totales estuvieron fuertemente influenciados por la intensidad de corriente y el tiempo, por lo que, para obtener mejores resultados, sin desmerecer el efecto de las bajas intensidades de corriente es necesario aumentar el valor de este. Los coliformes fecales están más influenciados por el tiempo; es decir que, a cualquier tratamiento, sea 1A, 1.5A o 2A con un mayor tiempo de operación se

logran mejores resultados. Entre el tratamiento 1A y 2A se observan más diferencias significativas puesto que, aunque el tiempo ejerce mayor influencia sobre este parámetro, la intensidad de corriente juega un papel importante en la eficiencia de la electrocoagulación.

Asimismo, BARBOZA (2011) también logró eliminar coliformes fecales de los efluentes de una planta de tratamiento hasta un 65.1% a 25 minutos de tratamiento y 0.1A, y 93% a 45 minutos, utilizando electrodos de aluminio y acero inoxidable.

Se sabe que el pH, la conductividad y la temperatura, aunque no muy estudiados, juegan un papel muy importante en la electrocoagulación.

El agua residual del matadero municipal de Tingo María presenta un pH cercano a la neutralidad, de acuerdo a su caracterización y a los valores iniciales tomados en cada prueba. Se observó que, a mayor tiempo de operación, con cualquier intensidad de corriente, el pH tiende a elevarse, llegando hasta aproximadamente 10 en todos los tratamientos. Aunque según ARANGO (2005) el pH aumenta en aguas ácidas debido a la reacción del hidrógeno en el cátodo (electrodo de aluminio) formando OH^- , entonces este comportamiento también se da en aguas ligeramente neutras. No obstante, RESTREPO *et al.* (2006) afirma que a pH cercanos a 7 se logran mejores resultados. También PRIETO *et al.* (2012) indica que a medida que el pH aumenta se obtienen mayor precipitación de sólidos, ya que estos se vuelven más insolubles, por lo que refuerza los resultados de esta investigación.

La temperatura, de acuerdo a las pruebas de esta investigación, es directamente proporcional al tiempo de operación. Aunque a mayor intensidad

de corriente se observaron valores de 29.1 en 1.5A y 29.9 a 2A, por esto podemos decir que hubo pérdida de energía en forma de calor, esto se debe a las altas intensidades de corriente aplicados en el sistema y a las diversas reacciones producidas en ella. Para el caso RESTREPO *et al.* (2006) confirma que en altos consumos de energía se presentan pérdidas, produciendo un aumento en la temperatura del medio acuoso.

Con respecto a la conductividad, el agua residual del matadero municipal presenta valores entre 2467 – 962 $\mu\text{S}/\text{cm}$, este parámetro fue disminuyendo a medida que aumentó el tiempo de operación, esto se debe a que los iones existentes en la muestra de agua fueron estabilizándose y formando conglomerados para precipitar. Aunque también existe intercambio de iones entre los electrodos, estos reaccionaron con los sólidos presentes. Esto significa que a mayor tiempo de operación sería necesario agregar electrolitos para no afectar a la eficiencia del proceso.

Finalmente, el tiempo de operación fue un factor determinante en relación a la eficiencia del proceso de electrocoagulación. Los resultados generales mostrados en el apéndice 1, anexos A, B, C, D y E indican que a mayor tiempo de operación mayor será la eficiencia. En todos los parámetros evaluados se observan porcentajes de eficiencia crecientes a partir de los primeros 5 minutos de cualquier tratamiento, siendo el mayor tiempo de operación (30 minutos) el que ha mostrado mejores resultados. De la misma forma MIRANDA (2015), en su trabajo de investigación realizado con el efluente del camal municipal de Tingo María logró eficiencias de 72 % y 66 % en la reducción de la DBO_5 y sólidos suspendidos respectivamente, de 2 a 4

horas de tratamiento. Por lo que afirma que, si el tiempo de retención es mayor, menor será la concentración de sólidos suspendidos y DBO_5 , por lo tanto la eficiencia del tratamiento por lodos activos será mejor. Asimismo, PRIETO *et al.*, (2012) afirma que el tiempo de residencia determina la cantidad de sólidos formados, elevados de tiempos de residencia aseguran mayor cantidad de sólidos formados, debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como la floculación y precipitación de los sólidos. Se producen más gases, que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación. Un pequeño cambio del tiempo representa una gran influencia en la cantidad de sólidos obtenidos.

VI. CONCLUSIONES

1. El efluente del matadero municipal se caracteriza por presentar una demanda bioquímica de oxígeno de 1016 mg/L, sólidos totales igual a 3042 mg/L y sólidos suspendidos igual a 1500 mg/L, $>1100 \times 10^3$ NMP/100mL de coliformes totales y fecales, un pH de 6.95, temperatura igual a 25.7°C y conductividad de 1715.5 μ S/cm, en promedio.
2. La técnica de electrocoagulación muestra buenos resultados a mayor intensidad de corriente. Esta logró disminuir hasta en un 86% la DBO₅, 86% sólidos totales, 96% sólidos suspendidos y 100% coliformes totales y fecales, con la mayor intensidad de corriente 2 amperios, a 30 minutos de operación. Con una intensidad de corriente de 1.5 amperios se logró eficiencias de 82% en la DBO₅, 77% sólidos totales, 85% sólidos suspendidos y 100% coliformes totales y fecales. Con 1 amperio se logró reducciones de 78% en la DBO₅, 69% sólidos totales, 79% sólidos suspendidos y 100% coliformes totales y fecales
3. La técnica de electrocoagulación ofrece buenos resultados para tratar el efluente del matadero municipal de Tingo María. Se resalta los resultados obtenidos con una intensidad de corriente de 1.5 amperios por ser de menor gasto de energía a comparación con la de 2 amperios, y lograr resultados similares, 82% en DBO₅, 77% en sólidos totales, 85% en sólidos suspendidos, 100% en coliformes totales y fecales (*E. coli*).

VII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar pruebas con otros materiales para los electrodos, diferentes distancias entre estos, y distintas intensidades de corriente.
2. Se recomienda construir una planta piloto, para analizar la técnica de electrocoagulación con volúmenes de agua residual más elevados, para optimizar el proceso, puesto que el experimento de esta investigación fue a escala laboratorio
3. Analizar la influencia de la conductividad, el pH y la temperatura en el proceso de electrocoagulación.
4. Estudiar la causa disociación de los electrodos.
5. Seguridad en la aplicación
6. Plantear otros tratamientos para resolver el problema de aguas residuales del camal municipal de Tingo María.

VIII. ABSTRACT

The contamination caused by the direct discharge of effluent from the Tingo María Municipal Slaughterhouse into the Huallaga River, which affects the aquatic ecosystem, has turned into a danger for human health, leading us to the need for the use of new technologies to remove contaminants from this effluent; an alternative solution is electrocoagulation. The objective of this study was to evaluate the technique in question to reduce the contaminant load of the effluent from the Municipal Slaughterhouse; twenty seven experiments were carried out. A batch electrocoagulation cell (batch) was constructed, with 5 aluminum electrodes and 5 from galvanized steel; the experiments consisted of three intensities of electricity, three operating times, each with 3 repetitions. The results obtained are encouraging, when applying the technique of electrocoagulation; in 30 minutes and with a current intensity of 2 A, it was possible to reduce BOD5 by 86%, total solids by 86%, suspended solids by 96%, total coliforms by 100% and fecal coliforms (E. coli) by 100 %.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AGUILAR, E. 2015. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Tesis M. Sc. Ciencias ambientales. Lima, Perú. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 89 p.
- A.N.A, 2016. Estrategia nacional para el mejoramiento de la calidad de los recursos hídricos, Lima, Perú.
- APHA, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Ed. Washington, D.C., American Public Health Association.
- ARANGO, A. 2005. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Rev. Lasallista de Investigación. Antioquia, Colombia. Vol. 2, N° 1. 49-56.
- ARANGO y GARCES. 2007. Diseño de una celda de electrocoagulación. Rev. Universidad EAFIT. Antioquia, Colombia. Vol. 43, N° 147. 56-67.
- ARANGO y LOPEZ. 2008. Tratamiento de aguas residuales del proceso de desengrase de autopartes con fines de reúso. Tesis Ing. De procesos. Medellín, Colombia. Universidad EAFIT. 121 p.
- ARBOLEDA, J y HERRERA, P. 2015. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente con electrodos de aluminio-aluminio y de hierro-aluminio en

condiciones de laboratorio. Bogotá, Colombia. Universidad Santo Tomás. 107 p.

BARBOZA, I. 2011. Reducción de la Carga de Contaminantes de las Aguas Residuales de la Planta de Tratamiento de Totorá –Ayacucho Empleando la Técnica de Electrocoagulación. Tesis MSc. ciencias con mención en química. Universidad Nacional de Ingeniería. 131 p.

CAMACHO, A., GILES, M., ORTEGÓN, A., PALAO, M., SERRANO, B., VELAZQUEZ, O. 2009. Técnicas para el análisis microbiológico de alimentos. 2 ed. Facultad de Química, Universidad Autónoma de México. México .6 p.

CHAVEZ, A., CRISTANCHO, D., OSPINA, E. 2009. Una alternativa limpia para el tratamiento de aguas residuales galvanizadas: Revisión bibliográfica. Rev. Vol 5 N° 14. Ingenierías. Medellín, Colombia. 40-50.

CHEN, G. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology 38, 11-41.

CORDERO, E y MANRIQUE, J. 2009. Evaluación del efecto de la electrocoagulación en la disminución de la carga contaminante en aguas residuales. Tesis Ing. Químico. Maracaibo, Venezuela. Universidad Rafael Urdaneta. 182 p.

COWI y UNEP. 2000. Cleaner Production Assessment in Meat Processing. 84p.

DAVILA, J. MACHUCA, F., MARRIANGA, N. 2009. Reducción de demanda química de oxígeno, carbono orgánico y sólidos totales en vinazas

- mediante electroflotación/oxidación. Rev. Ingeniería e investigación. Bogotá, Colombia. Vol. 29 N°1. 35-38.
- DESHPANDE, A. 2010. Treatment of highstrength pharmaceutical wastewater by electrocoagulation combined with anaerobic process. Water Science and Technology-WST- 61.2. IWA Publishing.
- FAO. 2017. Tratamiento de los desechos y eliminación de aguas residuales. [En línea]: Departamento de agricultura, (<http://www.fao.org/docrep/004/T0566S/T0566S14.htm>).
- GARCIA, A. 2007. Estudio experimental y teórico de la conductividad eléctrica de soluciones acidas de níquel y zinc. Tesis M. Sc. Metalurgia extractiva. Santiago de Chile, Chile. Universidad de Chile.
- GILPAVAS, E. DARIO, E., SIERRA, L., WHITE, C., OVIEDO, C., RESTREPO, P. 2008. Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. GIPAB. Medellín, Colombia. Universidad EAFIT. 74 p.
- HERNANDEZ, G. 2016. Estudio del manejo del agua en la elaboración de lácteos y su incidencia en los indicadores de desempeño ambiental en la sociedad cooperativa Yutathui de R.L. Tesis Ing. Agroindustrial. El Salvador. Universidad de El Salvador. 52 p.
- JARAMILLO, C., JARAMILLO, A., TABORDA, G. 2005. Construcción de un reactor electroquímico para electrocoagulación como método alternativo en la descontaminación de aguas residuales. Rev. Universidad de Caldas. 145-158.
- JARAMILLO, E. 2012. Diseño y construcción de un reactor de electrocoagulación para el estudio de tratamiento de agua residual de

- tintura y acabado textil. Tesis Ing. Textil. Ibarra, Ecuador. Universidad Técnica del Norte. 136 p.
- KIRZHNER, F., ZIMMELS, Y., SHRAIBER, Y. 2007. Combined treatment of highly contaminated winery wastewater. Rev. ELSEVIER. Haifa, Israel. 38-44.
- NATURAL SYSTEMS. Sf. Environmental technology services [En línea]: Electrocoagulation (<http://www.n-systems.net/electrocoagulation.htm>).
- MARTINEZ, F. 2007. Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. Tesis Dr. Ing. Química. Ciudad Real, España. Universidad de Castilla la Mancha. 259 p.
- MALAKOOTIAN, M y YOUSEFI, N. 2009. The efficiency of electrocoagulation process using aluminum electrodes in removal of hardness from water. Department of environmental health, University of medical sciences. Kerman, Iran. Vol. 6 N°2. 131-136.
- MARIN, F. 2009 Generación electroquímico in situ de coagulantes y desinfectantes para tratamiento de aguas. Mérida, Venezuela. Universidad de los Andes. 85 p.
- MIRANDA, E. 2015. Efecto del tiempo de retención hidráulica y flujos de aire en un tratamiento de lodos activados de las aguas residuales del camal de Tingo María. Tesis Ing. Ambiental. Ciudad Tingo María, Perú. Universidad Nacional Agraria de la Selva. 116 p.
- MOLLAH, M., SCHENNACH, R., PARGA, J., COCKE, D. 2001. Electrocoagulation (EC) – Science and applications. Gill Chair of

Chemistry & Chemical Engineering, Lamar University. Rev. ELSEVIER, USA. 29 – 41..

MOLLAH, M., MORKOVSKY, P., GOMES, J., KESMEZ, M., PARGA, J., COCKE, D. 2004. Fundamentals, present and future electrocoagulation. Departament of chemistry, University of Dhaka, Bangladesh. 12 p.

PIÑA, M., MARTIN, A., GONZALEZ, C., PRIETO, F., GUEVARA, A., GARCIA, J. 2011. Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. Rev. Mexicana de Ingeniería Química. Hidalgo, México. Vol. 10, N° 2. 257-271

PRIETO, F., CALLEJAS, J., REYES, V., MARMOLEJO, Y. 2012. Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lacto suero residual. Rev. AIDIS. Hidalgo, México. Vol. 5, N° 3. 51-77.

RAMIREZ, S. 2013. Remoción de cromo hexavalente por medio de la electrocoagulación. Tesis Ing. Ambiental. Querétaro, España. Universidad Tecnológica de Querétaro. 52 p.

RESTREPO, A. ARANGO, A., GARCÉZ, L. 2006. La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Rev. P+L. Vol. 1 N° 2. Antioquia, Colombia. 59-77.

SALAZAR, J. 2015. Diseño de un biorreactor aerobio para el tratamiento de las aguas residuales del matadero municipal de Tingo María. Tesis Ing. Ambiental. Ciudad Tingo María, Perú. Universidad Nacional Agraria de la Selva. 112 p.

- SARALA, C. 2012. Domestic wastewater treatment by electrocoagulation with Fe-Fe electrodes. Journal of engineering trends and technology. Vol. 8 N°4. Hyderabad, India. 530-533
- SIGNORINI, M., CIVIT, S., BONILLA, M., CERVANTES, M., CALDERON, M., PEREZ, A., DEL PILAR, M., ALMANZA, C. 2006. Evaluación de riesgos de los rastros y mataderos municipales. México D.F, México. Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios. 62 p.
- TAKE, M., SHAIKH, T., MANE, N., MAJUNDER, D. 2002. Biorremediation of xenobiotics: Use of dead fundal biomass as biosorbent. India. 3(1): 5 p.
- VEINTIMILLA, M. 2015. Caracterización de aguas residuales domesticas generadas en la parroquia Tachina del Canton de Esmeraldas. Tesis Ing. Gestión ambiental. Esmeraldas, Ecuador. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. 50 p.

ANEXOS

Apéndice 1. Resultados generales de la investigación

Anexo A. Demanda bioquímica de oxígeno

I	TO	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	Promedio
1A	0	1026	1066	1045	1046
	5	918	910	942	923
	15	506	554	576	545
	30	228	230	238	232
1.5A	0	1032	1030	1048	1037
	5	898	852	892	881
	15	496	514	558	523
	30	150	204	194	183
2A	0	1136	1052	1041	1076
	5	906	886	882	891
	15	472	458	438	456
	30	182	154	132	156

Anexo B. Sólidos totales

I	TO	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	Promedio
1A	0	2799	2951	2617	2789
	5	2332	2577	2195	2368
	15	1575	1800	1433	1603
	30	828	994	755	859
1.5A	0	3070	3244	3141	3152
	5	2420	2689	2495	2535
	15	1475	1751	1633	1620
	30	566	844	725	712
2A	0	3052	2963	3180	3065
	5	2200	2313	2572	2362
	15	1284	1173	1503	1320
	30	447	327	521	432

Anexo C. Sólidos suspendidos

I	TO	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	Promedio
1A	0	1803	1905	1609	1772
	5	1387	1660	1199	1415
	15	814	1006	882	901
	30	195	571	349	372
1.5A	0	1964	2111	2096	2057
	5	1405	1678	1556	1546
	15	771	961	950	894
	30	167	433	327	309
2A	0	2083	1968	2161	2071
	5	1483	1504	1700	1562
	15	821	559	948	776
	30	131	49	93	91

Anexo D. Coliformes totales

I	TO	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	Promedio
1A	0	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³
	5	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³
	15	460x10 ³	240x10 ³	460x10 ³	387x10 ³
	30	4x10 ³	3x10 ³	4x10 ³	4x10 ³
1.5A	0	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³
	5	290x10 ³	460x10 ³	460x10 ³	403x10 ³
	15	15x10 ³	20x10 ³	23x10 ³	19x10 ³
	30	3x10 ³	3x10 ³	0x10 ³	2x10 ³
2A	0	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³
	5	240x10 ³	210x10 ³	210x10 ³	220x10 ³
	15	20x10 ³	15x10 ³	14x10 ³	16x10 ³
	30	0x10 ³	0x10 ³	0x10 ³	0x10 ³

Anexo E. Coliformes fecales

I	TO	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	Promedio
1A	0	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³
	5	120x10 ³	75x10 ³	210x10 ³	135x10 ³
	15	43x10 ³	39x10 ³	75x10 ³	52x10 ³
	30	0x10 ³	0x10 ³	0x10 ³	0x10 ³
1.5A	0	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³
	5	120x10 ³	150x10 ³	150x10 ³	140x10 ³
	15	9x10 ³	6x10 ³	7x10 ³	7x10 ³
	30	0x10 ³	0x10 ³	0x10 ³	0x10 ³
2A	0	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³	>1100x10 ³
	5	93x10 ³	75x10 ³	93x10 ³	87x10 ³
	15	3x10 ³	4x10 ³	0x10 ³	2x10 ³
	30	0x10 ³	0x10 ³	0x10 ³	0x10 ³

Anexo F. pH

I	TO	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	Promedio
1A	0	7.2	6.8	7.1	7
	5	7.8	8.3	8.4	8.2
	15	8.9	9.6	9.2	9.2
	30	9.7	10.1	9.6	9.8
1.5A	0	6.8	7.1	7.2	7
	5	8.9	8.8	8.8	8.8
	15	10	9.5	9.6	9.7
	30	10.7	10.3	10.4	10.5
2A	0	6.7	6.8	7	6.8
	5	8.3	8.2	8.7	8.4
	15	9.7	9.9	9.8	9.8
	30	10.5	10.6	10.6	10.6

Anexo G. Temperatura

I	TO	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	Promedio
1 A	0	25.1	24.3	24.7	24.7
	5	25.2	24.3	24.8	24.8
	15	26.4	25.6	25.9	26
	30	28.5	26.5	27.8	27.6
1.5 A	0	24.9	26.5	25.3	25.6
	5	25.2	26.8	25.9	26
	15	26.9	28.1	26.8	27.3
	30	29.8	29.6	28	29.1
2 A	0	26.1	25.9	24.6	25.5
	5	26.9	26.6	25	26.2
	15	28.7	28.5	26.2	27.8
	30	31.7	30.2	27.9	29.9

Anexo H. Conductividad

I	TO	1ra Prueba	2da Prueba	3ra Prueba	Promedio
1 A	0	1962	2079	2010	2017
	5	1871	1905	1848	1875
	15	1377	1490	1095	1321
	30	913	884	626	808
1.5 A	0	2201	2249	2034	2161
	5	1819	1888	1780	1829
	15	1475	1437	1315	1409
	30	559	808	772	713
2 A	0	1930	1952	2024	1969
	5	1426	1606	1667	1566
	15	916	1349	1095	1120
	30	535	632	647	605

Apéndice 2. Método número más probable y panel fotográfico

Anexo A. Cuadro NMP

Combinación de tubos		Combinación de tubos		Combinación de tubos	
positivos A - B - C	Índice NMP/100 ml	positivos A - B - C	Índice NMP/100 ml	positivos A - B - C	Índice NMP/100 ml
0 - 0 - 1	3	1 - 1 - 2	15	2 - 2 - 3	42
0 - 0 - 2	6	1 - 1 - 3	19	2 - 3 - 0	29
0 - 0 - 3	9	1 - 2 - 0	11	2 - 3 - 1	36
0 - 1 - 0	3	1 - 2 - 1	15	2 - 3 - 2	44
0 - 1 - 1	6	1 - 2 - 2	20	2 - 3 - 3	53
0 - 1 - 2	9	1 - 2 - 3	24	3 - 0 - 0	23
0 - 1 - 3	12	1 - 3 - 0	16	3 - 0 - 1	39
0 - 2 - 0	6	1 - 3 - 1	20	3 - 0 - 2	64
0 - 2 - 1	9	1 - 3 - 2	24	3 - 0 - 3	95
0 - 2 - 2	12	1 - 3 - 3	29	3 - 1 - 0	43
0 - 2 - 3	16	2 - 0 - 0	9	3 - 1 - 1	75
0 - 3 - 0	9	2 - 0 - 1	14	3 - 1 - 2	120
0 - 3 - 1	13	2 - 0 - 2	20	3 - 1 - 3	160
0 - 3 - 2	16	2 - 0 - 3	28	3 - 2 - 0	93
0 - 3 - 3	19	2 - 1 - 0	15	3 - 2 - 1	150
1 - 0 - 0	4	2 - 1 - 1	20	3 - 2 - 2	210
1 - 0 - 1	7	2 - 1 - 2	27	3 - 2 - 3	290
1 - 0 - 2	11	2 - 1 - 3	34	3 - 3 - 0	240
1 - 0 - 3	15	2 - 2 - 0	21	3 - 3 - 1	460
1 - 1 - 0	7	2 - 2 - 1	28	3 - 3 - 2	1100
1 - 1 - 1	11	2 - 2 - 2	35	3 - 3 - 3	>1100

Anexo B. Panel fotográfico

Figura 28. Caracterización del efluente del matadero municipal



Figura 29. Medición de pH



Figura 30. Cortado de electrodos de acero galvanizado y aluminio



Figura 31. Inicio del proceso de electrocoagulación

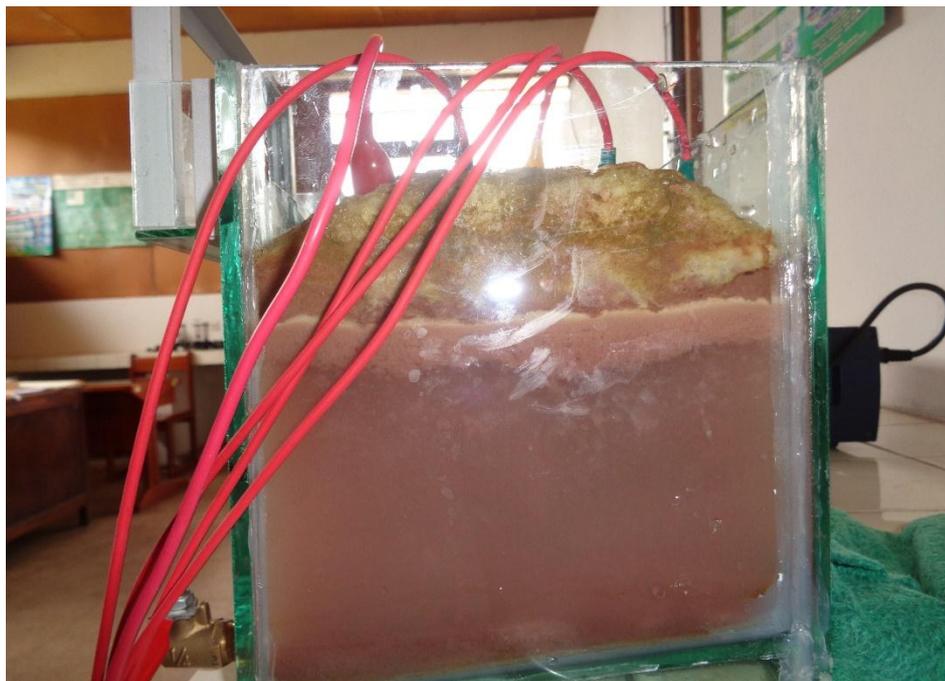


Figura 32. Proceso de electrocoagulación a 20 – 30 minutos



Figura 33. Final del proceso de electrocoagulación



Figura 34. Toma de muestras