

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y**  
**RECURSOS NATURALES**



**Tesis**

**Método de electrocoagulación para la reducción de los parámetros  
fisicoquímicos de las aguas residuales del camal municipal a escala de  
laboratorio, Abancay – 2023.**

Asesor:

**Dra. Soto Carrión, Carolina**

Autores:

**Alvites Quispe, Eder Josué**

**Peña Rivera, Dyane del Pilar**

Para optar el Título Profesional: Ingeniero Ambiental

**Abancay - Apurímac – Perú**

**2024**



# Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

**Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales**  
"Año de la Unidad, la Paz y el Desarrollo"

## ACTA DE TITULO N°. 0013-2024-UTEA-FI-EPIARN

Reunidos los Jurados constituidos por los señores Docentes:

- |                                      |               |
|--------------------------------------|---------------|
| * Mg. Kristhel Jaylane Calderón Aedo | PRESIDENTA.   |
| * Mg. Javier Sierra Puga             | DICTAMINANTE. |
| * Ing. Jessica Alvarado Ramos        | REPLICANTE    |

El postulante al TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

Don (ña): **ALVITES QUISPE, Eder Josué**; ha cumplido con las exigencias del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Tecnológica de los Andes y el Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales.


MODALIDAD DE (\*) SUSTENTACIÓN DE TESIS.

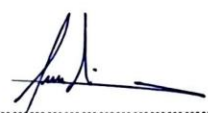
INTITULADA: "Método de electrocoagulación para la reducción de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales del camal municipal a escala de laboratorio, Abancay-2023"

Habiendo aprobado con la nota de: **QUINCE (15).**

Se extiende el Acta, conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, folio(s) N° 149 y 150.

Abancay, 30 de diciembre del 2024.

  
.....  
Mg. Kristhel Jaylane Calderón Aedo  
PRESIDENTE

  
.....  
Mg. Javier Sierra Puga  
PRIMER MIEMBRO  
DICTAMINANTE

  
.....  
Mg. Jessica Alvarado Ramos  
SEGUNDO MIEMBRO  
DICTAMINANTE



# Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

**Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales**  
"Año de la Unidad, la Paz y el Desarrollo"

## ACTA DE TITULO N°. 0013-2024-UTEA-FI-EPIARN

Reunidos los Jurados constituidos por los señores Docentes:

- |                                      |               |
|--------------------------------------|---------------|
| * Mg. Kristhel Jaylane Calderón Aedo | PRESIDENTA.   |
| * Mg. Javier Sierra Puga             | DICTAMINANTE. |
| * Ing. Jessica Alvarado Ramos        | REPLICANTE    |

El postulante al TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

Don (ña): **PEÑA RIVERA, Dyane del Pilar**; ha cumplido con las exigencias del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Tecnológica de los Andes y el Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales.

MODALIDAD DE (\*) SUSTENTACIÓN DE TESIS.

INTITULADA: "Método de electrocoagulación para la reducción de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales del camal municipal a escala de laboratorio, Abancay-2023"

Habiendo aprobado con la nota de: **QUINCE (15).**

Se extiende el Acta, conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, folio(s) N° 149 y 150.

Abancay, 30 de diciembre del 2024.

  
.....  
Mg. Kristhel Jaylane Calderón Aedo  
PRESIDENTE

  
.....  
Mg. Javier Sierra Puga  
PRIMER MIEMBRO  
DICTAMINANTE

  
.....  
Mg. Jessica Alvarado Ramos  
SEGUNDO MIEMBRO  
DICTAMINANTE

## Método de electrocoagulación para la reducción de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales del camal municipal a escala de laboratorio, Abancay – 2023.

### INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>23%</b>	<b>22%</b>	<b>5%</b>	<b>8%</b>
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

### FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>8%</b>
<b>2</b>	<b>repositorio.upn.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>3</b>	<b>repositorio.unas.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>4</b>	<b>Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes</b> Trabajo del estudiante	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>repositorio.uncp.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>repositorio.unh.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>7</b>	<b>repositorio.unac.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>8</b>	<b>dspace.esPOCH.edu.ec</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>

## Metadatos complementarios

<b>Datos del autor 1</b>		
Apellidos y nombres	:	Alvites Quispe, Eder Josué
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	47619110
URL ORCID	:	<a href="https://orcid.org/0000-0003-4457-7859">https://orcid.org/0000-0003-4457-7859</a>
<b>Datos del autor 2</b>		
Apellidos y nombres	:	Peña Rivera, Dyane del Pilar
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	71809682
URL ORCID	:	<a href="https://orcid.org/0009-0003-1601-4212">https://orcid.org/0009-0003-1601-4212</a>
<b>Datos del Asesor</b>		
Apellidos y nombres	:	Soto Carrión, Carolina
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	31011917
URL ORCID	:	<a href="https://orcid.org/0000-0001-5200-5768">https://orcid.org/0000-0001-5200-5768</a>
<b>Datos de la Investigación</b>		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales
Línea de Investigación	:	Calidad Ambiental
Rango de Años en que se realizó la investigación	:	2023 - 2024
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciada
Porcentaje de similitud	:	23%
URL OCDE	:	<a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01</a>

## **Dedicatoria**

A Dios por permitirnos cumplir nuestras metas y objetivos, a nuestros padres cuyo amor inquebrantable y apoyo constante durante esta travesía académica, cada logro alcanzado en este trabajo de investigación es también un tributo a nuestra dedicación y sacrificio. A nuestros seres queridos y amigos por su paciencia infinita, comprensión y ánimo inquebrantable. A nuestra asesora Dra. Carolina Soto Carrión, cuya orientación experta y sabiduría han iluminado nuestro camino a través de sus enseñanzas. A nuestros compañeros de estudio, por compartir desafíos, debates y colaboración han sido una fuente inagotable de aprendizaje y amistad. A todos los que participaron en nuestra investigación por su contribución invaluable y su generosidad al compartir su conocimiento y experiencias no habrían sido posible.

## **Agradecimiento**

En este punto culminante de nuestro viaje académico, queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a Dios. A nuestra familia por su apoyo constante, paciencia y amor incondicional han sido nuestra fuente de inspiración en los momentos buenos y difíciles. A nuestra asesora de trabajo de investigación Dra. Soto Carrión Carolina, por sus recomendaciones, tiempo y dedicación en guiarnos a lo largo de este camino. A todos los participantes de nuestra investigación, por su valiosa contribución y disposición a compartir sus conocimientos y experiencias. También agradecemos a nuestra casa de estudios, por brindarnos herramientas y conocimientos esenciales en nuestro crecimiento profesional y también un reconocimiento a los profesores de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales. Finalmente, a cada uno de nosotros, por la determinación y la perseverancia en superar obstáculos y alcanzar nuestras metas académicas.

## Resumen

El objetivo de esta investigación es aplicar el método de EC (electrocoagulación), para la reducción de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales del Camal Municipal Abancay a escala laboratorio, la población fue determinada por el caudal (Q) del efluente que genera el Camal Municipal Abancay (C.M.A), y fue de 5.23 m<sup>3</sup>/h, y una muestra compuesta de 32 litros, para el uso de 2.5 litros para cada tratamiento empleado con el método de EC. El diseño de esta investigación fue experimental de tipo aplicada con enfoque cuantitativo de nivel explicativo. Para la aplicación del método se empleó electrodos de hierro (Fe) y aluminio (Al), para proceso de reacciones de oxidación (ánodo) y reducción (cátodo), con abastecimiento de energía eléctrica directa (DC) de 30 voltios (V) y 20 voltios (V) y un tiempo de retención de 25 y 15 minutos. Se pudo determinar que en los grupos de tratamientos T1, T2, T3 y T4 el tratamiento T1 fue el tratamiento más eficaz en la reducción de concentración y porcentaje óptimo de remoción para SST al 82.81%, DQO al 92.02%, DBO<sub>5</sub> al 95.78%, y el tratamiento (T3), fue el tratamiento más eficaz en la reducción de concentración y porcentaje óptimo de remoción para fósforo total al 75.81%, nitrógeno total al 46.83% y un pH de 8.8, después de finalizar el proceso de tratamientos se constató que los resultados obtenidos están dentro de los parámetros establecidos en la norma, Valores Máximos Admisibles (VMA) del D.S. N° 010-2019-VIVIENDA.

**Palabras clave:** Agua residual del camal, método de electrocoagulación, contenido de M.O., electrodos de aluminio y hierro.

## **Abstract**

The objective of this research is to apply the EC (electrocoagulation) method to reduce the physicochemical parameters of wastewater from the Abancay Municipal Slaughterhouse at a laboratory scale. The population was determined by the flow rate (Q) of the effluent generated by the Abancay Municipal Slaughterhouse (C.M.A.), which was 5.23 m<sup>3</sup>/h, with a composite sample of 32 liters, using 2.5 liters for each treatment applied using the EC method. The research design was experimental, applied, and had a quantitative approach with an explanatory level. For the application of the method, iron (Fe) and aluminum (Al) electrodes were used for the oxidation (anode) and reduction (cathode) reactions, with a direct current (DC) power supply of 30 volts (V) and 20 volts (V) and a retention time of 25 and 15 minutes. It was determined that among the treatment groups T1, T2, T3, and T4, treatment T1 was the most effective in reducing the concentration and achieving the optimal removal percentages for TSS at 82.81%, COD at 92.02%, and BOD5 at 95.78%. Treatment T3 was the most effective in reducing the concentration and achieving the optimal removal percentages for total phosphorus at 75.81%, total nitrogen at 46.83%, and achieving a pH of 8.8. After completing the treatments, it was confirmed that the results obtained were within the parameters established by the norm, Maximum Allowable Values (VMA) of D.S. No. 010-2019-VIVIENDA.

**Keywords:** Slaughterhouse wastewater, electrocoagulation method, organic matter content, aluminum and iron electrodes.

## Índice general

Portada.....	i
Acta de sustentación.....	ii
Reporte de similitud.....	iv
Metadatos complementarios.....	v
Dedicatoria.....	vi
Agradecimiento.....	vii
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
Índice general.....	x
Índice de tablas.....	xi
Índice de figuras.....	xiii
Índice de anexos.....	xv
I. Introducción.....	16
II. Planteamiento del problema.....	17
2.1. Descripción y formulación del problema.....	17
2.2. Objetivos.....	19
2.2.1 General.....	19
2.2.2. Específicos.....	19
2.3. Justificación e importancia.....	19
2.4. Hipótesis.....	20
2.5. Variables.....	21
III. Marco teórico.....	22
3.1 Antecedentes.....	22
3.2 Bases teóricas.....	30
3.3. Definición de términos.....	52
IV. Metodología.....	54
4.1 Tipo y nivel de investigación.....	54
4.2 Ámbito temporal y espacial.....	54
4.3.Población y muestra.....	57
4.4.Instrumentos.....	59
4.5.Procedimientos.....	61
4.6.Análisis de datos.....	72
4.7.Consideraciones éticas.....	72
V. Resultados y discusión.....	73
VI. Conclusiones.....	111
VII. Recomendaciones.....	113
VIII. Referencias.....	114
XI. Anexos.....	119

## Índice de tablas

Tabla 1. Operacionalización de variables (Dependiente – Independiente)...	21
Tabla 2. Características Físicoquímicas, microbiológicas del agua residual...	32
Tabla 3. Características químicas de aguas residuales de mataderos.....	36
Tabla 4. Características fisicoquímicas del agua residual – matadero.....	37
Tabla 5. Intervalo de tiempo y n° para toma de muestras.....	58
Tabla 6. Instrumentos de recolección de datos .....	60
Tabla 7. Condiciones de conservación de parámetros.....	62
Tabla 8. Desarrollo de los tratamientos .....	69
Tabla 9. Metodología utilizada - Laboratorio LIMTA- Unajma.....	71
Tabla 10. Resultados de la caracterización pre-tratamiento de aguas residuales del C.M.A.....	73
Tabla 11. Resultados de análisis físicoquímico de agua residual del C.M.A. post tratamiento.....	74
Tabla 12. Comparación de resultados de la caracterización pre y post tratamiento de agua residual del C.M.A. con VMA.....	75
Tabla 13. Prueba de comparabilidad Tukey - Sólidos suspendidos totales..	78
Tabla 15. Prueba de comparabilidad Tukey Demanda química de oxígeno..	82
Tabla 16. Eficacia de remoción en (%) del parámetro-DQO oxígeno.....	83
Tabla 17. Prueba de comparabilidad Tukey Demanda bioquímica de oxígeno.....	86
Tabla 18. Eficacia de remoción en (%) del parámetro - Demanda bioquímica de oxígeno.....	86
Tabla 19. Prueba de comparabilidad Tukey - Fósforo total .....	89
Tabla 20. Eficacia de remoción en (%) del parámetro - Fósforo Total.....	90
Tabla 21. Prueba de comparabilidad Tukey - Nitrógeno total.....	93
Tabla 22. Eficacia de remoción en (%) del parámetro - Nitrógeno total .....	93
Tabla 23. Prueba de comparabilidad Tukey - pH. ....	96
Tabla 24. Medición del pH a 30 y 20 volios (V). ....	97

Tabla 25. Resumen de resultados post tratamiento .....	98
Tabla 26. Consumo de energía por los tratamientos establecidos .....	103
Tabla 27. Consumo de energía – (Electrodos, tiempo, v.).....	104
Tabla 28. Consumo de energía, electrodos, tiempo de R. y V. ....	105

## Índice de figuras

Figura 1. Sistema de EC con ánodo y cátodo .....	42
Figura 2. Reactor para electrocoagulación de tipo Batch .....	47
Figura 3. Mapa de ubicación de laboratorio fisicoquímico de la Universidad Tecnológica de los Andes.....	55
Figura 4. Mapa de ubicación, de toma de muestras del efluente del Camal Municipal Abancay.....	56
Figura 5. Flujograma del procedimiento para la recolección de muestras....	62
Figura 6. Flujograma de procedimiento de construcción y montaje del prototipo de EC.....	64
Figura 7. Prototipo del método de electrocoagulación (EC).....	65
Figura 8. Flujograma de procedimiento para la instalación de equipos.....	66
Figura 9. Flujograma para el proceso de EC.....	67
Figura 10. Normalidad de datos – Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	76
Figura 11. Resultado de prueba T Student de datos - SST.....	77
Figura 12. Eficacia de remoción en (%) del parámetro - SST.....	80
Figura 13. Normalidad de datos para DQO .....	81
Figura 14. Resultado de prueba T Student de datos - DQO.....	82
Figura 15. Eficacia de remoción en (%) del parámetro – DQO.....	83
Figura 16. Normalidad de datos para DBO5.....	84
Figura 17. Resultado de prueba T Student de datos - DBO5 .....	85
Figura 18. Eficacia de remoción en (%) del parámetro - DBO5.....	87
Figura 19. Normalidad de datos para fósforo total.....	88
Figura 20. Resultado de prueba T Student de datos - Fosforo total .....	89
Figura 21. Eficacia de remoción en (%) del parámetro - Fosforo total.....	90
Figura 22. Normalidad de datos para Nitrógeno total .....	91
Figura 23. Resultado de prueba T Student de datos - Nitrógeno total.....	92
Figura 24. Eficacia de remoción en (%) del parámetro - Nitrógeno total .....	94

Figura 25. Normalidad de datos para pH.....	95
Figura 26. Resultado de prueba T Student de datos - pH.....	96
Figura 27. Medicion de pH a 30 y 20 V.....	97
Figura 28. Comparación pre y post tratamiento del parámetro - Solido suspendidos totales.....	99
Figura 29. Comparación pre y post tratamiento del parámetro - Demanda química de oxígeno.....	100
Figura 30. Comparación pre y post tratamiento del parámetro - Demanda bioquímica de oxígeno.....	100
Figura 31. Comparación pre y post tratamiento del parámetro – Fosforo total.....	101
Figura 32. Comparación pre y post tratamiento del parámetro – Nitrógeno total.....	101
Figura 33. Comparación pre y post tratamiento – pH.....	102

## Índice de anexos

Anexo 01. Validación de instrumentos.....	122
Anexo 02. Ficha de identificación – punto de ubicación de la muestra.....	123
Anexo 03. Informe N°8-2023 del analisis fisicoquimico LIMTA Unajma.....	124
Anexo04. Cadena de custodia post – Tratamiento – Formato de LIMTA Unajma.....	126
Anexo 05. Ficha tecnica del equipo EC.....	127
Anexo 06. Materiales otorgados por laboratorio LIMTA-Unajma.....	128
Anexo 07. Materiales e insumos complementarios.....	129
Anexo 08. Construcción del prototipo de EC.....	130
Anexo 09. Prototipo del sistema de electrocoagulación.....	132
Anexo 10. Recolección de muestras.....	133
Anexo 11. Procedimiento del metodo de electrocoagulación.....	136
Anexo 12. Resultado post. Tratamiento con el método de EC.....	138
Anexo 13. Placas de electrodos de hierro y aluminio pre y post. T.....	139

## I. Introducción

La investigación se centra en aplicar el prototipo de método de electrocoagulación a escala laboratorio, para disminuir los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales del Camal Municipal Abancay (C.M.A). Este camal se encarga del beneficio de animales vacunos, porcinos, ovinos y caprinos para su producción y consumo de carne, generando una cantidad considerable de aguas residuales sin tratamiento previo, que se vierten directamente al Río Mariño, causando alteraciones calidad del agua, suelo, fuentes de agua, y en el ecosistema, también aborda un problema ambiental crítico, por lo que esta investigación propone una alternativa de solución, en el tratamiento de estos efluentes, ya que el método de EC, es altamente eficaz, genera menos lodos secundarios, aplicabilidad y viabilidad económica, implementación sencilla, menor usos de productos químicos, en comparación con los métodos tradicionales, y también que busca proteger la salud pública de la población aledaña, y cumplir con regulaciones normativas de Valores máximos Admisibles (VMA) del D.S. N° 010-2019-VIVIENDA.

En ese sentido se describirá la realidad problemática de aguas residuales que emite el Camal Municipal Abancay (C.M.A.), problema general y los problemas específicos, explicación de la importancia y relevancia de la investigación, objetivos relacionados con la aplicación del prototipo de método de EC (electrocoagulación), delimitación de la investigación, viabilidad, así como las limitaciones en el desarrollo de investigación. También se describirá antecedentes de la investigación, en relación de la aplicación del prototipo de método de, EC (electrocoagulación), bases teóricas, así como el marco conceptual, la metodología, hipótesis planteadas, método para el desarrollo de la investigación, tipo de investigación, diseño de investigación, identificación de variables dependientes e independientes, técnicas e instrumentos, validez y confiabilidad de datos, así como procedimiento estadístico para interpretación de datos. y se procederá a describir los resultados y discusiones, conclusiones, recomendaciones, referencias utilizadas en la investigación, así como los anexos evidenciando el desarrollo del trabajo de investigación.

## II. Planteamiento del problema

### 2.1. Descripción y formulación del problema

La Agencia de las Naciones Unidas (2017), señala que las aguas residuales en todo el mundo, más del 80 % se descargan sin ningún tratamiento previo a su vertimiento, compuesto mayormente por materia orgánica (M.O.) y otras sustancias presentes, se prevé que la producción de aguas residuales incremente al 32 % para 2025, y que la demanda de agua supere a la oferta en un 40 % al final de la década.

Por otro lado La Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS) (2022), según sus informes presentados por empresas proveedoras hasta octubre de 2021, se tuvo un total de 202 (PTAR), de cuales 171 están en operación y 04 en construcción y 27 proyectos detenidos debido a dificultades en el diseño o ejecución, de las 27 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) afectadas, se completaron las obras en 10 de ellas, aunque no fueron puestas en funcionamiento, mientras tanto en las 17 restantes, la ejecución de la obra quedó inconclusa.

En el Perú se visualizan que en los camales se emplean agua en sus diversos procesos, con lo cual se produce efluentes con grandes concentraciones de materia orgánica, por otra parte muchos de los establecimientos no cuentan con un adecuado tratamiento de sus efluentes, por lo mismo no pueden ser reutilizadas, no obstante los camales son fundamentales para la obtención de alimentos esenciales, carnes para consumo humano, cabe señalar que alrededor de 200 camales a nivel nacional funcionan sin la debida autorización del SENASA, lo que demuestra deficiencias de los municipios en la gestión de estas instalaciones (Sánchez y Villaverde, 2020).

También se ha observado que mayoría de los camales municipales no cuentan con sistemas adecuados en tratamientos de sus efluentes líquidos que contienen cantidades de materia orgánica, lo que da lugar el vertido o descargas de dichas aguas al aumento de contaminación ambiental, convirtiendo a que los camales y/o mataderos sea una amenaza para el ecosistema y provocando daños en la calidad del agua, la salud y el suelo (Quispe,

2021). Actualmente en el C.M.A., se pudo constatar el mismo problema, donde el vertido de efluente líquido del matadero no cuenta con un tratamiento previo con anterioridad a su vertido a un sistema alcantarillado que desemboca directamente al Rio Mariño, donde se evidencia que el agua residual emitido hay presencia de cantidades significativas de materia orgánica, desechos de sangre, excretas, pelos, y otros desechos de vacunos, porcinos entre otros, esta situación podría causar repercusiones negativas en la salud y bienestar de la población aledañas, fuentes de agua, suelo, actividades agrícolas, ganadera, entre otros, lo que contribuye al aumento de la contaminación ambiental al Rio Mariño.

### **2.1.1. Problema general**

- ✓ ¿En qué medida el método de electrocoagulación a escala laboratorio permite la reducción de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2022?

### **2.1.1. Problemas específicos**

- ✓ ¿Cuáles son los parámetros fisicoquímicos que se caracterizarán en las aguas residuales del camal municipal de Abancay, 2022?
- ✓ ¿De qué manera el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio permitirá la reducción de concentración de sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), fósforo total, nitrógeno total, pH, en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2022?
- ✓ ¿Cuál es el porcentaje óptimo de remoción al aplicar el prototipo del método de electrocoagulación en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2022?

## **2.2. Objetivos**

### **2.2.1 General**

- ✓ Aplicar el método de electrocoagulación a escala laboratorio para la reducción de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2022.

### **2.2.2. Específicos**

- ✓ Caracterizar los parámetros fisicoquímicos, como sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), fósforo total, nitrógeno total, pH, de las aguas residuales del camal municipal de Abancay, 2022.
- ✓ Reducir eficazmente la concentración de sólidos suspendidos totales (SST), la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), fósforo total, nitrógeno total, pH, mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio de las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2022
- ✓ Obtener el porcentaje óptimo de remoción al aplicar el prototipo del método de electrocoagulación de las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2022

## **2.3. Justificación e importancia**

En lo social la mayoría de las actividades humanas que utilizan el agua generan aguas residuales. A medida que la demanda total de este recurso vital aumenta, la cantidad de aguas residuales producidas y su carga contaminante también aumentan de manera constante. Por ende, el C.M.A. no cuenta con ningún tipo de proceso de tratamiento de aguas residuales para su posterior vertimiento, esto representa un riesgo para la salud de la población aledaña, contaminar las fuentes de agua utilizadas para consumo humano, suelos, actividades agrícolas, ganaderas entre otros. Por lo tanto, la aplicación del prototipo de método, de EC (electrocoagulación) servirá como una alternativa para su

implementación a gran escala en el tratamiento del efluente del C.M.A. previo a su vertimiento, para proteger la salud y el bienestar de la población aledaña, así como los componentes ya mencionados anteriormente. En lo económico, la ausencia de tratamiento de estas aguas residuales del C.M.A., puede traer costos significativos, en la salud de la población aledaña, productividad agrícola, ganadera entre otros. De otro modo, al implementar a gran escala del prototipo aplicado de método de EC (electrocoagulación), ayudará a reducir estos costos al prevenir la contaminación y sus efectos negativos en la economía local, así mismo el costo de tratamientos con la metodología aplicada a escala laboratorio, de cada 1m<sup>3</sup> de efluente tratado, en promedio sería de s/.12.6 evidenciando costos muy significativos en comparación con métodos tradicionales. En lo ambiental, al desembocar los efluentes directamente al Río Mariño, puede genera repercusiones al ecosistema acuático y afectar la biodiversidad local, fuentes de agua, suelo, y degradación de hábitats naturales. También la implementación a gran escala, del prototipo aplicado de método de EC (electrocoagulación) ayudará a minimizar estos impactos ambientales al reducir la carga contaminante y proteger fuentes de agua, suelo, y degradación de hábitats naturales. Por otra parte, esta investigación ayudará a obtener resultados de niveles de contaminación de los 06 parámetros evaluados, cumplir con las normativas, implementar, métodos, procedimientos, estrategias de mitigación de sus efluentes, del C. M. A., administrado por la Sub-Gerencia de Comercialización de la Municipalidad Provincial de Abancay, también esta investigación ayudará a visualizar futuras investigaciones en la mitigación de tratamientos de efluentes de aguas residuales procedentes de camales y/o mataderos.

## **2.4. Hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

- ✓ El método de electrocoagulación a escala laboratorio influirá significativamente en la reducción de parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2022.

### **2.4.2. Hipótesis específica**

- ✓ Los parámetros fisicoquímicos, como sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), fósforo total, nitrógeno total y pH, caracterizados exceden los Valores Máximos Admisibles (VMA) en las aguas residuales del camal municipal de Abancay, 2022.
- ✓ Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio reducirá eficazmente la concentración de sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), fosforo total, nitrógeno total, pH, de las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2022.
- ✓ El porcentaje óptimo de remoción influirá al aplicar el prototipo del método de electrocoagulación en comparación con los resultados de la caracterización pre tratamiento de las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2022.

## 2.5. Variables

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables (Dependiente – independiente).*

Variables	Dimensiones	Indicadores	Índices
<b><u>Variable dependiente:</u></b>  Aguas residuales del camal Municipal, Abancay	Parámetros fisicoquímicos	✓ Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L
		✓ Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L
		✓ Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L
		✓ pH	-
		✓ Fosforo total	mg/L
<b><u>Variable independiente:</u></b>  Método de electrocoagulación	Criterios de operación	• Voltaje	(V)
		• Tiempo de retención	min

*Nota:* Elaboración propia

### III. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Antecedentes

##### 3.1.1 A nivel internacional

Olivera (2019), en su desarrollo de investigación, "Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Láctea Mediante la Electrocoagulación", La Paz – Bolivia, el principal objetivo del estudio fue evaluar la efectividad del método (EC) para poder disminuir la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) de efluentes en industria láctea. En la metodología se construyó un sistema de electrocoagulación y se realizaron experimentos para estipular condiciones eficientes de trabajo de variables clave: voltaje, número de placas y tiempo de respuesta. Los resultados de los experimentos realizados demostraron procesos óptimos del tratamiento de electrocoagulación (EC), consiguiendo porcentajes de eliminación en: DQO - Demanda Química de Oxígeno en 90,09% y DBO<sub>5</sub> - Demanda Bioquímica de Oxígeno en 89,22%, dichos valores óptimos se consiguieron a 20 voltios, 10 placas y un tiempo de retención de 60 minutos. Se concluye que el método de EC - electrocoagulación es efectivo en remover contaminantes en aguas residuales de industria láctea. Además, se cumple las normas y reglamentos nacionales para la eliminación de aguas residuales. Finalmente, la (EC) se presenta como una tecnología válida para solucionar los problemas en contaminación provocada por la industria láctea y proteger el medio ambiente.

Tenelema (2019), en su trabajo de investigación denominado, "Diseño de un Electrocoagulador para el Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Láctea Familiar del Cantón Chambo" Riobamba - Ecuador, el punto principal de su investigación fue desarrollo de un electrocoagulador para tratar el efluente de la Industria Láctea Familiar en el Cantón Chambo, como los efluentes industriales se vierten directamente al sistema de alcantarillado sin tratamiento previo, el objetivo era implementar una solución eficaz para reducir esta carga. La metodología se inició con el muestreo de aguas residuales para su caracterización físico-química. Se identificaron parámetros que superaban los estándares,

incluidos aceites y grasas (AyG), ( $\text{DBO}_5$ ), (DQO), (SST), (ST) y (S). El efluente se trató luego mediante electrocoagulación. La celda de prueba se diseñó teniendo en cuenta variables como la colocación de los electrodos, el amperaje y el tiempo del proceso de tratamiento. Además, se realizaron operaciones matemáticas para dimensionar el electrocoagulador, se diseñó un sistema decantador como parte en el sistema de proceso de tratamiento. En el tratamiento más eficiente se utilizó distribución de varillas/electrodos de aluminio (Al-Al), una intensidad de corriente (DC) de 3 A (amperios) y un período de proceso de 15 min., que se utilizó para validar el diseño. Se completaron remociones significativas de contaminantes bajo estas circunstancias: 91,50 % de (A y G), 84,50 % de  $\text{DBO}_5$ , 83,00 % de DQO, 98,70 % de SST, 61,40 % de TS y 92,20 % en general. En conclusión, dicho diseño del electrocoagulador logró disminuir la contaminación en aguas residuales de industria láctea de FAMILAC. Para su descarga al sistema alcantarillado público, cumplió con requisitos de la regulación normativa. Se concluye que el uso de esta técnica puede reducir significativamente la contaminación de efluentes, debido a los altos porcentajes de contaminantes removidos, recomienda que la Industria Láctea de FAMILAC, adopte estas técnicas como parte de su proceso de tratamiento de aguas residuales.

Morales (2023), en desarrollo de su trabajo de investigación denominado, "Reducción de Contaminantes (Cromo,  $\text{DBO}_5$ , DQO) Por Electrólisis en las Curtiembres de la Provincia de Tungurahua" Ecuador, cuyo objetivo principal de su investigación fue de reducir la contaminación causada por curtiembres, con un enfoque particular en (Cromo), la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días ( $\text{DBO}_5$ ) y la demanda química de oxígeno (DQO). En la metodología se utilizó el proceso de electrólisis, en el que los elementos se separan mediante la electricidad. Las pruebas se realizaron en cuatro muestras diferentes, teniendo en cuenta tres variables: amperios (energía eléctrica), distancia y tiempo, ya que juegan un papel determinante en reducción de emisiones. Cuyos resultados de las pruebas en múltiples variables mostraron reducción en sus niveles de contaminantes en al menos un 50 %. Sin embargo, la segunda muestra mostró la mayor disminución en ( $\text{DBO}_5$ ), DQO

y concentración de (cromo total). Esta muestra se obtuvo utilizando 10 amperios (A), una distancia de 30 centímetros (cm) y tiempo de electrólisis de 24 horas. Las conclusiones de este estudio sugieren que existe una correlación entre la distancia de electrólisis y la reducción de cromo. Se ha observado que a medida que aumenta la distancia entre los electrodos, la contaminación por cromo disminuye debido al campo electromagnético se debilita por separación de electrodos. Al reducir la concentración de cromo el (DBO<sub>5</sub>) y (DQO) también disminuyen. En conclusión, este estudio muestra el uso de la electrólisis como una estrategia eficaz para reducir concentraciones de contaminantes, especialmente (Cromo), en efluentes de las curtiembres. Cuya investigación se centró en la influencia de las variables amperio, distancia y tiempo en el proceso de electrólisis y su impacto en la reducción de contaminantes. Estos resultados podrían ayudar a mejorar las prácticas ambientales en la industria del cuero y encontrar soluciones sostenibles para reducir la contaminación.

Cobo (2020), en su desarrollo de investigación denominado, "Recuperación de Cromo (III) Mediante los Métodos de Electrocoagulación y Precipitación en la Empresa Tenería Díaz" Riobamba – Ecuador. El principal propósito de la investigación consistió en recuperar Cromo (III) a partir de aguas residuales de la etapa de curtido en Tenería Díaz, empleando técnicas de electrocoagulación y precipitación. El efluente se analizó previamente análisis físico y químico para ver cómo se comparaba con los límites establecidos por las normativas ambientales. En la metodología se desarrolló una comparación de los resultados obtenidos con las restricciones establecidas en el Reglamento TULSMA, particularmente en lo que respecta a las descargas al sistema de alcantarillado público. Luego se pusieron en práctica las técnicas sugeridas. Se administraron tres tratamientos de electrocoagulación a varios voltajes (5, 10 y 15 voltios) durante un total de 15 minutos, para recuperar el Cromo (III), luego la precipitación se desarrolló usando el (NaOH) en varias concentraciones ((4 M y 5 M) sin disolver). De otro lado, cada muestra se dejó reposar durante 24 horas, después se analizó el precipitado conseguido desde luego obtener su eficacia de recuperación. Los hallazgos mostraron que

la precipitación tuvo un porcentaje de recuperación más alto (99,7 %) que el obtenido de la electrocoagulación. Este comportamiento se explica por el potencial químico que aumenta con concentraciones más altas de NaOH, en consecuencia, hace que se forme más precipitado. La investigación concluye que el método de precipitación es superior en esta situación para recuperar cromo (III). La precipitación se sugiere como método de tratamiento porque ofrece una alta tasa de recuperación de cromo y puede ayudar con el manejo adecuado de efluentes de la empresa Tenería Díaz.

Cruz y Mendoza (2022), en su desarrollo de investigación denominado, “Efectividad del Tratamiento Electroquímico en Aguas Residuales Provenientes de una Planta Procesadora de Plátanos y de una Industria Agroquímica en Guayaquil”, Ecuador. El principal objetivo de su investigación fue aplicación del tratamiento electroquímico de efluentes de dos industrias: plantas procesadoras de banano e industria agroquímica. La eficacia de este tratamiento se evaluó analizando dos parámetros clave: Demanda Química de Oxígeno (DQO), turbidez. En la técnica y/o método de electrocoagulación experimental se utilizó para lograr el objetivo, para cada tipo de agua residual, se identificaron las circunstancias ideales de operación, estos parámetros incluyeron una conductividad (C.E.) de 1940 uS/cm y un pH de 9.40, una corriente de 6 A. (amperios) y tiempo de residencia de 15 minutos en caso de planta procesadora de banano. Como resultado de la remoción de la turbidez fue de 99,92 % y DQO al 51,63 %. Las condiciones para aguas residuales de Industria Agroquímica fue conductividad (C.E) de 1350 uS/cm, pH de 6.83, corriente de 4 A. (amperios), tiempo de residencia de 15 minutos, esto llevó una remoción en 86,85 % de turbidez y la DQO al 88,36 % respectivamente. En conclusión, el tratamiento de (EC) electrocoagulación ha demostrado ser eficiente en tratamientos primarios en ambos sectores, ya que reduce significativamente: Carga orgánica y turbidez de aguas residuales. La planta procesadora de banano muestra mayores reducciones en la turbidez, mientras que la industria agroquímica logra mayores reducciones en la carga orgánica. Por ende, el tratamiento de (EC) electrocoagulación es opción viable para solucionar problemas de contaminación de efluentes en industriales de Guayaquil.

### **3.1.2. A nivel nacional**

Vasquez (2019), en su trabajo de investigación denominado, “Aplicación del Sistema de Electrocoagulación a Nivel de Laboratorio con Electroodos de Aluminio y Fierro para la Reducción de los Parámetros Físicoquímicos de las Aguas Residuales del Camal S.A.G.E.I.S.A.”. El objetivo investigativo fue evaluar la efectividad del sistema de EC - electrocoagulación al nivel laboratorio utilizando barras de hierro y aluminio para reducir concentraciones de parámetros físicos y químicos en el efluente del matadero SAGEISA y prepararlo para su disposición. Se trabajó con población a 1,36 m<sup>3</sup>/h y volúmenes de 3 L por tratamientos. La metodología de desarrollo fue cuasi-experimental, orientado a la aplicación y basado en un enfoque cuantitativo con fines explicativos. El sistema de EC - electrocoagulación utilizó barras de Al (aluminio) y (Fe) fierro para generar reacciones químicas de oxidación (ánodo) y reducción (cátodo) a (V) voltajes en 20 y 30 voltios y concentraciones de (NaCl) en 10 y 15 g/l. Los tiempos de almacenados estuvieron entre 15 y 30 min. Los resultados indicaron que el tratamiento designado como T6 fue el óptimo, logrando reducciones significativas en varios parámetros. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) se redujo en un 97.20%, los sólidos suspendidos totales (SST) en un 94.55% y la demanda química de oxígeno (DQO) en un 97.00%. Estos logros se obtuvieron utilizando una configuración de 30 V, 15 g/L de NaCl y tiempos de retención de 15 y 30 minutos. En conclusión, el estudio demostró que el sistema de (EC) con electrodos/barras de Al y Fe redujo efectivamente dichos parámetros de manera significativa los parámetros físico-químicos del efluente del matadero SAGEISA. El tratamiento óptimo (T6) logró niveles de remoción consistentes con estudios previos en esta área. Estos resultados subrayan la factibilidad de la (EC) como opción efectiva al tratamiento de agua residual para su disposición final.

Cueva y Pereda (2020), en su desarrollo de investigación “Efecto del Amperaje y Tiempo del Proceso de la Electrocoagulación en el Tratamiento de Aguas Residuales del Camal de José Leonardo Ortíz”. El objetivo principal de este estudio fue analizar el efecto de los cambios de corriente (A) y tiempo (Min) en el proceso de EC en tratamiento de aguas

residuales de un matadero en José Leonardo Ortiz - Chiclayo. En cuya metodología realizaron 27 pruebas de electrocoagulación con muestra de fluentes del Camal Municipal José Leonardo Ortiz. Se utilizó una celda de tipo Bach con barras de acero 304 como cátodo y aluminio como ánodo, e dieron diferentes combinaciones de corrientes eléctricas, incluyendo 8, 10 y 12 amperios, con tiempos de tratamiento de (20, 25 y 30) min. Datos recopilados de experimentos se examinaron cuidadosamente para evaluar el impacto en los parámetros. Resultados mostraron que el tratamiento es óptimo (30 minutos a 12 amperios) condujo a una reducción significativa en varios parámetros de contaminantes orgánicos. Demanda química de oxígeno (DQO) disminuyó un 94,27%, la demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) disminuyó un 87,78%, los sólidos suspendidos totales (SDT) disminuyeron un 88,45%, un 98,22% en grasas y aceites y un 90,06% en turbidez. Estos resultados subrayan la efectividad de emplear electrocoagulación para reducir significativamente parámetros de contaminantes orgánicos de aguas residuales. En conclusión, este estudio ha demostrado que la electrocoagulación, especialmente cuando se opera durante 30 minutos y a 12 amperios, es muy eficaz para reducir los parámetros de contaminantes orgánicos en el efluente del matadero José Leonardo Ortiz. Resultados subrayan el potencial de la electrocoagulación como método eficaz para el tratamiento de aguas residuales y la reducción de contaminantes orgánicos en condiciones industriales.

Carhuapoma (2019), en su desarrollo de investigación denominado "Tratamiento de las Aguas Residuales del Camal Privado Frigorífico Industrial Valle Verde Inversiones Trece S.A.C. Mediante Procesos Electroquímicos". El principal objetivo de este trabajo fue determinar el procedimiento de electrocoagulación adecuado, considerando factores como el tiempo, la corriente, los electrodos y la tasa óptima de reducción de la contaminación. La metodología utilizada comenzó con la caracterización del efluente del matadero y evaluó parámetros como:  $DBO_5$ , DQO, pH y turbidez, conductividad eléctrica (C.E.) y sólidos totales (T.S.). Las muestras fueron sometidas a electrocoagulación (EC) en un tanque de vidrio con electrodos de aluminio y hierro. Variaron los tiempos (10, 20 y 30 minutos) y las corrientes (2 y 3 amperios) y luego se compararon los resultados con las muestras antes

del proceso electroquímico. El resultado inicial de la caracterización mostró valores elevados de DBO<sub>5</sub> (1991.64 mg/l), DQO (4234.41 mg/l) y C.E. (2828,40  $\mu$ S/cm), SDT (3408,19 mg/L), turbidez (285 NTU) y pH (6,7). Se obtuvieron valores medios disminuidos después de la electrocoagulación: DBO<sub>5</sub> = 63.733 mg/l; DQO = 232.89 mg/l; Turbidez = 5.6 NTU; SDT = 229.5 mg/L. En término se ha demostrado la electrocoagulación (EC) es un método/técnica de tratamientos de aguas residuales altamente aceptable. Dicha condición óptima se logró con una corriente de 3 (A) amperios y una duración de 30 min., resultando en una reducción significativa del 96,80% en DBO<sub>5</sub> y del 94,50% en DQO. Estos resultados subrayan la eficacia de EC - electrocoagulación como solución para tratar los efluentes de mataderos con beneficios medibles en la reducción de contaminantes.

Chavez y Robles (2019), en su desarrollo de investigación denominado, "Reaprovechamiento de Aguas Residuales de la Industria de Embutidos, Mediante la Electrocoagulación, para el Riego de Áreas Verdes, Villa El Salvador", el principal objetivo del desarrollo de investigación es evaluar, la factibilidad de la (EC) como método para reutilizar aguas residuales de industria de embutidos para posterior uso en riego de espacios verdes en el distrito de Villa El Salvador. La metodología para llevar a cabo este estudio se utilizó un enfoque de investigación aplicada con un diseño experimental de naturaleza cuantitativa, dicha muestra de agua residual de industria de embutidos consistió en 10 L, desarrollándose en laboratorio de la Universidad César Vallejo (UCV) y se implementaron cuatro tratamientos diferentes, en los cuales se variaron el tiempo de reacción y la densidad de corriente aplicada durante el proceso de electrocoagulación. Los resultados obtenidos indicaron mejoras significativas en sus propiedades de aguas tratadas, logrando reducción al 35.38% en conductividad eléctrica, del 98.68% en sólidos en suspensión, del 98.25% en aceites y grasas, del 98.27% en la DBO<sub>5</sub> (Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días) y del 95.58% para DQO (Demanda Química de Oxígeno). Estos resultados alcanzaron utilizando condición específica de operación, incluyendo intensidad de corriente al 11.1 A/m<sup>2</sup>, tiempo de reacción de 60 min., distancia en 20 mm entre electrodos, placas de hierro (Fe) y aluminio (Al), potencial de hidrógeno

(pH) a 7.65, una C.E. de 2522.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y temperatura de 24.4 °C. En conclusión, la técnica de EC demostró ser efectiva para mejorar la calidad del agua residual de industria de embutidos, permitiendo que sus aguas tratadas fueran adecuadas para su utilización para áreas verdes en distrito Villa El Salvador. Estos resultados sugieren un enfoque prometedor para el manejo sostenible de las aguas residuales industriales y la contribución a la conservación del medio ambiente en zonas urbanas.

Alvino (2019), en su desarrollo de investigación de nominado “Eficiencia de la Electrocoagulación a Nivel de Laboratorio para Tratamiento del Agua Residual del Matadero Municipal de Tingo María”. El principal objetivo de este estudio fue estimar la efectividad de electrocoagulación a escala laboratorio en tratamiento de aguas residuales del (Matadero Municipal de Tingo María). El enfoque estuvo en la reducción de  $\text{DBO}_5$ , ST, nitrógeno total y fósforo total, teniendo en cuenta factores como la  $T^\circ$ , intensidad de corriente (A) y tiempo (Min.). Metodología del trabajo se centró el uso de la técnica de EC, utilizando electrodos/barras de sacrificio de Al. Fase experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Física, mientras que el análisis de parámetros se llevó en Laboratorios de Suelos y Microbiología de la U.N.A.S. Los resultados mostraron que la electrocoagulación fue efectiva en remover:  $\text{DBO}_5$ , sólidos totales, nitrógeno t. y fósforo t. Se logró una excelente eficiencia de remoción bajo las condiciones de operación especificadas, a 75°C, 5A de corriente y 15 minutos de tiempo y la  $\text{DBO}_5$  se redujo a 96.28 %, los sólidos totales a 97.8 %, Nitrógeno T. a 70 % y Fósforo T. a 63.2 %. En conclusión, el estudio demostró que la EC es un método/técnica prometedora para tratamientos de aguas residuales del matadero municipal Tingo María. Los resultados sugieren que esta técnica puede ser efectiva para reducir varios contaminantes bajo ciertas condiciones. Estos resultados subrayan la importancia de la electrocoagulación como posible solución a los problemas ambientales en aguas residuales.

## **3.2 Bases teóricas**

### **3.2.1 Agua (H<sub>2</sub>O)**

Sustancia natural que constituye el 70 % de la superficie terrestre y no tiene sabor, color ni olor, está formado por (dos átomos de hidrógeno) y (un átomo de oxígeno). Se considera solvente universal por tener la capacidad de disolver la mayoría de sustancias con las que entra en contacto, forma sólida, líquida o gaseosa, a partir de estas sustancias pueden producir iones, complejos solubles e insolubles y coloides, objetos dispersos de varios pesos y tamaños (OMS, 2006).

### **3.2.2 Características del H<sub>2</sub>O - agua**

En su estado natural el agua ya contiene una variedad de compuestos que se agregaron como resultado del ciclo hidrológico por el que atraviesa dependiendo de su ubicación, de fases físicos y químicos que allí se desarrollan y composición del suelo, estos compuestos confieren a las aguas naturales diferentes propiedades, según su origen, el agua tiene varias características físicas que la diferencian, como la turbidez, el color, los sólidos en suspensión y la C.E., características químicas, alcalinidad, pH, dureza y oxígeno disuelto (Orellana, 2005).

### **3.2.3 Contaminación del H<sub>2</sub>O - agua**

Principales indicadores contaminantes del agua:

- a) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>):** Cantidad de oxígeno necesaria para llevar a cabo degradación bioquímica de materia orgánica contenida en aguas residuales, tanto domésticas como industriales en términos generales, (Echarri, 2007).
- b) Demanda química de oxígeno (DQO):** Medida de oxígeno requerido para oxidar la M.O., presente en una muestra de agua, bajo condiciones específicas: Agente oxidante, T° y T (Echarri, 2007).

- c) **Sólidos suspendidos totales:** Se refieren a partículas sólidas compuestas por materia orgánica en suspensión, las cuales pueden ser capturadas a través de un proceso de filtración, estas partículas suelen originarse mayoritariamente de fuentes orgánicas como desechos, restos de alimentos, residuos y otros materiales suspendidos en agua (Marín, 2013).
- d) **pH:** Se rige como un factor crucial capaz de indicar la presencia de contaminación cuando el agua residual contiene elevadas concentraciones de iones de hidrógeno (Marín, 2013).
- e) **Materia flotante:** Se trata de materia gruesa de considerables dimensiones que queda atrapada por redes con aberturas de alrededor de 2,8 mm a 3,3 mm de diámetro, es fundamental destacar que retener la materia en suspensión resulta de gran importancia ya que se someterá a un tratamiento posterior esto se hace con el propósito de evitar cualquier complicación durante el proceso de tratamiento (Marín, 2013).
- f) **Nitrógeno:** La presencia de nitrógeno orgánico en estas aguas proviene principalmente de las excretas de organismos en forma de urea, aunque el N es un nutriente esencial para progresión de microorganismos en el agua, su exceso puede conducir a la eutrofización, que es el enriquecimiento excesivo de nutrientes en el agua afectando la oxigenación del entorno, además cuando el nitrógeno se encuentra en forma inorgánica puede ser tóxico para la vida acuática en flora y fauna (Villaseñor, 1998).

#### **3.2.4 Aguas residuales**

Aquellas aguas que han experimentado alteraciones fisicoquímicas debido a actividades humanas e industriales, debido a su calidad baja requiere de tratamientos para su reutilización o disposición, estas aguas pueden ser liberadas a cuerpos de agua o conducida a sistemas de alcantarillado los contaminantes presentes en estas aguas tanto orgánicos como inorgánicos se encuentran en suspensión en la solución, la concentración

de estos elementos puede variar considerablemente según su origen de descarga que puede ser industrial, agropecuario o municipal (Hernández, 2007).

Según el autor Hernández (2007), lo clasifica en:

- ❖ Aguas blancas, aquellas que provienen de sistemas de drenaje y escorrentía superficial, originadas principalmente por precipitaciones pluviales, sus contaminantes se originan por arrastre de partículas presentes en la atmósfera y lavado de suelos y superficies.
- ❖ Las aguas grises, aquellas que provienen de fuentes como bañeras, lavavajillas, duchas y lavadoras, aunque contienen una carga contaminante relativamente baja en comparación con otras aguas residuales, estas aguas aún pueden contener ciertos niveles de contaminantes.
- ❖ Las aguas negras, son aquellas que provienen de desechos de actividades humanas, domésticas e industriales o agrícolas, estas aguas presentan una carga contaminante más alta debido a su origen variado y a menudo contienen una mezcla de sustancias contaminantes.

## Tabla 2

*Características fisicoquímicas, microbiológicas de agua residual.*

<b>Característica</b>	<b>Promedio</b>
pH	7,31
T °C	23,56
Aceites y grasas (mg/L)	231,6
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	2877,57
DQO (mg/L)	2195,75
N. (mg/L)	65,89
S.S. (mg/L)	1377,51
Coliformes totales (UFC/100 ml)	2,8*10 <sup>8</sup>
Escherichia Coli (UFC/100 ml)	1,6*10 <sup>7</sup>

*Nota:* Becerra, 2014

### 3.2.5 Características físicas de aguas residuales

Según a Metcalf y Eddy (1996), la característica física primordial en aguas residuales es la aglomeración total de sólidos, materia suspendida, sedimentables, coloidales, disueltas y otras cualidades físicas relevantes incluyen olor, t, °C, densidad, color y turbidez.

- a) **Olor:** Originados por gases liberados en fases de descomposición de M.O., agua residual fresca posee aroma algo desagradable el cual es tolerable en comparación con aguas residuales sépticas, la cuestión de los olores se considera como el principal motivo de resistencia para implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales (Orozco, 2005).
- b) **Temperatura:** Tiende a ser constantemente más alta que la del agua potable, principalmente debido a mezclarse de agua caliente provenientes de hogares y diversos procesos industriales (Orozco, 2005).
- c) **Color:** Según el agua residual generalmente muestra un tono grisáceo, a medida que el tiempo de transporte en redes de alcantarillado se prolonga y establecen condiciones más cercanas a las anaeróbicas, el color del agua residual evoluciona gradualmente de gris a gris oscuro, eventualmente llega a adquirir un tono negro, momento en el cual se considera que el agua residual se vuelve séptica (Arboleda, 1992).
- d) **Turbidez:** Capacidad de un agua para transmitir luz, constituye otro indicador de calidad del agua vertida o el agua natural en relación a su contenido de materia en suspensión y coloidal, la dispersión de materia coloidal interfiere con la transmisión de la luz al absorberla (Orozco, 2005).
- e) **SST:** Desde una perspectiva analítica, se describe como el residuo resultante después de exponer muestra de agua a un proceso de evaporación en el rango en temperatura de 103 °C – 105 °C (Collazos, 2008).

- f) Densidad:** Es un factor físico relevante del agua residual ya que influye en la posible generación de corrientes de densidad en los lodos de sedimentación y otros procesos de tratamiento, en el caso de las aguas residuales domésticas sin grandes cantidades de desechos industriales su densidad es casi igual a la del agua a la misma temperatura (Collazos, 2008).
- g) Conductividad:** Es la capacidad para transportar electricidad y refleja la presencia total de sustancias iónicas en el agua, ya sea ácidos, bases o sales que se disocian en iones. (Arboleda y Herrera, 2015).

### 3.2.6. Características químicas de aguas residuales

- a) Potencial de Hidrogenión (pH):** Según a Moreno (1997), el pH es una medida que indica la acidez o alcalinidad de una solución, se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) en una solución, y en el agua residual generalmente se encuentra entre 7 y 8 valores más bajos indican la presencia de descargas ácidas, mientras que valores altos señalan descargas alcalinas, ambas posiblemente originadas por actividades comerciales o industriales.
- b) Demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ):** Según Ramalho (1996), Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) se refiere al consumo de oxígeno efectuado por microorganismos y/o contaminantes que se someten a un proceso de oxidación durante un lapso de tiempo (generalmente 5 días). a una temperatura controlada (usualmente  $20^{\circ}C$ ), esta metodología consiste fundamentalmente en cuantificar la proporción de  $O_2$  consumido por microorganismos, en mayoría bacterias, mientras utilizan la M.O., presente en la muestra, replicando condiciones similares a las naturales, la técnica de  $DBO_5$  se emplea a fin de estimar la proporción de M.O. biodegradable contenida en la muestra bajo evaluación.

- c) Demanda química de oxígeno (DQO):** El autor Orozco (2005), la DQO, representado en unidad de mg/l de O<sub>2</sub> requerido para oxidar sustancias reductoras presentes en agua e indicador que cuantifica las cantidades aproximadas de M.O. total en el agua.
- d) Oxígeno disuelto:** Según autor Ramalho (1996), la existencia de O<sub>2</sub> disuelto en H<sub>2</sub>O esencial para la supervivencia de la vida acuática, como peces y otros seres en hábitats acuáticos, sin embargo, surge un desafío debido a la capacidad limitada de este gas para disolverse en agua, además la cantidad de oxígeno presente en el agua está influenciada por condiciones medioambientales que su concentración tiende a aumentar con la disminución de la temperatura o el aumento de la presión.
- e) Nitrógeno total:** Barrenechea (2004), menciona que el Nitrógeno T. constituye un nutriente esencial para desarrollo de organismos acuáticos tanto animales como plantas vegetales habitualmente se presenta en agua bajo las formas de amoníaco, nitratos y nitritos, cuando cuerpos de agua reciben descargas de aguas residuales domésticas y ganaderas, el N se manifiesta en N orgánico amoniacal en presencia de O<sub>2</sub> disuelto, este compuesto evoluciona por oxidación a (nitritos y nitratos), en fases llamado fijación de N, dicho proceso está influido por variables como la temperatura (°C), contenido de O<sub>2</sub> disuelto como pH, de manera que los nitratos derivados de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) poseen alta solubilidad en H<sub>2</sub>O facilitada por la polaridad de ion.
- f) Fósforo total:** El autor Barajas (2002), menciona que el fósforo T. desempeña un papel significativo en el desarrollo de algas y organismos biológicos, debido al perjudicial crecimiento edafológico descontrolado de algas en cuerpos de agua superficial, se realizaron notables estudios para regular la cantidad de fósforo derivados de aguas residuales domésticas y

escorrentías naturales. En aguas residuales los niveles de fósforo en forma de compuestos fosforados pueden variar entre 4 y 12 mg/l.

### 3.2.7 Aguas residuales de industrias cárnicas

Son efluentes que emiten los establecimientos como mataderos y otras industrias de procesamientos, es esencial reducir previamente los contaminantes en la medida de lo posible ya que su incorporación a alcantarillados y/o fuentes de agua puede resultar en valores muy altos de (DBO<sub>5</sub>) un ejemplo es la sangre, cuyo vertido parcial puede alcanzar niveles de hasta 30,000 mg/L de DBO<sub>5</sub>, nitrógeno, así como sólidos, y otros parámetros también contienen cantidades significativas que emiten estas industrias (Miron, 1978).

Según la Escuela de Organización Industrial, (2008) menciona principales parámetros de características químicas en estas aguas de mataderos que se desarrollan en la tabla siguiente:

**Tabla 3**

*Características químicas de aguas residuales de mataderos.*

Parámetros	Fuente principal
M.O. (DQO, DBO <sub>5</sub> )	Estiércol, Sangre, aguas de escaldado, desechos intestinales.
Sólidos en suspensión	Contenidos intestinales, restos de carne, pelos.
Aceites y grasas	Aguas de escaldado, lavados.
Amonio y urea	Estiércol, carne.
Fosfatos, nitrógeno y sales	Eses, contenidos estomacales, sangre, detergentes etc.
Detergentes y desinfectantes	Detergentes, y desinfectantes.
Conductividad eléctrica	Presencia de sal.

*Nota:* Tomada de vertidos de Mataderos e Industrias Cárnicas.

### 3.2.8 Faenado de animales

El faenado de animales como, vacunos, porcinos, ovinos está asociada principalmente a la generación aguas residuales, estos contienen elementos como sangre,

excrementos, restos estomacales, grasas, huesos, etc., dichas aguas cuando son descargadas en cuerpos de agua crean entorno propicio para su proliferación de vectores/fuentes que pueden transportar y multiplicar microorganismos en sus cuerpos, lo que a su vez podría dar lugar a enfermedades en seres humanos (Signorini *et al.*, 2006).

Los contaminantes generados por matadero, está influenciada por diversos factores, incluyendo el tipo y la cantidad de animales sacrificados, dichas aguas pueden ser clasificadas de manera general por especie, como se muestra en la tabla 3 (Signorini *et al.*, 2006).

**Tabla 4**

*Características fisicoquímicas del agua residual - mataderos.*

Parámetro	Especies faenadas		
	Porcinos	Bovinos	Aves
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	1250	2000	1550
DQO (mg/l)	2500	4000	2500
Solidos suspendidos (mg/l)	700	1600	ND
Nitrógeno T. (mg/l)	150	180	150-400
Fósforo T. (mg/l)	25	27	16-50
Grasa (mg/L)	150	270	ND
pH.	7.2	7.2	ND

*Nota:* Cowi y Unep, 2000.

### 3.2.9 Principales contaminantes del Camal

En los mataderos, los procesos se concentran en la zona donde se llevan a cabo los sacrificios de animales, los desechos generados en esta área presentan un color rojizo o parduzco con una alta Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) incluye concentraciones significativas de materias suspendido, la sangre rica en N (nitrógeno), estos desechos incluyen variadas cantidades de pelos, estiércol, suciedad, desechos de detergentes entre otros, los análisis desarrollados mostraron promedios de DBO<sub>5</sub> en 2,000 mg/L y Nitrógeno T. de alrededor de 500 mg/L (Nemerov, 1998).

### **3.2.10 Normativa para aguas residuales no domésticas (VMA)**

El D.S. N° 010-2019-VIVIENDA, que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

### **3.2.11 Faenado de animales bovinos de abasto**

Procedimiento de sacrificar animales con el fin de obtener carne roja, como también lugares donde se realiza este proceso para obtener carne destinada al consumo humano, conocidos como camales/mataderos municipales.

### **3.2.12 Procesos para faenado de animales de abasto**

#### **3.2.12.1 Recepción y descanso**

Una vez trasladado los animales al matadero/camal, se trasladan a corrales con al menos 12 h. de anticipación antes de su beneficio (Signorini *et al.*, 2006).

#### **3.2.12.2 Inspección *ate-mortem* Recepción y descanso**

La inspección sanitaria antes del sacrificio garantiza que solo se acepten animales que estén clínicamente sanos en la producción de carne para consumir (Signorini *et al.*, 2006).

#### **3.2.12.3 Bañado**

El baño de los animales antes del sacrificio es crucial desde una perspectiva sanitaria ya que principalmente elimina o reduce la suciedad presente en su piel (residuos de excremento, orina, alimentos, secreciones, ectoparásitos, etc.) esto previene una contaminación/alteración excesiva de establecimientos, así como de canales o la sangre destinada al consumo humano e industrial durante el proceso de sacrificio (Signorini *et al.*, 2006).

#### **3.2.12.4 Aturdimiento**

El autor Signorini *et al.* (2006), describe que es el área donde se lleva a cabo la insensibilización de los animales para facilitar un proceso de sacrificio adecuado.

### **3.2.12.5 Sacrificio**

Según el autor Signorini et al. (2006), menciona que después de aturdimiento se realiza el beneficio por corte contundente.

### **3.2.12.6 Desollado**

Según el autor Signorini et al. (2006) menciona que, en este punto las patas se separan y se realiza el desollado, que consiste en quitar la piel o cuero de la parte externa.

### **3.2.12.7 Remoción de cabeza de ganado**

Según el autor Signorini et al. (2006), indica que las cabezas de los ganados son retiradas, mientras que, en porcinos la parte (cabeza) no debe ser removida hasta que se haya inspeccionado en busca de cisticercos.

### **3.2.12.8 Eviscerado**

Según el autor Signorini et al. (2006), indica que la etapa de evisceración implica la limpieza de las vísceras y se lleva a cabo justo después del proceso de desollado.

### **3.2.12.9 Escaldado, depilado y chamuscado (cerdos)**

Según el autor Signorini et al. (2006), indica que la finalidad de sumergir los animales en tanques de escaldado con agua y temperatura de alrededor de 60°C durante alrededor de 5 minutos es ablandar la piel para facilitar su posterior depilación, en los mataderos municipales, el agua utilizada en este procedimiento se mantiene en constante ebullición.

### **3.2.12.10 Inspección post-mortem**

Según el autor Signorini et al. (2006), indica que la inspección de las carnes es exhaustiva y engloba todos los aspectos relacionados con la higiene y la salud de productos cárnicos y derivados, desde su producción hasta su distribución en el mercado.

### **3.2.13 Método de EC (Electrocoagulación)**

La historia de la electrocoagulación se remonta siglos atrás, en los siglos XVI y XVII hasta hoy, donde se usaban dispositivos similares, a las baterías para procesos como la electrodeposición de metales, aunque no se entendía completamente el fenómeno. El

término electroquímica fue creado a finales del siglo XVIII, gracias a los trabajos de Galvani y Volta, primer ensayo registrado utilizando ánodos de hierro soluble se realizó en Londres en 1888. En 1896, en Kentucky, se aplicó método similar para clarificar agua turbia del río Ohio. En 1906, Dietrich desarrolló la primera patente de electrocoagulación en EE.UU., y en 1914 en Nueva York, se empleó un modelo modificado llamado Landreth que incluía cal para mejorar la conductividad del electrolito. Alemania implementó la electrocoagulación en 1932 con una eficiencia del 50% en la eliminación de  $\text{DBO}_5$ . En 1947, la Unión Soviética (URSS) inauguró una planta que eliminaba cerca del 80% de  $\text{DBO}_5$ , posteriormente, en la Universidad de Nápoles se aplicó esta técnica en aguas residuales costeras, en Noruega se intentó una idea similar con electrodos de carbón, pero se enfrentaron problemas de corrosión. En las últimas dos décadas, se ha investigado la electrocoagulación para remover partículas de aceite, grasa, petróleo y componentes contaminantes en aguas residuales. Por ende, la EC es un método electroquímico ampliamente empleado en el tratamiento de aguas residuales, este proceso provoca la desestabilización de contaminantes suspendidos, emulsionados o disueltos en un medio acuoso, que consiste en inducir corriente eléctrica en el agua mediante placas metálicas paralelas, generalmente de hierro o aluminio lo que genera reacciones que contribuyen a la eliminación de contaminantes (Arango, 2005).

El reactor está constituido por un recipiente, la cual se sumergen dos electrodos/barras: Ánodo, que es el electrodo/barra de sacrificio y cátodo, que es un electrodo/barra inerte, estos electrodos están conectados a fuente de alimentación eléctrica (Martinez, 2007)

### **3.2.13.1 La electroquímica**

Es la interacción entre sistemas-químicos y todos los sistemas-eléctricos debido que ambos fenómenos afectan el proceso. Las transformaciones electroquímicas se convierten en reacciones redox la energía liberada por un factor reacción convierte de forma completamente espontánea en energía eléctrica (DC-AC) o viceversa. La energía

eléctrica directa (DC) liberada se utiliza para recolectar electricidad altamente utilizable que se convierte en electricidad no espontánea (Cueva y Pereda, 2020).

Según el autor Cueva y Pereda (2020), menciona que las reacciones electroquímicas son aquellas que tienen las siguientes propiedades:

- ❖ Todas las reacciones tienen lugar en la superficie del electrodo utilizado.
- ❖ Las reacciones serán heterogéneas.
- ❖ Este procedimiento implica un cambio químico provocado por la transferencia/adición de electrones a través de los electrodos usados.
- ❖ Los electrones intercambiados provienen de la solución.
- ❖ Una celda de energía es una celda que crea las condiciones adecuadas para que se produzca la reacción.

#### **3.2.14 Celdas de EC (electrocoagulación)**

La celda utilizada para realizar EC (electrocoagulación), en una operación por batch, en su forma más simple, esta comprende un ánodo (+) y un cátodo (-) que está vinculado a fuente de energía directa (DC) externa, al aplicar una corriente al material el ánodo se oxida, mientras que el material del cátodo se reduce y/o permanece pasivo (Gilpavas *et al.*, (2008).

#### **3.2.15 Fases de la EC (electrocoagulación)**

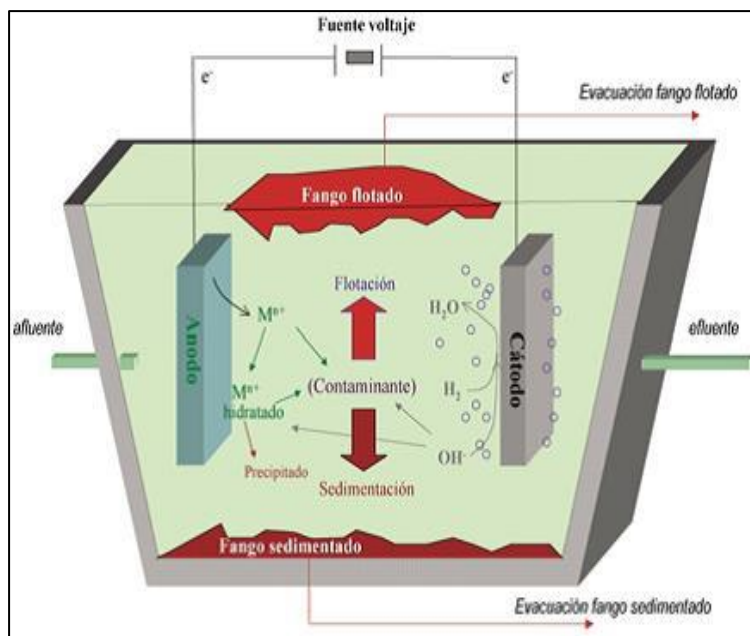
Según el autor Martínez (2007), menciona las siguientes fases:

- **Coagulación:** Se refiere al proceso de generar materia suspendida de gran dimensión a partir de micro-partículas previamente desestabilizadas.
- **Floculación:** Implica la absorción de pequeños flóculos en una solución, los cuales son formados en la fase de coagulación, en esta etapa se genera partículas y/o compuesto de mayor tamaño.
- **Flotación y/o sedimentación:** Gases liberados en el cátodo (-) y ánodo (+) oxígeno e hidrógeno, respectivamente inducen la agrupación y desplazamiento hacia la superficie de flóculos de bajo peso,

simultáneamente facilita la deposición de flóculos de mayor peso y tamaño/dimensión.

**Figura 1**

*Sistema de EC con ánodo y cátodo.*



*Nota:* Recuperado de Restrepo *et al.* (2006)

### **3.2.15.1 Mecanismo del proceso de EC (electrocoagulación)**

En proceso de EC (electrocoagulación), se desarrollan una serie de fenómenos tanto fisicoquímicos esto posibilita la eliminación de contaminantes, dicho proceso puede explicarse de manera siguiente: Los electrodos generan reacciones que resultan en la liberación de iones positivos como negativos, en el ánodo (+) se producen iones metálicos a este electrodo se llama electrodo de sacrificio debido a la placa metálica que lo compone se disuelve, por otra parte la placa del cátodo (-) permanece intacta (Restrepo *et al.*, 2006).

Los iones generados tienen el efecto de debilitar cargas eléctricas que están presentes en partículas contaminantes del H<sub>2</sub>O una vez que las cargas se equilibran, las fuerzas que mantienen a las partículas en suspensión se debilitan, lo que permite que las partículas contaminantes se agrupen y comiencen el proceso de EC (electrocoagulación), (Restrepo *et al.*, 2006).

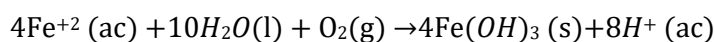
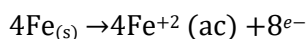
Los iones generados por los electrodos inician un proceso de remoción de dichos contaminantes que podrían ocurrir a través de dos enfoques: el primero involucra reacciones químicas y precipitación mientras que el segundo implica procesos físicos de agrupación de coloides, cuya capacidad para flotar o precipitar depende de su densidad (Restrepo *et al.*, 2006).

Las partículas de contaminantes pueden experimentar reacciones como hidrólisis, electrólisis, ionización y la creación de radicales libres, estos procesos alteran las características del sistema agua-contaminante, resultando en reducir la carga contaminante del H<sub>2</sub>O. (Mollah *et al.*, 2001).

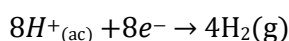
Cuando el hierro funciona como ánodo, se han presentado dos posibles procesos que explican la formación de coagulantes in situ: hidróxido ferroso Fe(OH)<sub>2</sub> o hidróxido férrico Fe(OH)<sub>3</sub> (Mollah *et al.*, 2001).

#### Mecanismo 1: Formación de hidróxido férrico

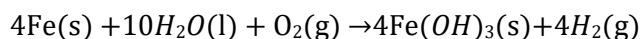
- En el ánodo (+) ocurren las siguientes reacciones:



- En el cátodo (-):

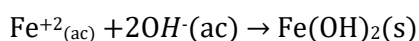
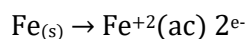


- Reacción global:

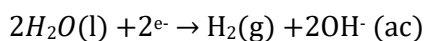


#### Mecanismo 2: Formación de hidróxido ferroso

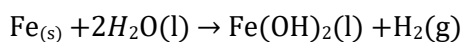
- En el ánodo (+) ocurren las siguientes reacciones:



- En el cátodo (-):

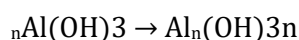
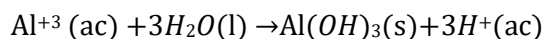
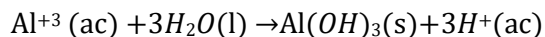
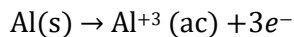


- Reacción global:



Cuando el Al actúa como ánodo (+) las reacciones son las siguientes:

- En el ánodo (+) ocurren las siguientes reacciones:



- En el cátodo (-):



Los iones  $\text{Al}^{+3}$  en combinación con  $\text{OH}^-$  reaccionan para formar algunas especies de monoméricas tales:  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^{+}$ , y  $\text{Al}(\text{OH})_2^{+}$ , así como:  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ,  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ ,  $\text{Al}_{13}\text{O}_{20}(\text{OH})_{24}^{7+}$  y  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$  a través de procesos de precipitación se forma  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , como ilustra en la reacción anódica, el  $\text{Al}(\text{OH})_3$  es una sustancia amorfa con una naturaleza gelatinosa que presenta una extensa área superficial con cualidades de absorción y atracción de partículas de contaminantes (Mollah *et al.*, 2001).

### 3.2.16 Factores que afectan al proceso de EC (electrocoagulación)

El autor Restrepo *et al.* (2006), menciona que existe una variedad de factores que participan en proceso de EC como algunos de estos factores poseen una influencia más significativa en el proceso de EC.

#### 3.2.16.1 pH

El pH tiene un impacto en la eficacia con la que la corriente directa (DC) participa en proceso de solubilidad del metal para producir hidróxido, numerosos estudios han encontrado que el nivel pH varía durante la EC, dependiendo esta variación de los materiales de electrodos y pH inicial de efluente tratada, debido a la producción de hidrógeno molecular de cátodo, las aguas residuales ácidas pueden experimentar aumentos de pH durante el proceso (Restrepo *et al.*, 2006).

### **3.2.16.2 Densidad de corriente, voltios (V)**

El aumento de densidad de corriente directa (DC), la eficiencia de remoción y la intensidad energética aumentan, en ciertas conductividades en medio acuoso, el consumo energético aumenta proporcionalmente al aumentar la conductividad esto conduce a un mayor consumo de energía, las pérdidas intensivas de energía surgen de la conversión de electricidad en calor, lo que conduce a un aumento de temperatura en un medio acuoso (Restrepo *et al.*, 2006).

Suministro del sistema de EC (electrocoagulación) determina la cantidad de iones de aluminio  $Al_{+3}$  o hierro  $Fe_{+2}$  liberados de cada electrodo (Restrepo *et al.*, 2006).

Un aumento en la corriente directa (DC) da como resultado incrementar la remoción de contaminantes y la elección de densidad de corriente DC puede llevarse a cabo teniendo en cuenta diversos parámetros de funcionamiento como; el valor de pH, T °C (Restrepo *et al.*, 2006).

Según el autor Chen (2004), recomienda utilizar la densidad de corriente menores a 20-25 A/m<sup>2</sup> para que el proceso de EC (electrocoagulación) funcione correctamente; alta densidad de corriente DC, incrementa el tamaño de formación de burbujas en electrodos lo que conduce a un cambio de proceso de eliminación de sólidos por flotación.

### **3.2.16.3 Conductividad**

El aumento de conductividad eléctrica a su vez conduce a incrementar en la densidad de corriente, si el voltaje (V) aplicado a celdas de EC (electrocoagulación) se mantiene constante e incremento de conductancia, manteniendo la densidad de corriente - DC constante el voltaje empleado disminuirá (Restrepo *et al.*, 2006).

### **3.2.16.4 Tiempo de residencia y operación**

El tiempo de permanencia determina que, cuanto más sea el valor del tiempo se incrementa la formación de sólidos, por tanto, favorece los procesos de precipitación de sólidos también forman otros gases que al ascender llevan las partículas de óxido a la superficie en forma espuma lo que favorece el crecimiento de las escamas y posterior

precipitación, un mínimo cambio de tiempo tiene un gran impacto en la cantidad de sólidos recuperados (Prieto *et al.*, 2012).

### **3.2.16.5 Material del electrodo**

Cuando se trata de EC (electrocoagulación) de ánodos de sacrificio y selección de material del electrodo/varilla depende del tipo y afinidad del contaminante a remover o eliminarse con coagulante desarrollado, si van a removerse los sólidos en suspensión se debe preferir que el coagulante se proporcionará desestabilización de coloides para su aglutinación, luego se separen por precipitación. Con componentes disueltos se busca que el coagulante absorba o retenga por un mecanismo fisicoquímico al igual que con los electrodos/varillas inertes, como acero inoxidable; titanio, platino, níquel, grafito, etc., el mecanismo de remoción es que dicha remoción electroquímica en H<sub>2</sub>O ocurre en el ánodo (+) elevando pH y promoviendo formaciones de sal base poco solubles y precipitantes e hidróxido de metales polivalentes, cabe destacar la limpieza periódica de la superficie de placas de los electrodos utilizados en la electrocoagulación ya que la formación de capas de óxido puede pasivar los electrodos, lo que reduce la eficacia del procedimiento (Arboleda y Herrera, 2015).

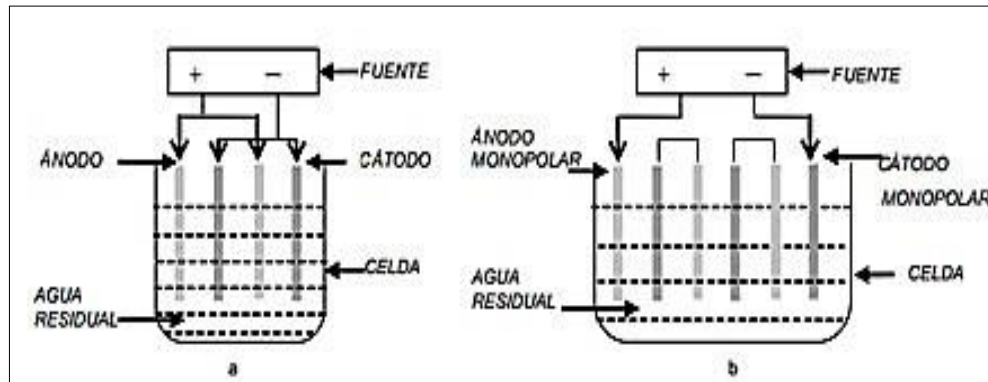
### **3.2.17 Reactor utilizado para el proceso de la EC**

#### **A. Reactor tipo Batch:**

Sistema cilíndrico compuesto por electrodos de fierro y aluminio conectado a fuente de energía directa para su proceso de EC (electrocoagulación) por lo que se debe considerar, volumen total del efluente durante el proceso tratado, la principal ventaja es el bajo costo del tratamiento localizada del agua. Por otro lado, se observa el uso de electrodos y/o placas de mismo material para ánodo (+) como cátodo (-) no disuelve eficazmente los iones metálicos, por este motivo es necesario aumentar la superficie de electrodos/placas para aumentar disolución, las disposiciones de electrodos/placas en serie es monopolar y/o bipolar en paralelo como se visualiza en la figura 2 (Cueva y Pereda, 2020).

**Figura 2**

*Reactor para electrocoagulación de tipo Batch.*



*Nota: Reactores para EC tipo Batch recuperado de Cueva y Pereda, 2020.*

### 3.2.18 Ventajas de EC - electrocoagulación

Según referencia del autor Cueva y Pereda (2020), se menciona que el método EC para tratamiento de aguas residuales trae muchas ventajas que detallan a continuación:

- ✓ Reduce el contenido de sustancias orgánicas en las aguas residuales.
- ✓ Puede producir agua potable incolora e inodora.
- ✓ Produce menos sólidos disueltos que el tratamiento químico, reduciendo el costo de tratamiento de este efluente.
- ✓ El uso de este proceso reduce significativamente los costos operativos en comparación con los procesos poliméricos tradicionales.
- ✓ Gran efectividad en la remoción de contaminantes.
- ✓ Remueve pequeñas partículas coloidales ya que se mueven más rápido a través del campo eléctrico aplicado, facilitando así la coagulación.
- ✓ Forma flóculos más grandes que permiten una sedimentación más rápida que la coagulación química.
- ✓ El gas tipo burbuja resultante podrían transportarse compuestos a superficie de la solución donde se pueden concentrar, recolectar y eliminar.
- ✓ Este proceso produce pequeñas cantidades de lodos con un contenido de sólidos significativamente mayor.
- ✓ Requiere equipo simple y fácil de usar

### 3.2.19 Desventajas de EC - electrocoagulación

Según referencia del autor Cueva y Pereda (2020), se menciona las desventajas del método EC:

- ❖ Una gran desventaja de este método es que las placas que sirven como electrodos deben reemplazarse constantemente, lo que varía según el espesor.
- ❖ En lugares con mucha energía lumínica, todo el sistema de tratamiento puede ser costoso.
- ❖ Se puede formar óxidos en electrodo/placas de ánodo (+), impidiendo el flujo de energía a través del sistema y reduciendo el rendimiento.

### 3.2.20 Aplicaciones del método de EC - electrocoagulación

La electrocoagulación se ha utilizado para remover diversidad de aguas residuales o efluentes, en muchos casos esta técnica está asociada a la flotación, también asistida por electrólisis (electroflotación) cuyo objetivo es incrementar la eliminación de contaminantes, esto ocurre proceso en misma celda o en celdas secuenciales (Holt *et al.*, 2005).

La producción de Cr de curtiembres y las industrias de fertilizantes usan elementos peligroso como; cromo (+6) en sus procesos, a escala mundial la extracción de cromo está muy regulada y se emplean métodos convencionales como la adsorción, la sedimentación química y descomposición biológica, la EC combinada con electroflotación ha probado como un método alternativo en remover cromo en los efluentes, este proceso permitió obtener agua tratada en concentraciones de cromo (Cr) por debajo de 0,5 ppm (Restrepo *et al.*, 2006).

La industria mecánica-automotriz genera aceites desechables en niveles de componentes aceitosos y grasos que exhiben fuerte estabilidad química en sus emulsiones de Oil y H<sub>2</sub>O, este es un problema ambiental significativo para desestabilizar estas

emulsiones y luego eliminar los aceites, grasas la aplicación de electrocoagulación ha demostrado una alta eficacia (Chen, 2000).

La electrocoagulación también se utiliza en tratamientos de aguas residuales en industrias alimentarias que se diferencian por un alto contenido en DBO<sub>5</sub> y DQO y un alto contenido en grasas, un estudio realizado sobre estos efluentes de Hong-Kong sujetas a electrocoagulación y electroflotación, mostró una remoción/disminución de grasa y DQO a 99 y 88%, consecutivamente (Restrepo *et al.*, 2006).

### 3.2.21 Ley de Michael Faraday

Según el autor Cueva y Pereda (2020), menciona que el físico Faraday, quien determinó con exactitud la cantidad de electricidad que circula a través de una solución electrolítica y la entrada de materia (peso) que se modelará mediante la reacción química de electrodos/placas es esencial. Las leyes de Faraday son los que rigen la cantidad de masa que adhiere a todos los placas - electrodos, incluyendo aquellos que se desprenden como producto de proceso electrolítico.

Nos dice:

La cantidad de carga eléctrica transportada por  $6,02 * 10^{23}$  -e se llama Faraday y equivale a 96500 Coulumb (C).

Donde dice:

$$1.602 * 10^{-19} \frac{\text{Columbios}}{\text{electrón}} * 6.02 * 10^{23} \frac{\text{electrón}}{\text{mol}} = 96500 \frac{\text{columbios}}{\text{mol}}$$

Donde:

1 mol de -e = 1F = 96500 Coulumb (C).

- ❖ Además, velocidad flujo de electricidad expresada en (A) amperios.
- ❖ Un (A) amperio representa, flujo de un Coulumb (C) en un segundo.

$$\text{Columbio} = \text{Amperio} * \text{segundo}$$

$$Q = i * t$$

Donde:

Q: N° de Coulumb (C)

I: Corriente (A)

t: Tiempo (s).

Faraday presenta 03 leyes que se describen a continuación:

### **Tercera ley de Faraday**

Cantidad de sustancia disuelta y/o depositada en electrodo/placas debido a la transferencia de carga eléctrica (Q) está vinculada a su equivalente químico. Las masas guardan una relación directamente proporcional con su equivalencia, tal como indica la ecuación.

Ecuación 1 *Tercera ley de Faraday*

$$\frac{m_1}{E_{q1}} = \frac{m_2}{E_{q2}}$$

Dónde:

m<sub>1</sub>: Masa de elemento depositado en electrodo 1.

m<sub>2</sub>: Masa de elemento depositado en electrodo 2.

E<sub>q1</sub>: Equivalente químico de sustancia depositado en electrodo 1.

E<sub>q2</sub>: Equivalente químico de sustancia depositado en electrodo 2.

### **3.2.22 Lodos residuales**

Son sólidos de las aguas residuales sedimentadas o decantadas donde se concentran en un sedimento acuoso o pastoso, en la actualidad existe una creciente urgencia por reducir los residuos y garantizar su adecuada y segura eliminación, estos aspectos revisten gran importancia tanto a nivel nacional como global esta preocupación ha impulsado la búsqueda de nuevas tecnologías e incluso cambios en políticas para promover la generación de residuos más amigables con el medio ambiente, además se está trabajando en la formulación de normas que regulen la correcta disposición de los residuos y promuevan la reutilización (Cueva y Pereda, 2020).

Tanto en nuestro país como a nivel global, todavía no se ha establecido una educación sólida sobre la correcta gestión de lodos residuales municipales, aunque existen algunas PTAR (Plantas de Tratamiento de-Aguas Residuales) que cuentan con sistemas

de tratamiento/procesos de lodos su porcentaje es limitado. En nuestra nación la adopción de métodos para tratar lodos residuales tanto municipales como industriales es limitada y la cantidad de PTAR disponibles es insuficiente, sin embargo, existen técnicas responsables y seguras para el tratamiento de estos lodos. (Cueva y Pereda, 2020).

### **3.2.22.1 Tratamiento de lodos residuales**

**a)** Espesado: Según el autor Cueva y Pereda (2020), menciona que, en la fase de espesamiento, se busca disminuir el tamaño de los lodos al eliminar el exceso de H<sub>2</sub>O y aumentar la concentración/composición de sólidos, algunos de métodos utilizados para el espesamiento son:

- Espesamiento por (método de gravedad).
- Espesamiento por (método mecánico).
- Espesamiento por (método de flotación).
- Método de Centrifugación.
- Método de (tambor rotativo/ estabilización).

Estos procedimientos mencionados posibilitan la reducción de la carga orgánica, la eliminación de olores desagradables y la disminución del proceso de descomposición y los procesos de estabilización son:

**a)** Digestión anaerobia: Se da una reducción en la materia orgánica debido a la falta de oxígeno, lo que conduce a la generación de metano (CH<sub>4</sub>) que puede ser aprovechado como energía, así como de liberar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Además, el agua también se ve afectada por la actividad de ciertos tipos de bacteria.

**b)** Deshidratación/evaporación: Utilizada con la finalidad exclusiva en reducir el excedente de humedad en el lodo y simultáneamente disminuir su volumen, esta etapa también contribuye a reducir los costos de transporte y prevenir olores desagradables de la descomposición.

### 3.2.22.2 Posibles destinos de lodos tratados

Según el autor Cueva y Pereda (2020), menciona que considerando de manera óptima y como benéficos medioambiental para la población, son posibles opciones para el tratamiento (lodos) incluyen su uso en campo agricultura como abono/fertilizantes, el compostaje sin proceso de digestión, así como su aplicación en el relleno de caminos, entre otras alternativas.

### 3.3. Definición de términos

- ✓ **Aguas residuales:** Restos/residuos líquidos originados/procedentes principalmente de diversas industrias como lo más común provenientes de fábricas/industrias dedicadas a la elaboración de un producto procesado.
- ✓ **Efluente:** Flujo líquido originado de una planta de tratamientos de dichas aguas o también de procesos unitarios etc.
- ✓ **Aguas residuales de industrias cárnicas:** Son efluentes que emiten las industrias como mataderos y plantas de procesamiento de embutidos, fiambres y conservas.
- ✓ **Faenado de animales de abasto:** Procedimiento de sacrificar animales con fin de obtener/extraer carne como alimento para consumo humano.
- ✓ **Lodos residuales:** Sólidos de las aguas residuales sedimentadas o decantadas donde se concentran en un sedimento acuoso o pastoso.
- ✓ **Demanda química de oxígeno (DQO):** Medida del oxígeno requerido para oxidar (M.O.) materia orgánica presente en una determinada muestra de H<sub>2</sub>O.
- ✓ **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>):** Cantidad de oxígeno necesaria que lleva a cabo la degradación bioquímica de la materia orgánica (M.O.) contenida y presente en aguas residuales.
- ✓ **Sólidos suspendidos totales:** Partículas sólidas compuestas por materia orgánica en suspensión.

- ✓ **Conductividad:** Capacidad para transportar electricidad y refleja las presencias totales de sustancias iónicas en agua en su conjunto.
- ✓ **Electrocoagulación:** Método electroquímico ampliamente empleado en diferentes tratamientos de aguas residuales entre otros tipos de aguas.
- ✓ **Celdas de electrocoagulación:** Celda de EC está compuesto por un ánodo (+) y un cátodo (-), que están vinculados a fuente de energía externa como DC-AC.

## IV. METODOLOGÍA

### 4.1. Tipo y nivel de investigación

El presente trabajo de investigación es de tipo aplicada de nivel y/o alcance explicativo.

#### 4.1.1. Diseño de investigación

El diseño de esta investigación fue experimental, donde se manipularon dimensiones de variables independientes en diferentes grados de (V) voltaje y tiempo de retención (min), cuyo diseño requirió un grupo de control que no recibe estímulo ninguno o tratamiento.

G <sub>0</sub>	-	-
T R	X	O

Donde:

G<sub>0</sub>: Muestra en blanco

T: Grupos de tratamientos.

R: Repeticiones.

X: Tratamiento experimental con el método (EC).

O: Medición después de la aplicación del método (EC).

### 4.2. Ámbito temporal y espacial

#### 4.2.1. Temporal

El periodo de investigación que se desarrolló es de 7 meses de setiembre del año 2023 a marzo del 2024.

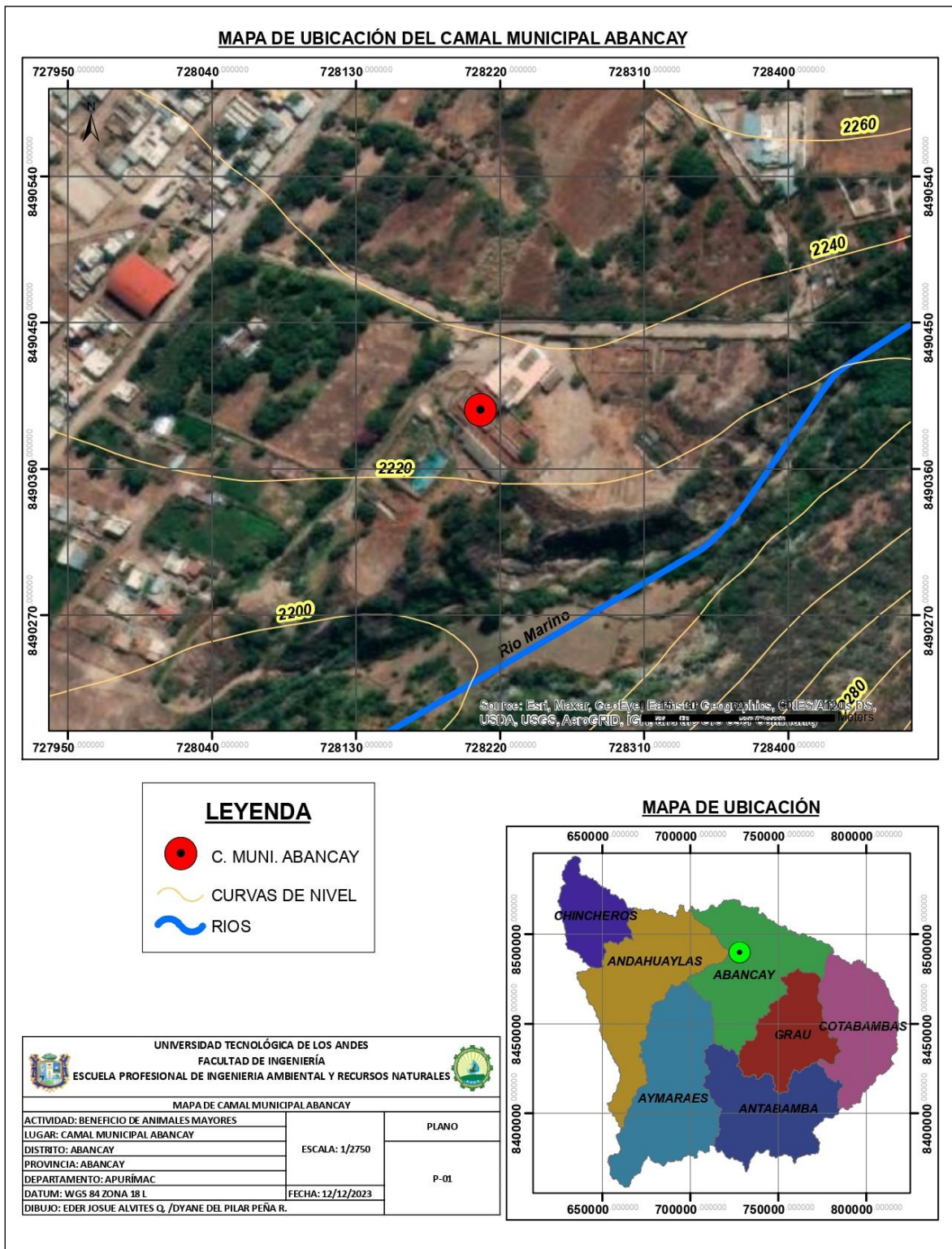
#### 4.2.2. Espacial

Esta investigación se desarrolló en Laboratorio Físicoquímico de la Universidad Tecnológica de los Andes – sede Abancay. Ubicación Geográfica: Altitud de 2,413 m.s.n.m., zona 18L con Coordenadas: Este (728,567.58 m) y Norte (849,1930.77 m) y la toma de muestras del efluente del C.M.A. Ubicación Geográfica: Altitud de 2,224 m.s.n.m.,



**Figura 4**

*Mapa de ubicación, de Toma de muestras del efluente del Camal Municipal Abancay*



*Nota.* Se visualiza la ubicación, de toma de muestras del efluente del Camal Municipal Abancay para su tratamiento con el método (EC).

### 4.3. Población y muestra

- ✓ **Población:** Fue determinado por el Q (caudal) del efluente que emite el establecimiento del C.M.A. que fue de 5.23 m<sup>3</sup>/h (1.45 l/s) promedio en el momento de toma de muestras, teniendo en cuenta la cantidad de vacunos, porcinos, ovinos y caprinos sacrificados por día y el día de mayor actividad por lo tanto mayor generación de aguas residuales, ubicado en la Urb. Patibamba Baja S/N - Abancay- Apurímac.
- ✓ **Muestra:** La muestra en esta investigación estuvo compuesta por un total de 32 litros, se calculó teniendo en cuenta la jornada laboral del C.M.A., que trabaja 4 horas al día, se tomaron cuatro muestras simples a intervalos de 01 h., y se obtuvo el volumen de, muestra simple que fue recolectado (VMSi), donde se empleó las siguientes informaciones: Volumen de muestra total requerido fue de 32 L, que resultó el uso de 2.5 L del efluente para cada tratamiento más 2 L adicional para caracterizar de forma fisicoquímico inicialmente. El caudal promedio fue de 5.2 m<sup>3</sup>/h (1.45 l/s), para determinar el tamaño de muestra compuesta se utilizó fórmula en base a Norma Oficial Mexicana (1996), para determinar el volumen de muestra simple es la siguiente:

Ecuación 2. *Determinación de volumen de muestra simple.*

$$VMSi = VMC * \left( \frac{Qi}{Qt} \right)$$

Donde:

VMSi = Volumen de cada una de las muestras simples "i", (L).

VMC = Volumen de muestra compuesta (necesario para realizar la totalidad de los análisis).

Qi = Caudal medido en la descarga en el momento de la toma de la muestra simple, L/s.

QT = Suma de Qi hasta Qn, L/s.

**Tabla 5**

*Intervalos de tiempo y n° para toma de muestras.*

Operación del C.M.A. (h)	N° de muestras simples		Intervalo de toma de muestras (h)	
		Mín.		Máx.
Menor que 04	02	-		-
De 04 a 08	04	01		02
Mayor que 08 y hasta 12	04	02		03
Mayor que 12 y hasta 18	06	02		03
Mayor que 18 y hasta 24	06	03		04

*Nota:* Se describe que la operación del C.M.A. fue de 04 a 08 (h) cada día, se obtuvo 04 muestras simples, en intervalos de 01 h. cada muestra.

Para poder determinar del volumen de muestra simple del efluente de C. M. A. fue en base a la siguiente fórmula:

$$VMSi = 32 \text{ L} \times (1.45 \text{ L} / 1.45 + 1.45 + 1.45 + 1.45)$$

$$VMSi = 8 \text{ L}$$

Por lo tanto, se tomó una sola muestra de 8 L por cada 01 hora, hasta obtener un total de 04 muestras simples y formar una muestra compuesta de 32 L.

- ✓ **Muestreo:** Fue de tipo de muestreo no probabilístico seleccionándose el número de muestras en función de los criterios y necesidades del investigador. Según los autores Hernández, Fernández y Baptista (2014), se denominan estas muestras porque se basan en las características propias del estudio, por lo que el objetivo no busca representatividad de la población sino a tener en cuenta y control de dimensiones específicas del tema de investigación que posibilitan su recopilación y análisis de datos. Por ende, el muestreo se realizó en una sola fecha, teniendo en cuenta el día mayor producción de la semana, por tanto, el día mayor producción del efluente del C.M.A.

#### 4.4. Instrumentos

- ✓ **Ficha de identificación del punto de muestreo:** Sirvió para recopilar información del punto y/o sitio de muestreo y poder obtener datos sobre coordenadas (UTM-altitud-ubicación), evidenciándose con fotografías del momento de recolección de muestras y breve explicación de las características esenciales del punto y/o sitio de recolección (ANEXO N° 02).
- ✓ **Informe de análisis fisicoquímico pre y post tratamiento – Laboratorio LIMTA:** El informe de análisis fisicoquímico de laboratorio fue un instrumento para confirmar los valores de concentración de muestra de caracterización inicial del agua residual, así como post tratamiento analizada dentro de 06 parámetros (ANEXO N° 03).
- ✓ **Cadena de custodia – pre y post tratamiento:** Cadena de custodia fue también instrumento para el control, seguimiento de muestreo pre y post tratamiento, incluyendo métodos y/o técnicas de muestreo, codificación, transporte y determinación de parámetros para el análisis fisicoquímico (ANEXO N° 04).
- ✓ **Ficha técnica de equipo:** Este instrumento permitió organizar información clave sobre el prototipo construido, incluidos características como; tipo de material, las dimensiones, cantidad del efluente a tratar, equipo representativo, descripción física de la celda y las instrucciones detalladas de uso (ANEXO N° 05).

**Tabla 6***Instrumentos de recolección de datos*

Etapa	Fuente	Técnica	Instrumento	Resultado
Identificación de punto de muestreo.	Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales - 2016	Observación directa	Instrumento N° 01: Ficha de identificación del punto de muestreo.	Identificación y caracterización - punto de muestreo.
Análisis de muestra inicial en blanco de agua residual (G <sub>0</sub> ) y post tratamiento.	Laboratorio	Análisis fisicoquímico	Instrumento N° 02: Informe de análisis fisicoquímico pre y post tratamiento – Laboratorio LIMTA	Concentración de DQO, DBO5, SST, pH, Fosforo total, Nitrógeno total, control y vigilancia del estado de la muestra
Cadena de custodia	Formato - Laboratorio	Observación directa	Instrumento N° 03: Cadena de Custodia pre y post tratamiento.	De DQO, DBO5 y SST, pH, Fosforo total, Nitrógeno total, Control y vigilancia del estado de la muestra
Construcción del prototipo	Modelo de ficha técnica	Observación directa	Instrumento N° 04: Ficha técnica de equipo.	Descripción del prototipo

*Nota:* Se describe los instrumentos empleados en la recolección de datos para realizar el experimento.

## **4.5. Procedimientos**

### **4.5.2. Procedimiento para recolección de muestra**

#### **4.5.2.1. Ubicación – C.M.A (Camal Municipal Abancay)**

El Camal Municipal Abancay se encuentra ubicada en Urb. Patibamba Baja S/N (9435+HW4), Abancay – Apurímac – Perú, este establecimiento se dedica a actividades de beneficio de animales bovinos, ovinos, porcinos (ANEXO N° 10).

#### **4.5.2.2. Toma de muestra - Camal Municipal Abancay**

- ✓ Para realizar a cabo la toma de muestras se tuvo en cuenta lo siguiente: El Protocolo de Toma de Muestras de Agua Residual (2016), establecidas por ITOXDEF (Instituto de Toxicología de la Defensa) - España.
- ✓ Este protocolo define criterios técnicos, procedimientos y poder recopilar muestras del agua residual antes (afluente) y después (efluente) de un tratamiento específico, esto permitió realizar comparaciones entre los resultados obtenidos y por tanto evaluar la efectividad del tratamiento.
- ✓ Durante el proceso de toma de muestra se complementaron los registros correspondientes; Ficha de identificación del punto de muestreo, como también se estableció cadena de custodia, se referencia en el (ANEXO N° 04) y se etiquetó cada una de las muestras.
- ✓ Posteriormente las muestras correspondientes fueron transportada al laboratorio para someterse al tratamiento con el método de electrocoagulación y luego ser llevado al laboratorio para su análisis fisicoquímico de los 06 parámetros establecidos. Es importante destacar la conservación adecuada a cada muestra a ser evaluados según los parámetros establecidos, donde se muestra las condiciones que se pudo realizar en traslado de muestras para su caracterización fisicoquímica inicial, así como el post tratamiento.

**Tabla 7**

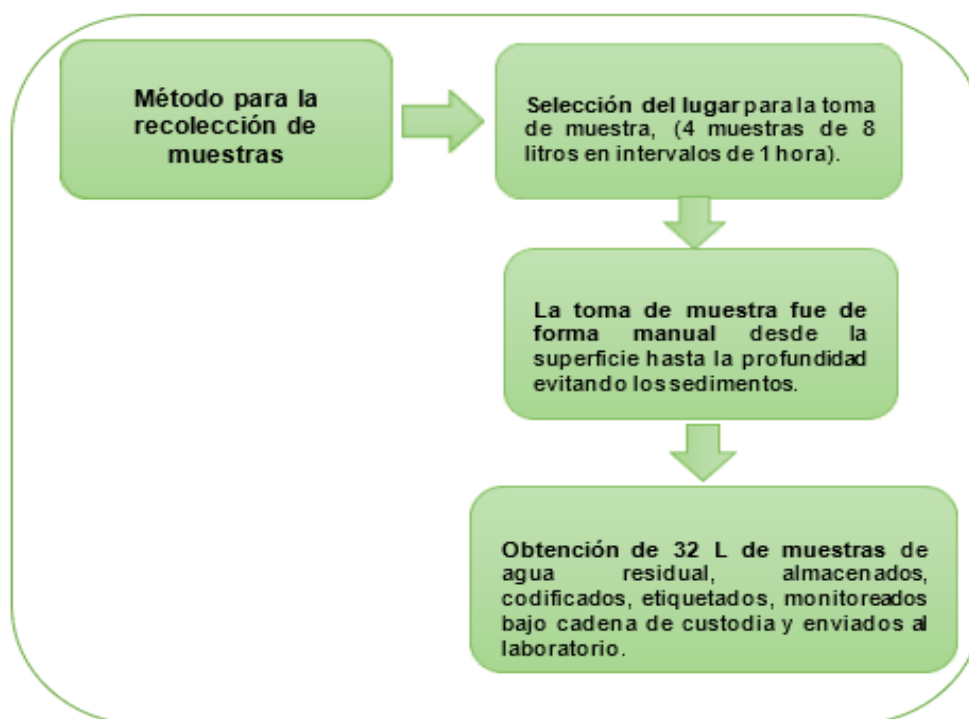
*Condiciones de conservación de parámetros.*

Parámetros	Conservación
SST	Refrigerado a 4°C
DQO	Refrigerado a 4°C
DBO5	Refrigerado a 4°C
pH	Refrigerado a 4°C
Fosforo total	Refrigerado a 4°C
Nitrógeno total	Refrigerado a 4°C

*Nota:* Detalla condiciones de conservación que se aplicó para su traslado/transporte de muestras hasta el laboratorio.

**Figura 5**

*Flujograma del procedimiento para la recolección de muestras.*



*Nota:* Elaboración propia

#### 4.5.3. Procedimiento de construcción y montaje del prototipo de EC a escala laboratorio.

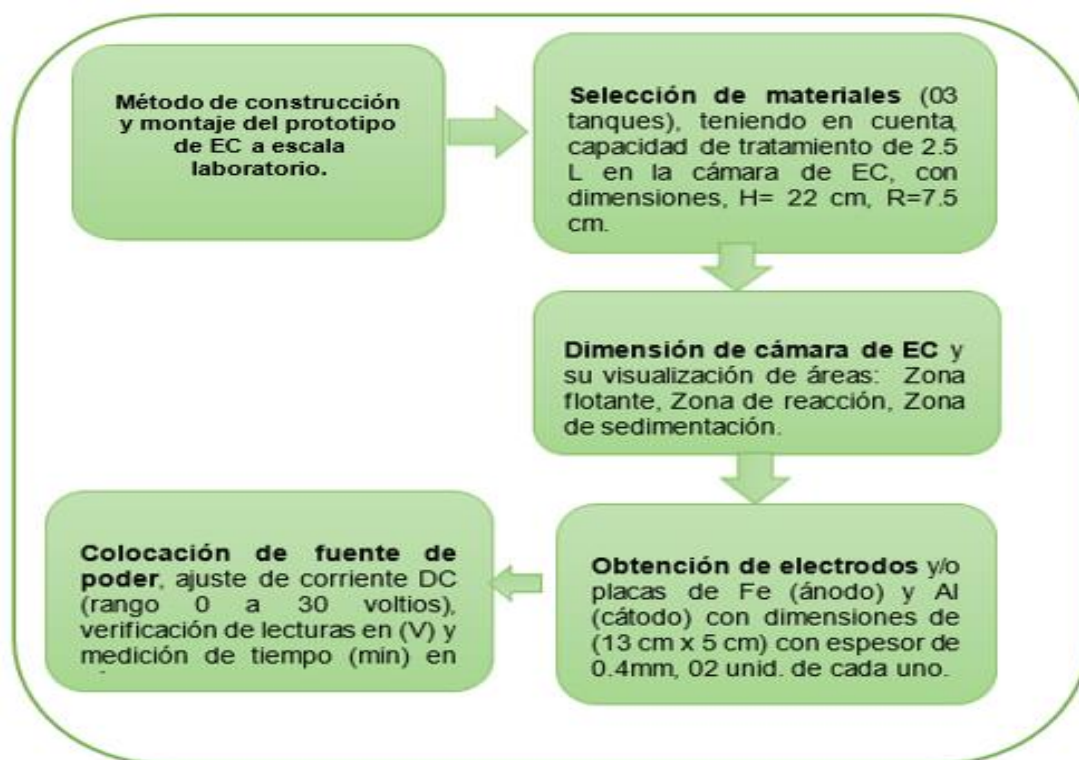
- ✓ Se seleccionó los materiales de depósitos (tanques) 03 unid. de capacidad de 3 L c/u, de tipo plástico transparente, 01 tanque para abastecimiento, 01 tanque para cámara de electrocoagulación (EC) para tratar 2.5 L de aguas residuales provenientes del C.M.A., 01 tanque para depósito, con dimensiones; Altura = 22 cm, radio = 7.5 cm, su construcción y montaje del sistema fue en su totalidad desarmable, también se adaptó soportes de acrílico, para electrodos y/o placas de modo que tengan espacios dentro de la cámara y así desarrollar mejor el proceso de limpieza de celdas después de haber realizado cada prueba o corridas.
- ✓ Dimensión de cámara de EC (electrocoagulación) fue de; Altura =16 cm y se dejó un espacio libre de 6 cm para poder acumularse espumas en el punto superior. Para su visualización de áreas como: **Zona flotante:** Donde se almacenó restos o compuestos de la flotación producida en el proceso. **Zona de reacción:** Donde se sumergió los electrodos y/o placas (Fe y Al) realizándose las reacciones. **Zona de sedimentación:** Para el proceso de sedimentación de lodos.
- ✓ **Electrodos:** La obtención de electrodos y/o placas fueron de fierro como aluminio cuyas dimensiones fueron: 13 cm x 5 cm (área), espesor de 0.4 mm, se emplearon un total de 04 electrodos, 02 electrodos y/o placas de aluminio y 02 electrodos y/o placas de fierro, el fierro como ánodo (electrodo de sacrificio) y aluminio el cómo cátodo (electrodo de reducción).
- ✓ **Rectificador de corriente:** La corriente directa (DC) que se aplicó en las pruebas fue ajustable, rango de medida fue 0 a 5 (A) amperios y V (voltaje) de 0 a 30 voltios, se utilizó el equipo multímetro y/o multitestor digital para verificar las lecturas o resultados, también se empleó cronómetro para

mediciones en tiempo en (minutos), en la cámara de EC (electrocoagulación), para el suministro de alimentación de energía directa (DC) a electrodos y/o placas, se emplearon conexiones de cables para uso eléctrico y pinzas cocodrilo instalados respectivamente en el fierro y aluminio.

- ✓ Se visualiza el prototipo en ANEXO N° 09.

## Figura 6

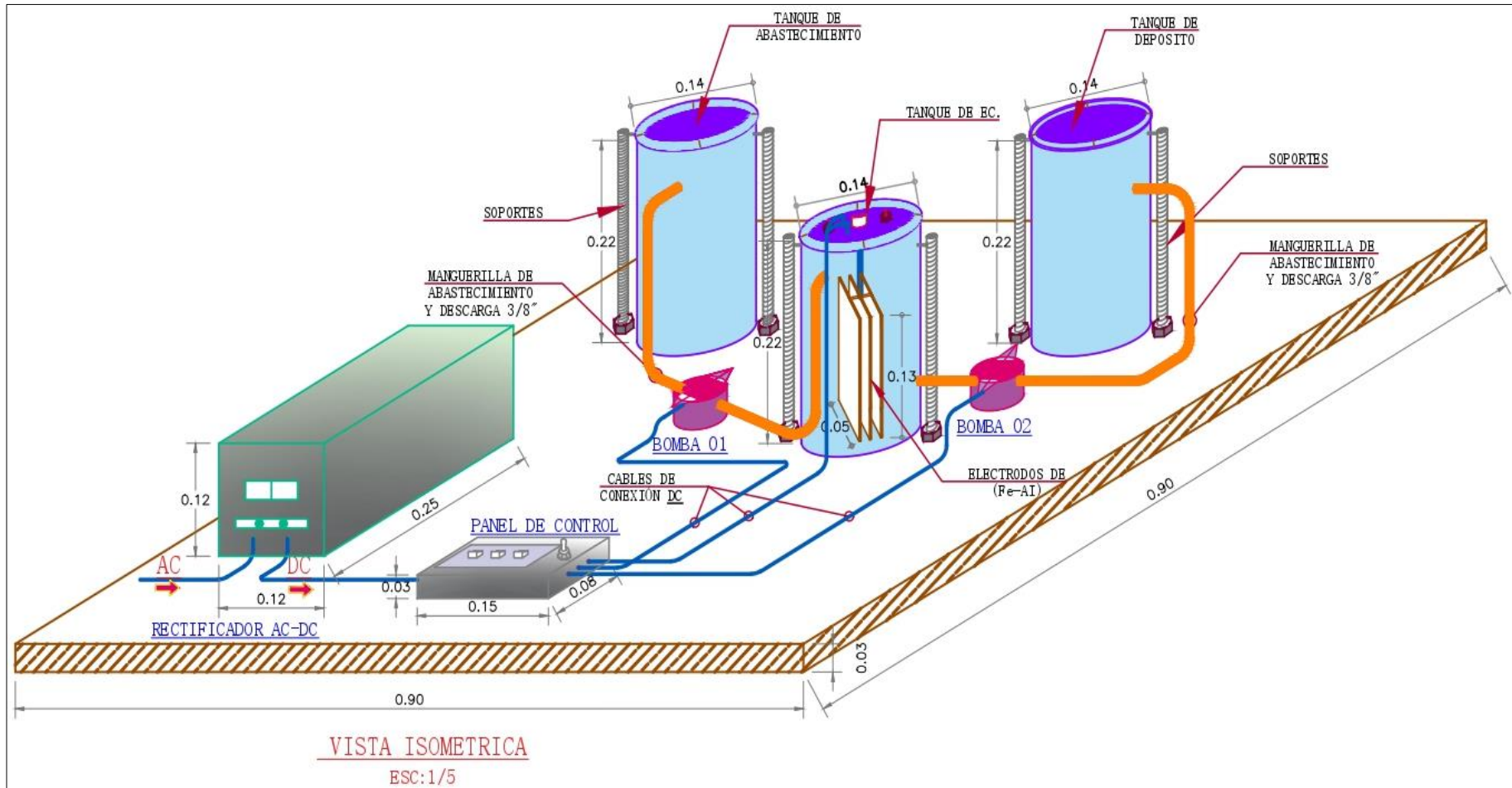
*Flujograma del procedimiento de construcción y montaje del prototipo de EC.*



*Nota:* Elaboración propia

Figura 7

Prototipo del método de electrocoagulación (EC)



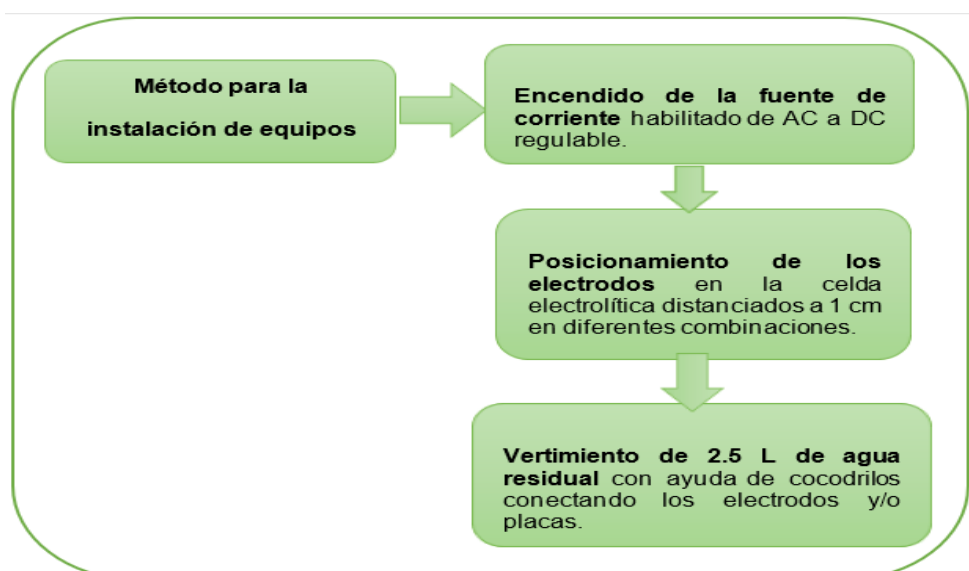
Nota: Elaboración propia

#### 4.5.4. Procedimiento para la instalación de equipos

- ✓ Se encendió el rectificador de corriente habilitado.
- ✓ El posicionamiento de los electrodos y/o placas en la cámara de EC, quedó en forma paralelos y distanciados a 1 cm entre las combinaciones de (fierro - aluminio).
- ✓ Se vertió en la celda 2.5 L de agua residual para su tratamiento respectivo, con ayuda de cocodrilos se conectaron los electrodos y/o placas de aluminio como fierro mediante cables de energía a fuente de corriente de directa (DC) ya instalado, para dar inicio al tratamiento.

#### Figura 8

*Flujograma del proceso para la instalación de equipos.*



*Nota:* Elaboración propia

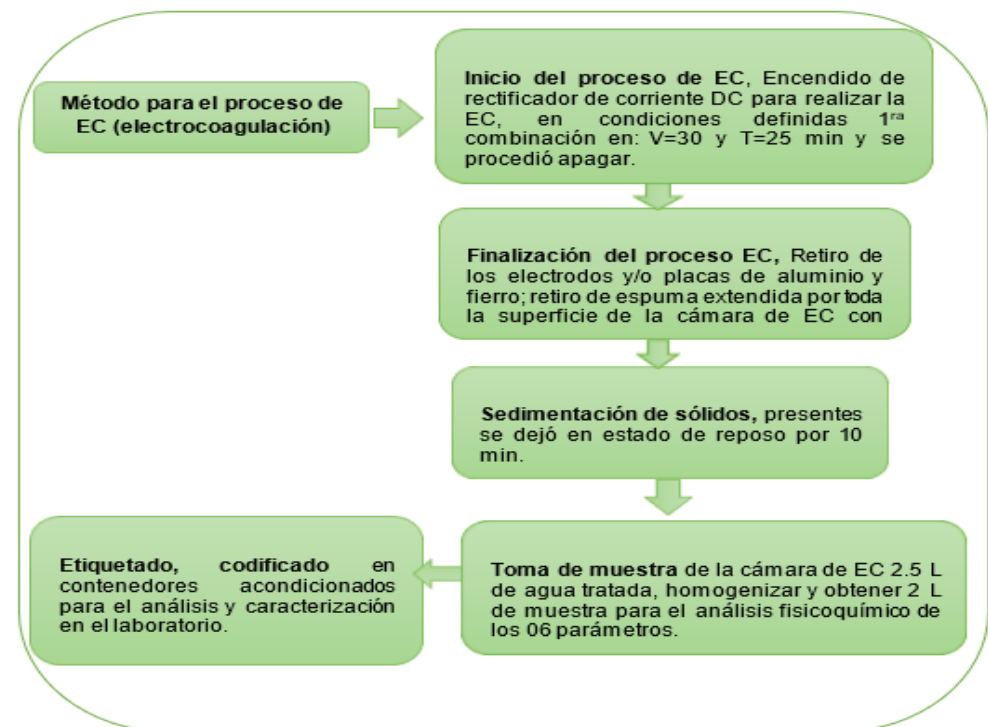
#### 4.5.5. Procedimiento para el proceso de EC (electrocoagulación)

- ✓ Se encendió la fuente de corriente DC para realizar la EC (electrocoagulación) en condiciones definidas, montaje experimental para la primera combinación del tratamiento del agua residual en 30 voltios y tiempo de 25 min.
- ✓ Después del tiempo de proceso cumplido para la primera combinación se procedió apagar el equipo.

- ✓ Se retiraron los electrodos y/o placas de Aluminio-Fierro utilizados y luego con ayuda de paletas se extrajeron las espumas extendidas por toda la superficie de la cámara de EC (electrocoagulación).
- ✓ Luego de remover la capa superficial de espuma, se dejó por 10 minutos en estado reposo para la sedimentación de sólidos presentes.
- ✓ Una vez concluido el tiempo se tomaron muestras de agua electrocoagulada de 2.5 litros para luego homogenizar y obtener 2 litros de muestra desde el depósito para el análisis fisicoquímico de los 06 parámetros establecidos, concluido este proceso se pudo extraer, de manera manual y controlada, con la ayuda de paletas los sedimentos presentes en la cámara de EC para posterior repetición de tratamientos.
- ✓ Las muestras fueron etiquetadas, codificadas en contenedores acondicionados para el análisis y caracterización en laboratorio, el proceso se repitió para cada una de las 2 combinaciones faltantes.

### Figura 9

*Flujograma para el proceso de EC.*



*Nota:* Elaboración propia

#### 4.5.6. Proceso de experimentación

##### 4.5.6.1. Determinación de tratamientos en función de diseño factorial con dos factores

En el trabajo de investigación se identificaron factibles combinaciones para el proceso experimental, por lo cual se empleó como referencia basada en el autor Siqueiros (2004), diseño factorial con 02 factores:

Ecuación 3: *Fórmula - diseño factorial con 02 factores.*

$$N^{\circ} \text{ de pruebas} = m^n$$

Donde:

m: Denota los niveles.

n: Denota el n° de variables independientes (parámetros operacionales).

Sustituyendo tenemos:

$$N^{\circ} \text{ de pruebas} = 2^2$$

$$N^{\circ} \text{ de tratamientos} = 04$$

##### **Tratamientos totales:**

Mediante el diseño factorial se definió 04 tratamientos, teniendo en cuenta dentro de la variable independiente, dimensión y criterios de operación que se mencionan a continuación.

- Voltaje (V)
- Tiempo de retención (min)

Para determinar el número total de tratamientos que abarcó el proceso de EC, se tuvieron en cuenta lo siguiente:

- N° de combinaciones/tratamientos = 04
- N° de repeticiones = 03
- N° total de tratamiento/experimentos =  $3 \times 2^2 = 12$
- Muestra Blanco ( $G_0$ ) = 01

Se obtuvo una tabla de distribución de muestras para el desarrollo de tratamientos.

**Tabla 8***Desarrollo de los tratamientos*

Nº Combinaciones	Repeticiones	Voltaje (V)	Tiempo de retención (min)
Muestra Blanco (G <sub>0</sub> )	1	-	-
T1	Repetición nº 1	30	25
T2		20	15
T3		30	25
T4		20	15
T1	Repetición nº 2	30	25
T2		20	15
T3		30	25
T4		20	15
T1	Repetición nº 3	30	25
T2		20	15
T3		30	25
T4		20	15

*Nota:* Se describen el nº de combinaciones de los tratamientos, repeticiones, voltajes (v) aplicados, y tiempo de retención (min).

#### **4.5.6.2. Técnicas**

Las técnicas utilizadas en este estudio fueron:

- ❖ **Observación directa:** Recopilar información del problema de investigación, identificación de condiciones reales de la población y medidas realizadas durante toma de muestras y procesamiento de tratamiento en general.
- ❖ **Análisis físico-químico:** Para determinar y visualizar reducción en la concentración de parámetros físico-químicos debido al tratamiento de la EC (electrocoagulación).
- ❖ **Estadística:** Se utilizó el software estadístico Minitab versión 19, con el fin de emplear; Prueba de normalidad de datos, prueba de hipótesis Tstudent, punto de comparabilidad de Tukey y Microsoft Excel para determinar el porcentaje (%) de remoción.

- ❖ **Revisiones bibliográficas:** Fue necesario ahondar la búsqueda de fuentes auténticas a fin de definir las características que se llevó a realizar el tratamiento, una de las fuentes principales de búsqueda fue el Google Académico, Scielo, Academia.edu, del cual se extrajeron archivos como; artículos, libros, artículos científicos, revistas, patentes, también se buscaron trabajos de investigación relacionados con el tema de investigación.

#### **4.5.6.3. Validez y confiabilidad de datos**

La autenticidad como la fiabilidad del trabajo de investigación se establece mediante la aprobación de instrumentos por parte del asesor y de juicio de expertos, de acuerdo con el modelo planteado para la solicitud de validación de instrumentos para recolección de información (ver ANEXO N° 01).

#### **4.5.6.4. Análisis de laboratorio**

La muestra obtenida de cada tratamiento se envió al Laboratorio LIMTA –Unajma – Andahuaylas para su análisis fisicoquímico, en la cual se recibió el informe N° 008-2023 donde se reporta los resultados del análisis fisicoquímico: Resultados de la muestra en blanco (caracterización inicial) y resultados post tratamientos (Después de aplicar el método de electrocoagulación) de los 06 parámetros establecidos, ver (ANEXO N° 03). Así con su propia cadena de custodia. Ver (ANEXO N° 04).

**Tabla 9***Metodología utilizada - Laboratorio LIMTA -Unajma*

Ensayo	Método	Año	Unidad
(DQO)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd Ed. Chemical Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method	2017	O2 mg/L
(DBO <sub>5</sub> )	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 22nd Ed. Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test.	2017	mg/L
(SST)	Gravimétrico - standard methods edición 24	2022	mg/L
pH	Electrodo selectivo	-	-
Fosforo total	4500-PE-(Método del ácido ascórbico) del standard methods edición 24	2022	mg/L
Nitrógeno total	Combustión, es parte del equipo TOC (analizador de carbono total)	-	mg/L

*Nota:* Se describe la metodología empleada en laboratorio, para determinar la concentración de parámetros de: DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, pH, Fosforo total, Nitrógeno total.

#### **4.6. Análisis de datos**

Para el desarrollo del análisis de datos se aplicó lo siguiente:

- ✓ Software - Estadístico Minitab Versión 19: Se empleó para procesar y/o analizar resultados obtenidos de la aplicación tales como: Prueba de normalidad de datos.
- ✓ La prueba de hipótesis T de Student: Se empleó para aceptar o rechazar la  $H_0$  a un nivel de significancia de 0.05.
- ✓ Prueba de comparabilidad de Tukey: Se empleó para poder agrupar Medias en diferentes familias y poder determinar si se diferencian entre sí, por ende, este ensayo se emplea cuando los tratamientos tienen el mismo n° de réplicas, también ayuda a identificar los tratamientos que dieron mejores resultados y así poder determinar en qué áreas operativas bajo ciertas condiciones fue más favorable reducir las concentraciones de los parámetros.
- ✓ Software - Microsoft Excel: Se empleó para tabulaciones de resultados obtenidos en post tratamiento, y determinar el porcentaje (%) de remoción presentes en los parámetros evaluados.

#### **4.7. Consideraciones éticas**

Este trabajo de investigación se desarrolló como búsqueda de metodologías que ayuden a disminuir los contaminantes de aguas residuales emitidos por el Camal Municipal Abancay, como también la autorización de la Sub Gerencia de Comercialización de la Municipalidad Provincial de Abancay quien está a cargo del establecimiento, los reportes que se obtuvieron fueron custodiados hasta la conclusión del informe final de la investigación.

## V. Resultados y discusión

### 5.1. Análisis estadístico para hipótesis - (E1)

#### 5.1.1 Caracterización pre tratamiento de las aguas residuales del C.M.A.

E1: Los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos generados a partir de la caracterización pre tratamiento de las aguas residuales se verán influenciados significativamente por actividades propias del C.M.A.

Para la caracterización de pre tratamiento, las muestras fueron enviados al (LIMTA) Laboratorio de Investigación en Materiales para el Tratamiento de Aguas y Alimentos UNAJMA-Andahuaylas, donde se realizó el análisis fisicoquímico de parámetros como: - Sólidos suspendidos totales – SST, Demanda química de oxígeno - DQO, Demanda bioquímica de oxígeno - DBO<sub>5</sub>, fósforo total, nitrógeno total y pH.

#### Tabla 10

*Resultado de caracterización pre tratamiento de Agua residual del C.M.A.*

Parámetros	Pre tratamiento (G <sub>0</sub> ) mg/l
SST	1033.3
DQO	5960
DBO <sub>5</sub>	4770
Fósforo T.	45.2
Nitrógeno T.	338.57
pH	7.74

*Nota:* Resultado de caracterización inicial del agua residual del C.M.A.

#### 5.1.2 Resultados generales post tratamiento con el prototipo aplicado del método de EC (electrocoagulación)

Los resultados obtenidos tras el desarrollo de tratamientos se muestran a continuación, se tuvo en cuenta que el análisis fisicoquímico de los parámetros, fueron enviados y realizados por; Laboratorio de Investigación en Materiales para el Tratamiento de Aguas y Alimentos UNAJMA-Andahuaylas. Por otra parte, se señala que la muestra inicial (G<sub>0</sub>) no se empleó ningún tipo de tratamiento. Por ende, los diferentes valores de

concentración en unidades (mg/l) de 06 parámetros analizados inicialmente se mencionan en la Tabla 10.

**Tabla 11**

*Resultado de análisis fisicoquímico de agua residual del C.M.A. post tratamiento.*

Nº Combinaciones	Repeticiones	SST (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DQO (mg/l)	Fósforo T. (mg/l)	Nitrógeno T. (mg/l)	pH
<b>Blanco</b>	<b>1</b>	<b>1033.3</b>	<b>4770</b>	<b>5960</b>	<b>45.2</b>	<b>338.57</b>	<b>7.74</b>
T1		176.7	199	470	9.3	177.15	8.78
T2	Repeticion nº 1	190.6	215	534	14.5	178.61	8.21
T3		189.7	230	486	13.0	180.47	9.06
T4		198.8	245	545	19.3	188.46	8.25
T1		178.8	203	479	13.3	179.35	9.21
T2		187.6	237	528	14.1	181.36	8.47
T3	Repeticion nº 2	181.4	232	495	10.4	180.23	8.21
T4		202.6	247	538	17.4	182.62	8.68
T1		177.5	202	478	12.4	194.27	9.03
T2		194.6	217	515	10.6	194.45	8.24
T3	Repeticion nº 3	178.4	215	468	9.4	179.36	9.04
T4		207.6	227	524	14.5	181.45	8.06

*Nota:* Se detalla resultados obtenidos luego de aplicar el prototipo del método de EC para cada tratamiento en 03 réplicas de; SST, DQO, DBO<sub>5</sub>, fosforo total, nitrógeno total, pH.

En el ANEXO N° 03 se adjunta los resultados de análisis fisicoquímicos de laboratorio pre y post tratamiento (Informe de Ensayo N° 008-2023).

**Tabla 12**

*Comparación de resultado de caracterización pre y post tratamiento de agua residual del C.M.A. con VMA.*

Parámetros	Pre tratamiento	Post tratamiento	Unidad (mg/L)
	(G <sub>0</sub> ) mg/l	(mg/l)	
SST	1033.3	177.67	500
DQO	5960	475.67	1000
DBO <sub>5</sub>	4770	201.33	500
Fósforo T.	45.2	10.93	-
Nitrógeno T.	338.57	180.02	-
pH	7.74	8.3	-

*Nota:* Se describe las comparaciones pre y post tratamiento del C.M.A., con la normativa de D.S. N° 010 – 2019 VIVIENDA.

## 5.2 Análisis estadístico para hipótesis - (E2 y E3)

E2: Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio reducirá eficazmente la concentración de: SST, DQO, DBO<sub>5</sub>, fósforo total, nitrógeno total y pH.

E3: El porcentaje óptimo de remoción influirá al aplicar el prototipo del método de electrocoagulación en comparación con los resultados de la caracterización pre tratamiento de las aguas residuales.

### 5.2.1 Procedimiento estadístico para – SST

Contrastación de hipótesis:

Hipótesis:

H<sub>a</sub>: Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio reducirá eficazmente la concentración de SST en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2023.

H<sub>a</sub>:  $\mu < 1033.3$

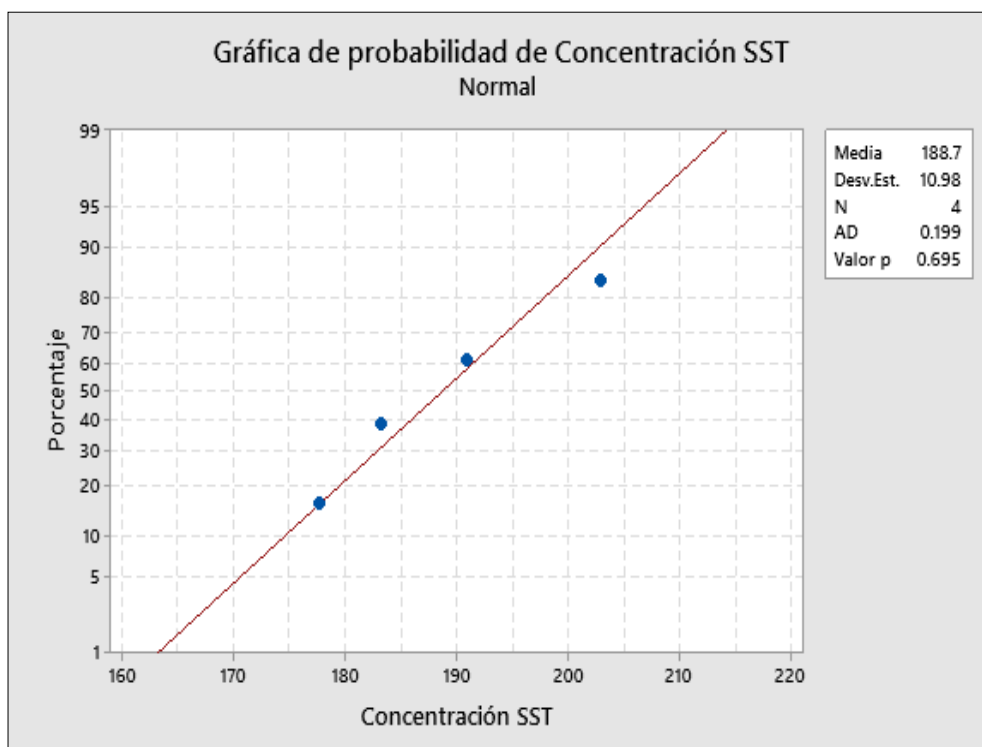
$H_0$ : Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio no reducirá eficazmente la concentración de SST en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2023.

$$H_0: \mu=1033.3$$

### Prueba de normalidad de datos

#### Figura 10

*Normalidad de datos - Sólidos Suspendidos Totales (SST)*



*Nota: Elaboración propia*

En la figura 10 se determinó que los datos del parámetro SST presenta una distribución normal, debido que el valor p: 0.695 es  $> 0.05$ .

### Prueba de Hipótesis T student

En esta prueba consta en poder rechazar y/o aceptar la hipótesis nula ( $H_0$ ), para lo cual se debe determinar el valor (P).

Por otra parte, si el valor  $P >$  del nivel de significancia = 0.05, entonces no se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ).

Pero si el Valor  $P <$  del nivel de significancia = 0.05, entonces se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ).

Con el software Minitab se obtuvo:

### Figura 11

Resultado de prueba T Student de datos - SST

T de una muestra: concentración -SST				
Estadísticas descriptivas				
N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Límite superior de 95% para $\mu$
4	188.69	10.98	5.49	201.61

$\mu$ : media de Concentración - SST

Prueba	
Hipótesis nula	$H_0: \mu = 1033.3$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu < 1033.3$
Valor T	Valor p
-153.81	0.000

Nota: Elaboración propia.

En la hipótesis nula ( $H_0$ ) se plantea que la media poblacional ( $\mu=1033.3$ ), mientras que en la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) se sugiere que ( $\mu < 1033.3$ ) con un valor de  $P = 0.000$ , que es menor que el nivel de significancia establecido de 0.05 ( $P <$  Nivel de significancia=0.05), se concluye en rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ). En consecuencia, se acepta la hipótesis alternativa, indicando que los resultados del tratamiento mediante el prototipo planteado del método de EC reducen eficazmente a la concentración inicial de 1033.3 mg/l de (SST).

### Prueba estadístico (Tukey) de comparabilidad

Prueba de Tukey se realizó para poder agrupar la Media de los T. de grupos diferentes y compararlos entre sí y poder determinar si una muestra era significativamente diferente de los demás. Esta prueba también se emplea cuando los tratamientos tienen

mismo número de réplicas, con objetivo de descubrir cómo se relacionan las (M) de un grupo a otro.

En consecuencia, se propone que, si las medias (M) comparten grupos o caracteres, indica una similitud considerable entre ellas, sin diferencias significativas entre los tratamientos. En este sentido, se llevó a cabo un análisis mediante la prueba de Tukey para los 06 parámetros.

**Tabla 13**

*Prueba de comparabilidad Tukey – Sólidos suspendidos totales.*

Factor	N	Media	Agrupación
T4	3	203.00	A
T2	3	190.93	B
T3	3	183.17	B
T1	3	177.67	C

*Nota:* Resultado de prueba - comparabilidad Tukey, para evaluar la similitud de M entre los T.

La Media de T4 y T1, representadas en la tabla 13, pertenecen a grupos diferentes, A y C respectivamente, indicando una diferencia significativa entre ellas al no ser iguales. Esto sugiere que las condiciones aplicadas en T4 y T1 favorecieron la obtención de Medias distintas. En contraste, las Medias T2 y T3 pertenecen al grupo B, lo que implica que no hay una diferencia significativa entre ellas debido a su similitud. Por lo tanto, se concluye que las condiciones de T2 y T3 del grupo B, permitieron obtener Medias relativamente similares entre sí. También se destaca que en T1, la media o concentración es menor que en los otros tratamientos, lo que indica que bajo las condiciones experimentales del grupo C se logró un mejor resultado en reducir eficazmente la concentración de SST mediante el prototipo planteado del método de EC.

### 5.2.2 Determinación de porcentaje (%) de remoción del parámetro - SST

Para determinar el porcentaje (%) de remoción de los parámetros SST, DQO, DBO5, Fósforo total y nitrógeno total, se tomó en referencia al autor Flores (2018), donde la fórmula es:

$$\frac{Vi - Vf}{Vi} * 100$$

Donde:

Vi: valor inicial - parámetro

Vf: valor final - parámetro post tratamiento

Por consiguiente, dichos resultados obtenidos del parámetro SST en los siguientes tratamientos propuestos y réplicas se presentan a continuación.

**Tabla 14**

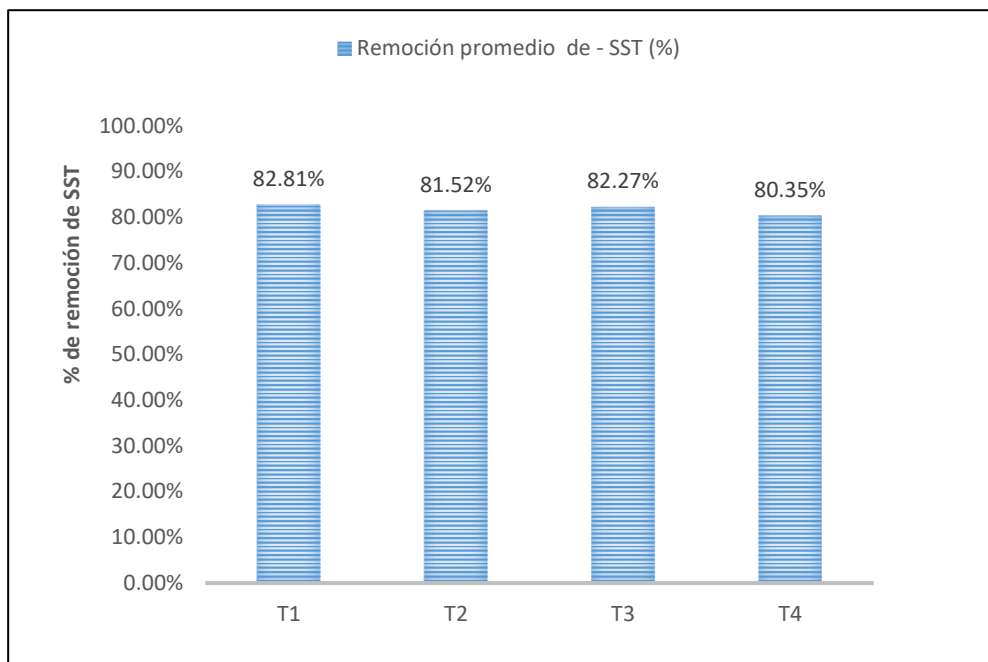
*Eficacia de remoción en (%) del parámetro - Sólidos suspendidos totales.*

N° Tratamientos	Media	Remoción en promedio del parámetro SST (%)
T1	177.67	82.81
T2	190.93	81.52
T3	183.17	82.27
T4	203.00	80.35

*Nota:* Se detalla resultados de (%) de remoción de SST por los tratamientos planteados.

**Figura 12**

*Eficacia de remoción en (%) del parámetro - SST*



*Nota:* Elaboración propia.

Por lo tanto, en figura 12 se puede observar que el tratamiento 01 (T1) logró el porcentaje óptimo de remoción al 82.81 % en contraste inicial de concentración de SST - sólidos suspendidos totales.

### 5.2.3 proceso estadístico para – DQO

Contrastación de hipótesis:

Hipótesis:

H<sub>a</sub>: Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio reducirá eficazmente la concentración de DQO en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2023.

H<sub>a</sub>:  $\mu < 5960$

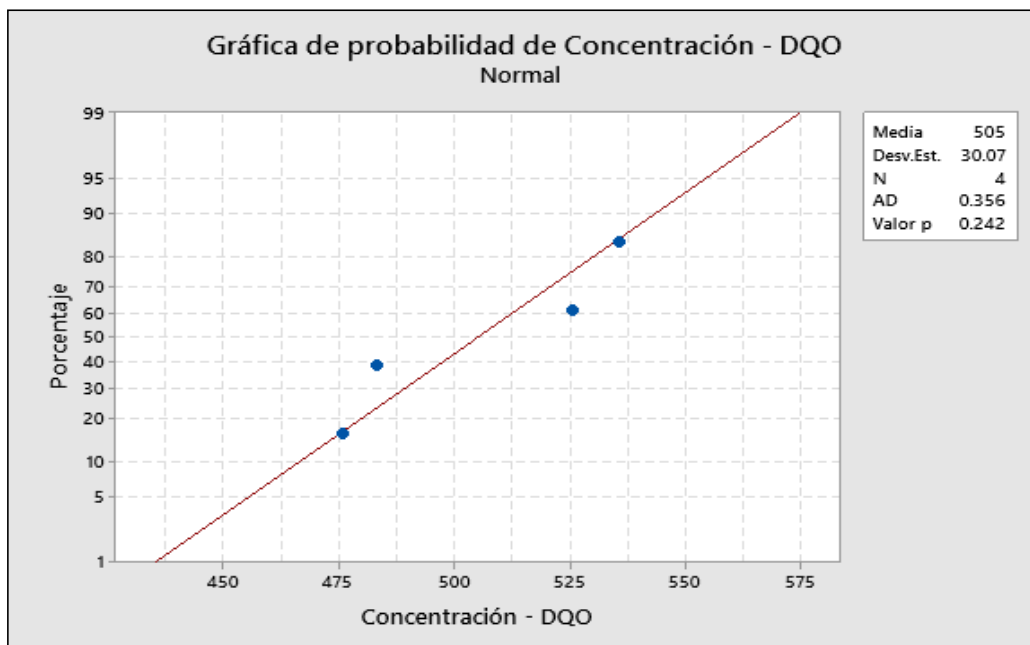
H<sub>0</sub>: Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio no reducirá eficazmente la concentración de DQO en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2023.

H<sub>0</sub>:  $\mu = 5960$

## Prueba de normalidad de datos

**Figura 13**

*Normalidad de datos para DQO*



*Nota:* Elaboración propia.

Por lo tanto, en la figura 13 se determina que los datos de parámetro DQO presenta distribución normal, debido que el valor p: 0.242 es  $> 0.05$ .

### Prueba de Hipótesis con T student

En esta prueba consta en rechazar o aceptar la  $H_0$ , para lo cual se debe determinar el valor P.

Entonces, si el valor  $P >$  del nivel de significancia = 0.05, entonces no se rechaza la ( $H_0$ ).

Pero si el Valor  $P <$  del nivel de significancia = 0.05, entonces se rechaza la ( $H_0$ ).

Con el Software Minitab se obtuvo lo siguiente:

**Figura 14**

Resultado de prueba T Student de datos – DQO

T de una muestra: concentración -DQO				
Estadísticas descriptivas				
N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Límite superior de 95% para $\mu$
4	505.0	30.1	15.0	540.4
$\mu$ : media de Concentración – DQO				
Prueba				
Hipótesis nula		$H_0: \mu = 5960$		
Hipótesis alterna		$H_1: \mu < 5960$		
	Valor T	Valor p		
	-362.86	0.000		

Nota: Elaboración propia.

En la hipótesis nula ( $H_0$ ) se plantea que la media poblacional ( $\mu=5960$ ), mientras que en la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) se sugiere que ( $\mu<5960$ ) con un valor de  $P = 0.000$ , que es menor que el nivel de significancia establecido de 0.05 ( $P < \text{Nivel de significancia} = 0.05$ ), se concluye en rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ). En consecuencia, se acepta la hipótesis alternativa, indicando que los resultados del tratamiento mediante el prototipo planteado del método de EC reducen eficazmente a la concentración inicial de 5960 mg/l de (DQO).

### Prueba estadístico (Tukey) de Comparabilidad

**Tabla 15**

Prueba de comparabilidad Tukey - Demanda química de oxígeno.

Factor	N	Media	Agrupación
T4	3	535.67	A
T2	3	525.67	A
T3	3	483.00	B
T1	3	475.67	B

Nota: Comparabilidad Tukey para evaluar la similitud de Medias entre tratamientos.

En la tabla, se evidencia las Medias T4 y T2 corresponden al grupo A, mientras que las Medias T3 y T1 pertenecen al grupo B, indicando una diferencia significativa entre ellas

al no ser iguales. Se interpreta que las condiciones aplicadas en los tratamientos de las agrupaciones A y B causaron Medias similares en cada agrupación de manera independiente. Por ende, las condiciones que se llevaron a cabo T3 y T1 del grupo B permitieron propiciar Medias relativamente similares entre sí. Por otra parte, en T1 la media o concentración es menor que en los otros tratamientos, lo que indica que bajo las condiciones experimentales del grupo B se logró un mejor resultado en reducir eficazmente la concentración de DQO (Demanda química de oxígeno) mediante el prototipo planteado del método de EC.

#### 5.2.4 Determinación de porcentaje (%) de remoción del parámetro - DQO

**Tabla 16**

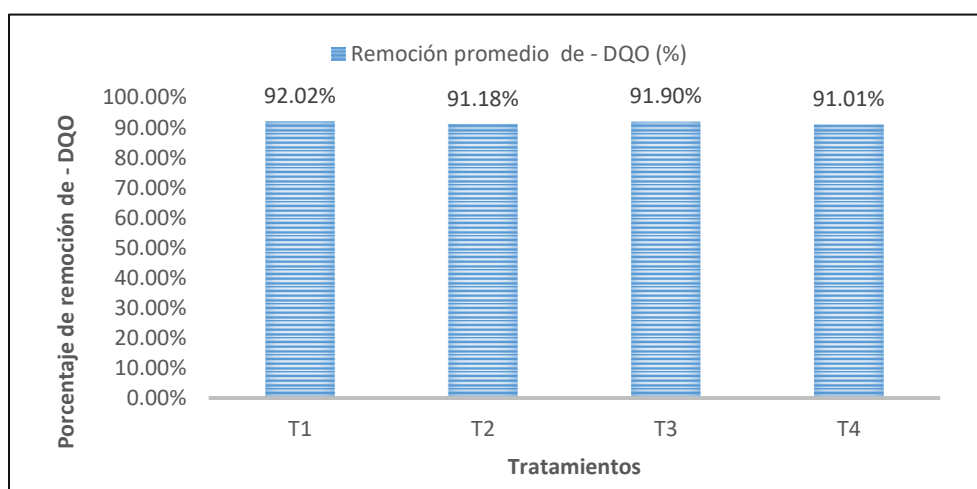
*Eficacia de remoción en (%) del parámetro - Demanda química de oxígeno*

N° Tratamientos	Media	Remoción en promedio del parámetro DQO (%)
T1	475.67	92.02
T2	525.67	91.18
T3	483.00	91.90
T4	535.67	91.01

*Nota:* Se detalla resultados de remoción en (%) - DQO por tratamiento planteado

**Figura 15**

*Eficacia de remoción en (%) del parámetro – DQO*



*Nota:* Elaboración propia.

Por lo tanto, de la figura 15 se puede observar que el tratamiento (T1) logró el porcentaje óptimo de remoción al 92.02 % en contraste inicial de concentración de DQO (demanda química de oxígeno).

### 5.2.5 Proceso estadístico para - DBO<sub>5</sub>

Contrastación de hipótesis:

Hipótesis:

H<sub>a</sub>: Si se aplica mediante el prototipo del método de electrocoagulación a escala laboratorio reducirá eficazmente la concentración de DBO<sub>5</sub> en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2023.

H<sub>a</sub>:  $\mu < 4770$

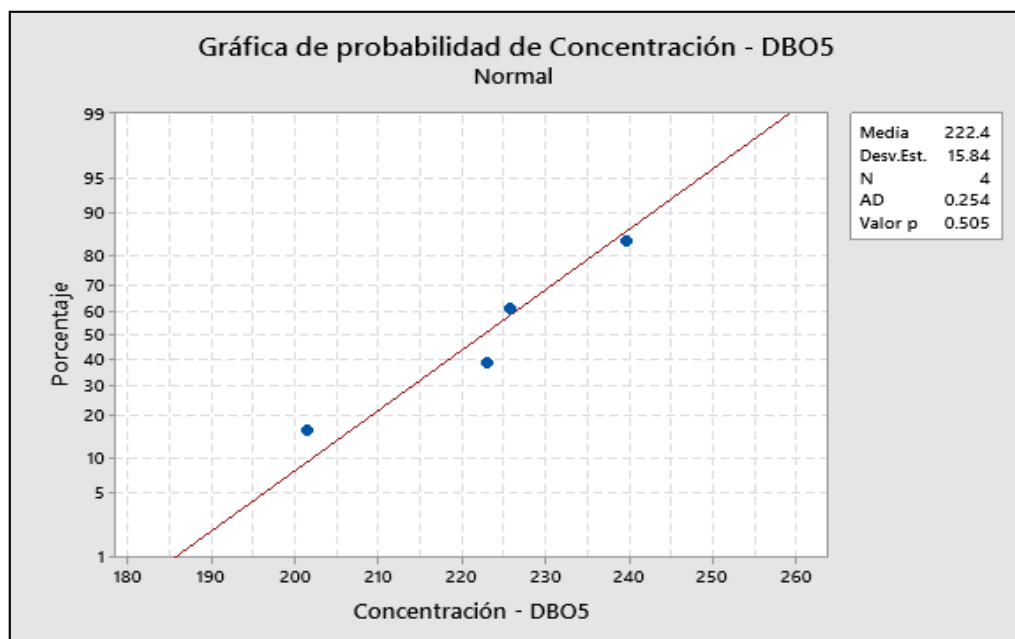
H<sub>0</sub>: Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio no reducirá eficazmente la concentración de DBO<sub>5</sub> en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2023.

H<sub>0</sub>:  $\mu = 4770$

### Prueba de normalidad de datos

#### Figura 16

*Normalidad de datos para DBO<sub>5</sub>*



Nota: Elaboración propia.

Por ende, en fig. 16 se determinó que los datos del parámetro demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) presenta distribución normal, debido que el valor  $p$ :  $0.505 > 0.05$ .

### Prueba de Hipótesis con T student

La presente prueba consta en rechazar o aceptar la  $H_0$ , para lo cual se debe determinar el valor  $P$ .

Por otra parte, si el valor  $P >$  del nivel de significancia = 0.05, entonces no se rechaza la ( $H_0$ ).

Pero si el Valor  $P <$  del nivel de significancia = 0.05, entonces se rechaza la ( $H_0$ )

Con Software Minitab se obtuvo lo siguiente:

### Figura 17

Resultado de prueba T Student de datos –  $DBO_5$

T de una muestra: concentración – $DBO_5$				
Estadísticas descriptivas				
N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Límite superior de 95% para $\mu$
4	222.42	15.84	7.92	241.06

$\mu$ : media de Concentración -  $DBO_5$

Prueba	
Hipótesis nula	$H_0: \mu = 4770$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu < 4770$
Valor T	Valor p
-574.09	0.000

Nota: Elaboración propia.

En la hipótesis nula ( $H_0$ ) se plantea que la Media poblacional ( $\mu=4770$ ), mientras que en la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) se sugiere que ( $\mu < 4770$ ) con un valor de  $P = 0.000$ , que es menor que el nivel de significancia establecido de 0.05 ( $P <$  Nivel de significancia=0.05), se concluye en rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ). En consecuencia, se acepta la hipótesis alternativa, indicando que los resultados del tratamiento mediante el prototipo planteado del método de EC reducen eficazmente a la concentración inicial de 4770 mg/l de ( $DBO_5$ ).

### Prueba estadístico (Tukey) de Comparabilidad

**Tabla 17**

*Prueba de comparabilidad Tukey - Demanda bioquímica de oxígeno.*

Factor	N	Media	Agrupación	
T4	3	239.67	A	
T3	3	225.67	A	B
T2	3	223.00	A	B
T1	3	201.33	B	

*Nota:* Comparabilidad Tukey para evaluar similitudes de Medias entre tratamientos.

La tabla indica que las Medias de T4 corresponden al grupo A, mientras que las Medias de T1 pertenecen al grupo B, evidenciando una diferencia significativa entre ellas. Se sugiere que las condiciones independientes de los tratamientos en los grupos A y B generaron medias similares en T3 y T2. Además, se resalta que bajo las condiciones experimentales del grupo B, el T1 se logró un mejor resultado en reducir eficazmente la concentración de demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) mediante el prototipo planteado del método de e EC.

#### 5.2.6 Determinación de Porcentaje (%) de remoción del parámetro - DBO<sub>5</sub>

**Tabla 18**

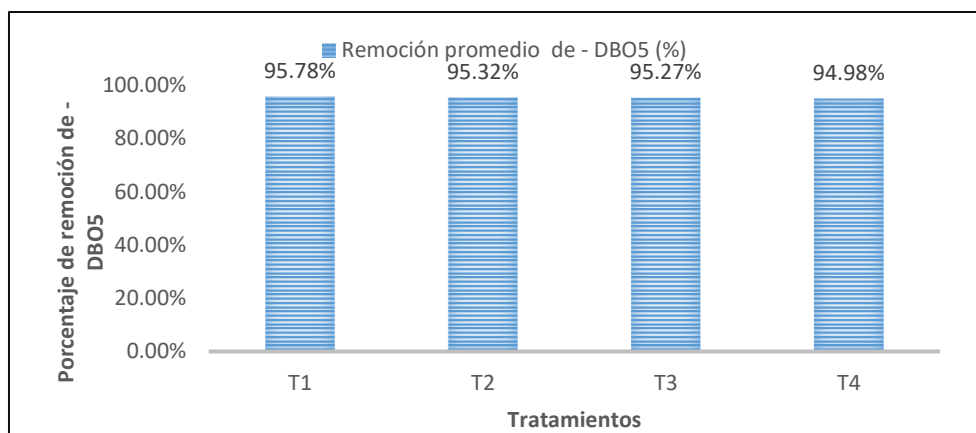
*Eficacia de remoción en (%) del parámetro - Demanda bioquímica de oxígeno.*

N° Tratamientos	Media	Remoción en promedio del parámetro DBO <sub>5</sub> (%)
T1	201.33	95.78
T2	223.00	95.32
T3	225.67	95.27
T4	239.67	94.98

*Nota:* Resultados de remoción de - DBO<sub>5</sub> por cada tratamiento planteado.

**Figura 18**

*Eficacia de remoción en (%) del parámetro - DBO<sub>5</sub>.*



*Nota:* Elaboración propia.

Por lo tanto, de la figura 18 se puede observar que el T1 logró el porcentaje óptimo de remoción al 95.78 % en contraste inicial de concentración de DBO<sub>5</sub> (Demanda bioquímica de oxígeno).

### 5.2.7 Proceso estadístico para - fósforo total

Contrastación de hipótesis:

Hipótesis:

H<sub>a</sub>: Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio reducirá eficazmente la concentración de fósforo total en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2023.

H<sub>a</sub>:  $\mu < 45.2$

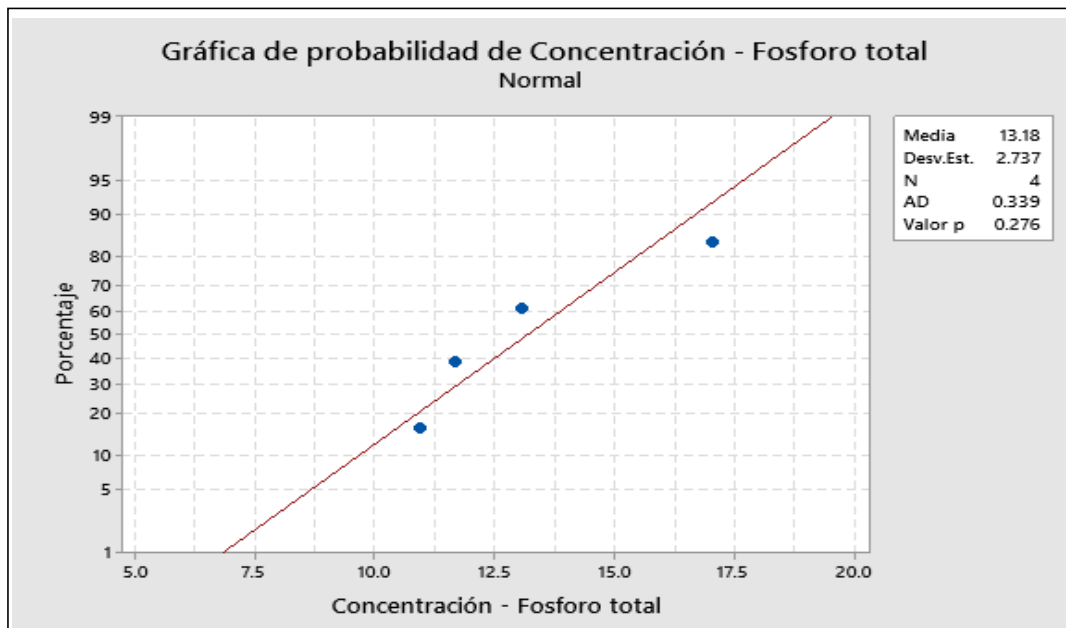
H<sub>0</sub>: Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio no reducirá eficazmente la concentración de fósforo total en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2023.

H<sub>0</sub>:  $\mu = 45.2$

**Prueba de normalidad de datos**

**Figura 19**

*Normalidad de datos para fósforo total.*



*Nota:* Elaboración propia.

Por ende, en la fig. 19 se determina que los datos del parámetro de fósforo total presentan distribución normal, debido que el valor p: 0.276 es  $> 0.05$ .

### **Prueba de Hipótesis con T student**

En esta prueba consta en rechazar o aceptar la  $H_0$ , para lo cual se debe determinar el valor P.

Por otra parte, si el valor  $P >$  del nivel de significancia = 0.05, entonces no se rechaza la ( $H_0$ ).

Pero si el Valor  $P <$  del nivel de significancia = 0.05, entonces se rechaza la ( $H_0$ ).

Con el Software Minitab se obtuvo lo siguiente:

**Figura 20**

*Resultado de prueba T Student de datos – Fósforo total*

T de una muestra: concentración –Fósforo total				
Estadísticas descriptivas				
N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Límite superior de 95% para $\mu$
4	14.02	2.74	1.37	16.40

$\mu$ : media de Concentración - Fosforo total

Prueba	
Valor T	Valor p
-23.40	0.000

*Nota:* Elaboración propia.

En la hipótesis nula ( $H_0$ ) se plantea que la media poblacional ( $\mu=45.2$ ), mientras que en la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) se sugiere que ( $\mu<45.2$ ) con un valor de  $P = 0.000$ , que es menor que el nivel de significancia establecido de 0.05 ( $P < \text{Nivel de significancia}=0.05$ ), se concluye en rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ). En consecuencia, se acepta la hipótesis alternativa, indicando que los resultados del tratamiento mediante el prototipo planteado del método de EC reducen eficazmente a la concentración inicial de 45.2 mg/l de fósforo t.

### Prueba estadístico (Tukey) de Comparabilidad

**Tabla 19**

*Prueba de comparabilidad Tukey - Fósforo total.*

Factor	N	Media	Agrupación	
T4	3	17.07	A	
T2	3	13.07	A	B
T1	3	11.67	A	B
T3	3	10.93	B	

*Nota:* Comparabilidad Tukey para evaluar similitud de Medias entre los tratamientos.

La tabla indica que las medias de T4 corresponden al grupo A, mientras que las Medias de T3 pertenecen al grupo B, indicando una diferencia significativa entre ellas. Se infiere que las condiciones independientes de los tratamientos en los grupos A y B generaron Medias similares en T2 y T1. Además, se subraya que bajo las condiciones experimentales del grupo B el T3 logró un mejor resultado en reducir eficazmente la concentración de fósforo total mediante el prototipo planteado del método de EC.

### 5.2.8 Determinación de porcentaje (%) de remoción del parámetro - Fósforo

#### Total

**Tabla 20**

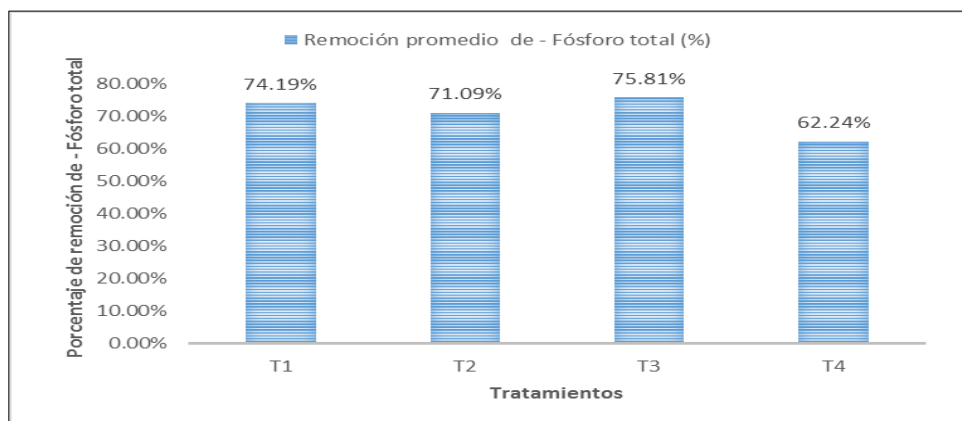
*Eficacia de remoción en (%) del parámetro - Fósforo Total.*

N° Tratamientos	Media	Remoción en promedio del parámetro fosforo total (%)
T1	11.67	74.19
T2	13.07	71.09
T3	10.93	75.81
T4	17.07	62.24

Nota: Resultados de remoción - fósforo total por tratamiento planteado.

**Figura 21**

*Eficacia de remoción en (%) del parámetro - Fósforo Total*



Nota: Elaboración propia.

Por lo tanto, de la figura 21 se puede observar que el tratamiento (T3) logró el porcentaje óptimo de remoción al 75.81 % en contraste inicial de concentración de Fosforo total.

### 5.2.9 Proceso estadístico para - Nitrógeno Total

Contrastación de hipótesis:

Hipótesis:

$H_a$ : Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio reducirá eficazmente la concentración de nitrógeno total en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2023.

$H_a: \mu < 338.57$

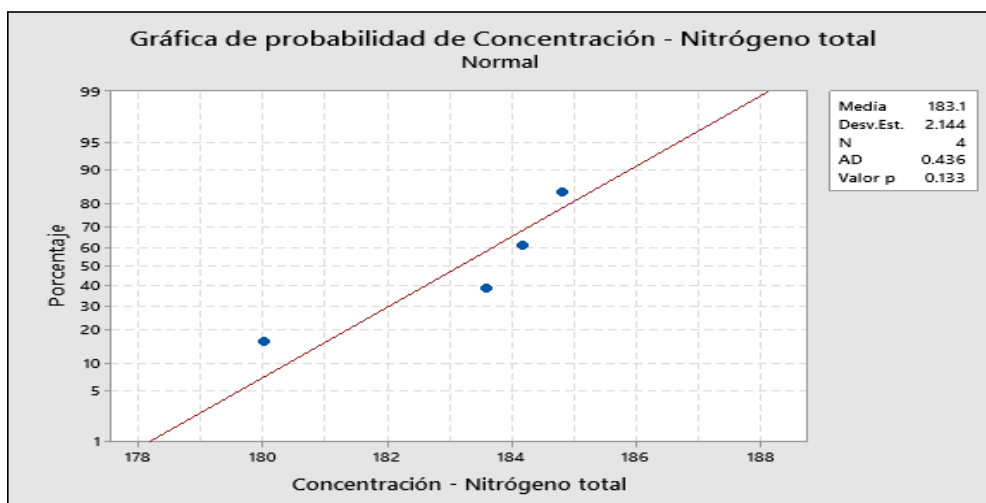
$H_0$ : Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio no reducirá eficazmente la concentración de nitrógeno total en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2023.

$H_0: \mu = 338.57$

#### Prueba de normalidad de datos

### Figura 22

*Normalidad de datos para nitrógeno total*



*Nota:* Elaboración propia.

Por ende, en la figura 22 se determina que los datos del parámetro de nitrógeno total presentan distribución normal, debido que el valor p: 0.133 es  $> 0.05$ .

### Prueba de Hipótesis con T student

En esta prueba consta en rechazar o aceptar la  $H_0$ , para lo cual se debe determinar el valor P.

Por otra parte, si el valor  $P >$  del nivel de significancia = 0.05, entonces no se rechaza la ( $H_0$ ).

Pero si el Valor  $P <$  del nivel de significancia = 0.05, entonces se rechaza la ( $H_0$ ).

Con el Software Minitab se obtuvo lo siguiente:

#### Figura 23

*Resultado de prueba T Student de datos – Nitrógeno total*

T de una muestra: concentración –Nitrógeno total				
Estadísticas descriptivas				
N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Límite superior de 95% para $\mu$
4	183.15	2.14	1.07	185.67

$\mu$ : media de Concentración - Nitrógeno total

Prueba	
Hipótesis nula	$H_0: \mu = 338.57$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu < 338.57$
Valor T	Valor p
-144.99	0.000

*Nota:* Elaboración propia.

En la hipótesis nula ( $H_0$ ) se plantea que la media poblacional ( $\mu=338.57$ ), mientras que en la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) se sugiere que ( $\mu < 338.57$ ) con un valor de  $P = 0.000$ , que es menor que el nivel de significancia establecido de 0.05 ( $P <$  Nivel de significancia=0.05), se concluye en rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ). En consecuencia, se acepta la hipótesis alternativa, indicando que los resultados del tratamiento mediante el prototipo planteado del método de EC reducen eficazmente a la concentración inicial de 338.57 mg/l de nitrógeno total.

### Prueba estadístico (Tukey) de Comparabilidad

**Tabla 21**

*Prueba de comparabilidad Tukey - Nitrógeno total.*

Factor	N	Media	Agrupación
T2	3	184.81	A
T4	3	184.18	A
T1	3	183.59	A
T3	3	180.02	A

*Nota:* Comparabilidad Tukey para evaluar similitud de Medias entre tratamientos.

La tabla indica que las Medias de T2, T4, T1 y T3 pertenecen a la agrupación A, lo que sugiere que no hay una diferencia significativa entre ellas. Se infiere que las condiciones independientes de los tratamientos en el grupo A generaron medias similares. Además, se resalta que bajo las condiciones experimentales del grupo A, se obtuvo un mejor resultado en reducir eficazmente la concentración de nitrógeno total, especialmente en el T3, mediante el prototipo planteado del método de EC.

### **5.2.10 Determinación de porcentaje (%) de remoción del parámetro - Nitrógeno**

**Tabla 22**

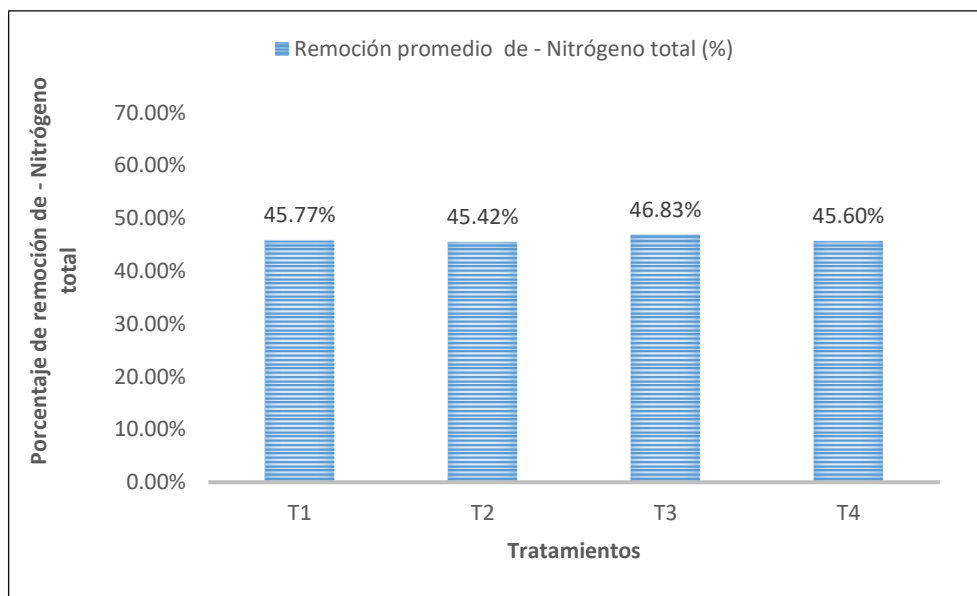
*Eficacia de remoción en (%) del parámetro - Nitrógeno Total.*

Nº Tratamientos	Media	Remoción en promedio del parámetro nitrógeno total (%)
T1	183.59	45.77
T2	184.81	45.42
T3	180.02	46.83
T4	184.18	45.60

*Nota:* Resultados de remoción - Nitrógeno total por tratamiento planteado.

## Figura 24

Eficacia de remoción en (%) del parámetro - Nitrógeno Total.



Nota: Elaboración propia.

Por lo tanto, de la figura 24 se puede observar que el tratamiento (T1) logró el porcentaje óptimo de remoción al 45.77 % en contraste inicial de concentración de Nitrógeno total.

### 5.2.11 Proceso estadístico para – pH

Contrastación de hipótesis:

Hipótesis:

$H_a$ : Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio reducirá eficazmente la concentración de pH en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2023.

$H_a: \mu < 7.74$

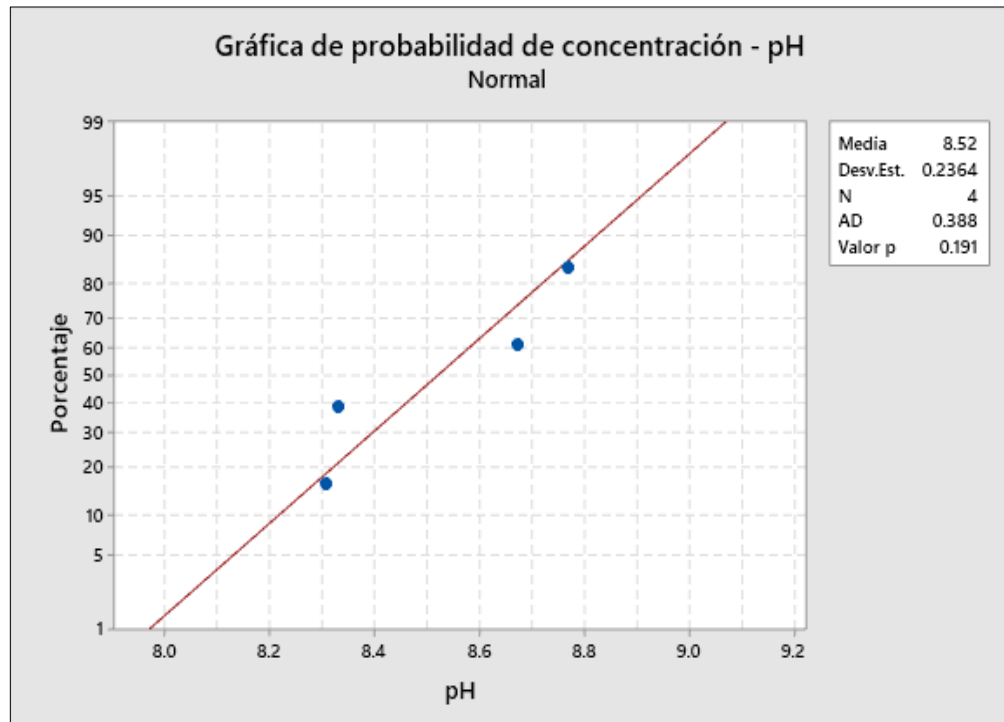
$H_0$ : Si se aplica mediante el prototipo planteado del método de electrocoagulación a escala laboratorio no reducirá eficazmente la concentración de pH en las aguas residuales del camal municipal Abancay, 2023.

$H_0: \mu \neq 7.74$

**Prueba de normalidad de datos**

## Figura 25

Normalidad de datos para pH



Nota: Elaboración propia.

Por lo tanto, en la figura 25 se determina que los datos de parámetro pH presenta distribución normal, debido que el valor p: 0.191 es  $> 0.05$ .

### Prueba de Hipótesis con T student

En esta prueba consta en rechazar o aceptar la  $H_0$ , para lo cual se debe determinar el valor P.

Entonces, si el valor  $P >$  del nivel de significancia = 0.05, entonces no se rechaza la ( $H_0$ ).

Pero si el Valor  $P <$  del nivel de significancia = 0.05, entonces se rechaza la ( $H_0$ ).

Con el Software Minitab se obtuvo lo siguiente:

**Figura 26**

Resultado de prueba T Student de datos – pH

T de una muestra: concentración -pH				
Estadísticas descriptivas				
N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Límite superior de 95% para $\mu$
4	8.520	0.236	0.118	8.798
$\mu$ : media de Concentración – pH				
Prueba				
Hipótesis nula		$H_0: \mu \neq 7.74$		
Hipótesis alterna		$H_1: \mu < 7.74$		
	Valor T	Valor p		
	6.60	0.996		

Nota: Elaboración propia.

En la hipótesis nula ( $H_0$ ) se plantea que la media poblacional ( $\mu \neq 7.74$ ), mientras que en la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) se sugiere que ( $\mu < 7.74$ ), con un valor de  $P = 0.996$ , que es mayor que el nivel de significancia establecido de 0.05 ( $P > \text{Nivel de significancia} = 0.05$ ), se concluye en rechazar la hipótesis alternativa ( $H_a$ ). En consecuencia, se acepta la hipótesis nula, indicando que los resultados del tratamiento mediante el prototipo empleado del método de EC no reducen eficazmente a la concentración inicial de 7.74 de pH.

### Prueba estadístico (Tukey) de Comparabilidad

**Tabla 23**

Prueba de comparabilidad Tukey – pH.

Factor	N	Media	Agrupación
T3	3	8.8	A
T1	3	8.7	A
T4	3	8.3	A
T2	3	8.3	A

Nota: Comparabilidad Tukey para evaluar la similitud de Medias entre tratamientos.

En la tabla, se evidencia las Medias T3, T1, T4, T2 corresponden al grupo A, indicando que no hubo diferencia significativa entre ellas. Se interpreta que las condiciones

aplicadas en los tratamientos de las agrupaciones A causaron Medias similares en cada agrupación de manera independiente. Por ende, las condiciones que se llevaron a cabo el T3, T1, T4 y T2 del grupo A permitieron propiciar Medias relativamente similares entre sí. Por otra parte, se destaca los valores de Medias de T4 y T2, las concentraciones de pH son menores que las Medias de otros T mediante el prototipo planteado del método de EC.

**Tabla 24**

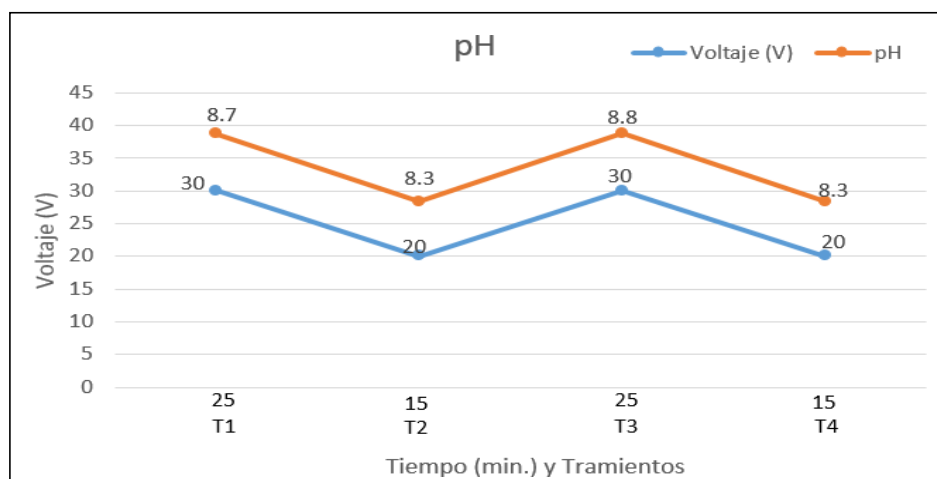
*Medición del pH - 30 y 20 voltios (V).*

Tratamientos	Promedio (pH)	Tiempo de Retención (min)	Voltaje
T1	8.7	25	30
T2	8.3	15	20
T3	8.8	25	30
T4	8.3	15	20

*Nota:* Elaboración propia

**Figura 27**

*Medición de pH a 30 y 20 V.*



*Nota:* Elaboración propia

### 5.3. Resumen de resultados de los parámetros

**Tabla 25**

*Resumen de resultados post tratamiento.*

Parámetros	Tratamientos	F1: voltaje (voltios)	F2 : tiempo (min)	Repetición 01 (mg/L)	Repetición 02 (mg/L)	Repetición 03 (mg/L)	Promedio (mg/L)	Remoción (%)
SST	T1	30	25	176.7	178.8	177.5	177.67	82.81
	T2	20	15	190.6	187.6	194.6	190.93	81.52
	T3	30	25	189.7	181.4	178.4	183.17	82.27
	T4	20	15	198.8	202.6	207.6	203.00	80.35
DQO	T1	30	25	470	479	478	475.67	92.02
	T2	20	15	534	528	515	525.67	91.18
	T3	30	25	486	495	468	483.00	91.90
	T4	20	15	545	538	524	535.67	91.01
DBO <sub>5</sub>	T1	30	25	199	203	202	201.33	95.78
	T2	20	15	215	237	217	223.00	95.32
	T3	30	25	230	232	215	225.67	94.27
	T4	20	15	245	247	227	239.67	94.98
Fósforo total	T1	30	25	9.3	13.3	12.4	11.67	74.19
	T2	20	15	14.5	14.1	10.6	13.07	71.09
	T3	30	25	13	10.4	9.4	10.93	75.81
	T4	20	15	19.3	17.4	14.5	17.07	62.24
Nitrógeno total	T1	30	25	177.15	179.35	194.27	183.59	45.77
	T2	20	15	178.61	181.36	194.45	184.81	45.42
	T3	30	25	180.47	180.23	179.36	180.02	46.83
	T4	20	15	188.46	182.62	181.45	184.18	45.60
pH	T1	30	25	7.78	9.21	9.03	8.67	0.00
	T2	20	15	8.21	8.47	8.24	8.31	0.00
	T3	30	25	9.06	8.21	9.04	8.77	0.00
	T4	20	15	8.25	8.68	8.06	8.33	0.00

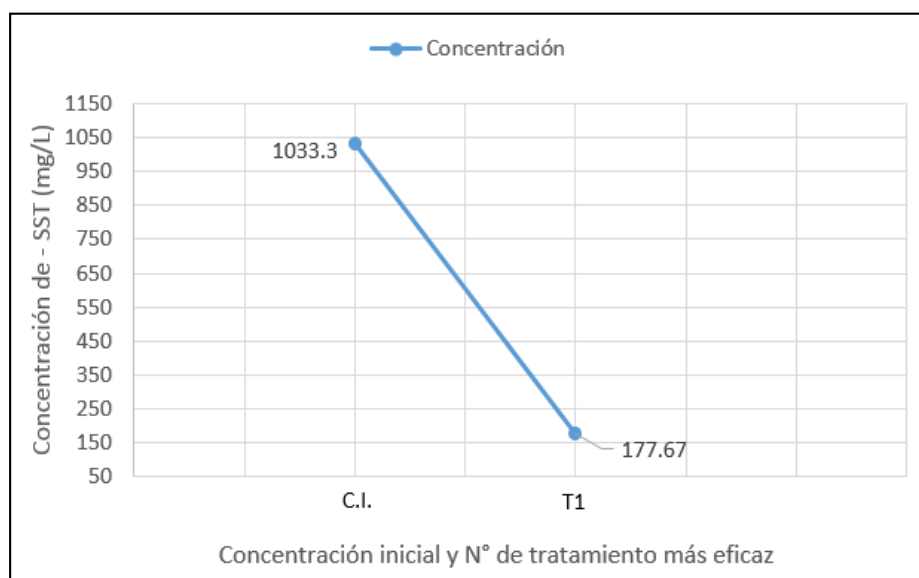
*Nota:* Resultados obtenidos de 06 parámetros evaluados, n° de tratamientos y réplicas, voltaje y tiempo aplicado, promedio de reducción en mg/l y %.

#### 5.4. Análisis comparativo pre y post tratamiento de parámetros establecidos

En consecuencia, se representan gráficamente los resultados previos y posteriores al tratamiento, destacando la eficacia superior del tratamiento T1, aplicando 30 V durante 25 minutos. Es importante señalar que este tratamiento mostró los mejores resultados para los tres parámetros evaluados: SST, DQO y DBO5. Por otra parte, se observaron resultados más destacados de remoción en el tratamiento T3 para Fósforo total y Nitrógeno total, utilizando un voltaje de 30 V y un tiempo de residencia de 25 minutos.

#### Figura 28

*Comparación pre y post tratamiento del parámetro - Sólidos suspendidos totales.*

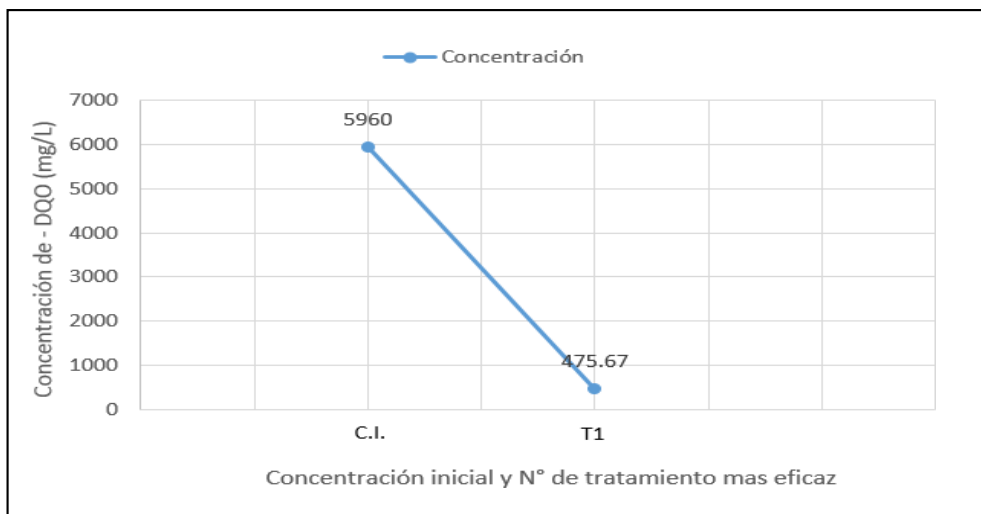


*Nota:* Elaboración propia.

La figura 28 presenta la comparación entre las concentraciones pre y post de aplicar el método de EC, con concentración inicial (CI-G0) de 1033.3 mg/l de sólidos suspendidos totales (SST). Tras el tratamiento, se observó que el T1 alcanzó una concentración de SST más baja, específicamente 177.67 mg/L, lo que implica una remoción del 82.81%.

### Figura 29

*Comparación pre y post tratamiento del parámetro - Demanda química de oxígeno.*

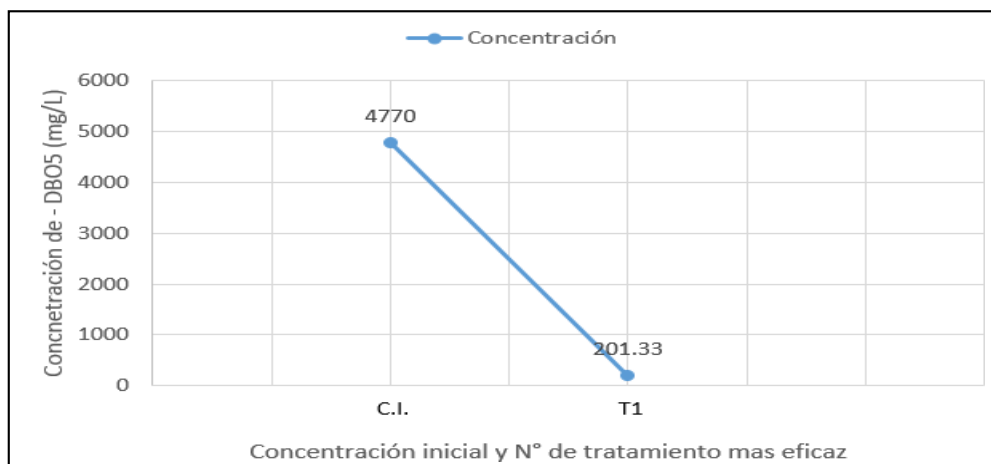


*Nota:* Elaboración propia.

La Figura 29 presenta un análisis comparativo entre las concentraciones pre y post de aplicar el método de EC, con concentración inicial (CI-G0) de DQO fue de 5960 mg/l. Posterior al tratamiento, se evidenció que el tratamiento T1 alcanzó una concentración inferior de DQO, marcando 475.67 mg/L lo que implica una remoción del 92.02%.

### Figura 30

*Comparación pre y post tratamiento del parámetro - Demanda bioquímica de oxígeno.*

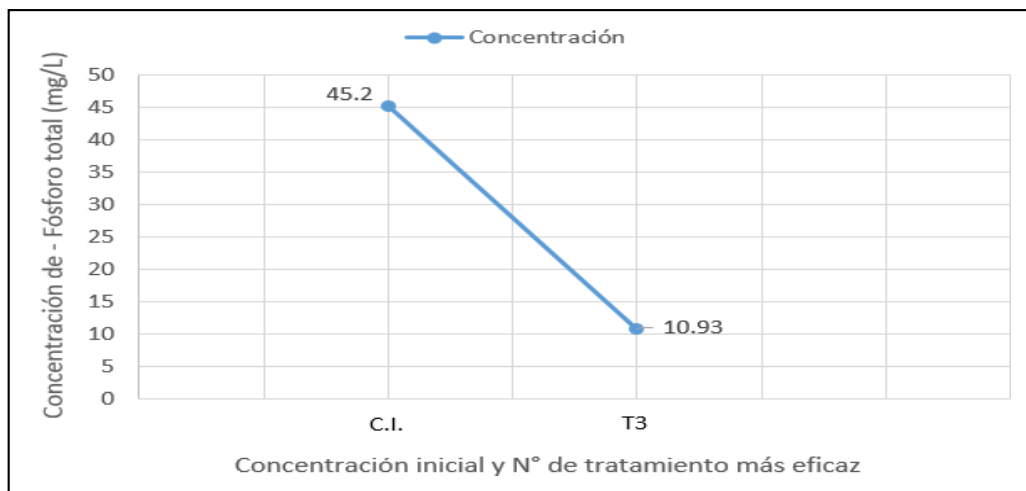


*Nota:* Elaboración propia.

En la Figura 30, presenta un análisis comparativo de concentraciones pre y post de aplicar del método de EC, con concentración inicial (CI-G0) de 4770 mg/l de DBO5. Posterior al tratamiento se observó que el T1 logró una concentración menor de DBO5, alcanzando 201.33 mg/L, lo que representa una remoción del 95.78 %.

### Figura 31

*Comparación pre y post tratamiento del parámetro - Fósforo total.*

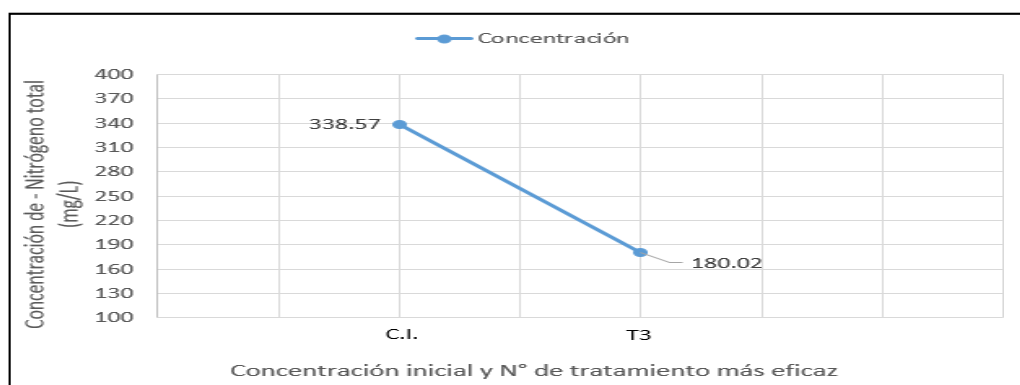


*Nota:* Elaboración propia.

En la Figura 31 presenta un análisis comparativo de concentración pre y post de aplicar el método de EC, con concentración inicial (CI-G0) de 45.2 mg/l de fosforo t. Posterior al tratamiento se observó que T3 logró una concentración menor de fósforo t. alcanzando 10.93 mg/L, lo que representa una remoción del 75.81 %.

### Figura 32

*Comparación pre y post tratamiento del parámetro - Nitrógeno total.*

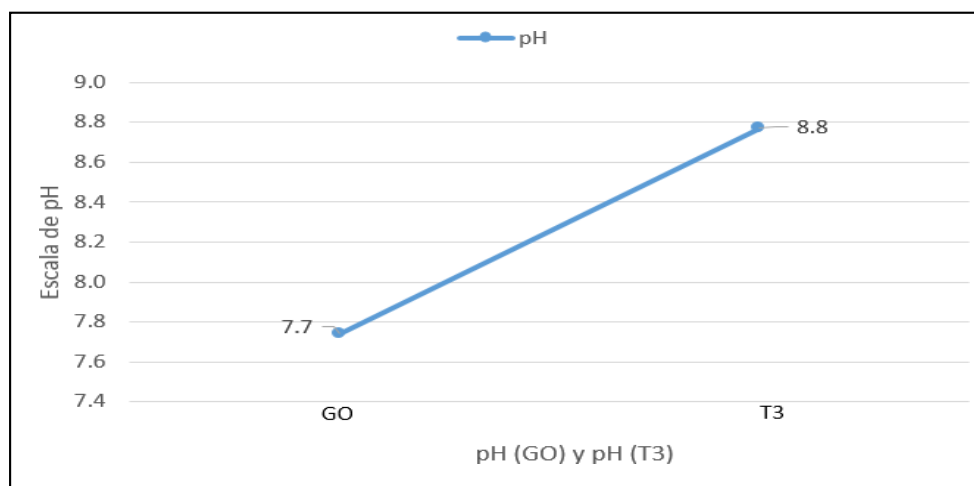


*Nota:* Elaboración propia.

La figura 33 se muestra análisis comparativo de concentraciones pre y post de aplicar el método de electrocoagulación, con concentración inicial (CI - G<sub>0</sub>) de 338.57 mg/l de nitrógeno t. Posterior al tratamiento se observó que el T3 obtuvo menor concentración de nitrógeno total que corresponde a 180.02 mg/L, lo que representa una remoción al 46.83 %.

### Figura 33

*Comparación pre y post tratamiento – pH.*



*Nota: Elaboración propia.*

La figura 33 se muestra un estudio comparativo de medición de pH antes y después de aplicar el método de electrocoagulación, dando como resultado una concentración inicial (G0) de 7.7 de pH, después del tratamiento se observó que el T3 obtuvo mayor medición de pH que corresponde a 8.8, lo que significa que hubo un aumento de concentración de iones de hidrógeno al aplicar 30 V de intensidad de corriente y en un tiempo de 25 min.

### 5.5 Consumo de energía eléctrica y electrodos

En desarrollo de análisis de consumo de energía eléctrica - DC, según el autor Guanoluiza (2013), Se utilizó la ecuación 6 para determinar el consumo:

Ecuación 6 *Fórmula para determinar el consumo de energía eléctrica.*

$$\text{Consumo de } E^{\circ} \left( \frac{kWh}{m^3} \right) = \frac{V * I * T}{V_w * 1000}$$

Donde:

V=Voltaje (V)

I= Corriente (A)

T= Tiempo de Operación (h)

V<sub>w</sub>= Volumen (m<sup>3</sup>)

$$\text{Consumo de } E^{\circ} \left( \frac{kWh}{m^3} \right) = \frac{30V * 5A * 0.42h}{0.0025 m^3} * \frac{1kW}{1000}$$

$$\text{Consumo de } E^{\circ} = 25.2 \left( \frac{kWh}{m^3} \right)$$

El desarrollo experimental involucró desde T1 a T4 donde se le aplicaron voltajes de 30 y 20 V y un tiempo de retención variables de 25 y 15 minutos respectivamente. Recordemos que el generador de fuente de corriente de AC a DC suministra una corriente de 0 a 5 A., suponiendo que ésta sea constante, habría un consumo que podríamos llamar consumo teórico, pero la corriente (amperaje) podría disminuir en función de las necesidades, por lo que significa se registrará dicho consumo específico por tratamiento establecido.

**Tabla 26**

*Consumo de energía por los tratamientos establecidos.*

Tratamientos	Consumo de energía (kWh/m <sup>3</sup> )
T1	25.2
T2	6.6
T3	25.2
T4	6.6

*Nota:* Consumos de energía según cada tratamiento aplicado.

Según el autor Demirbas y Kobya (2017), para calcular el consumo de electrodos (ánodos) de hierro y (cátodos) de aluminio, se utilizó la ecuación 7 que representa la ley de Faraday.

Ecuación 7 *Fórmula para determinar el consumo de electrodos (Fe y Al).*

$$\text{Consumo de electrodos} \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \frac{I * T}{F * V} \left( \frac{M_w, Fe}{Z, Fe} + \frac{M_w, Al}{Z, Al} \right)$$

Donde:

$I$ : Corriente eléctrica (A)

$T$ : Tiempo de EC (h)

$M_w$ : Peso molecular - Al 26.98 g/mol y Fe 55.85 g/mol

$Z$ : N° de electrodos trasferidos en reacción redox (2 - Fe y 3 - Al)

$F$ : Constante de Faraday (96500 C/mol)

$V$ : Volumen de agua a tratar ( $m^3$ )

$$C_{electrodos} = \frac{5A * 0.42h}{96500 C/mol * 0.0025m^3} \left( \frac{0.05585 Kg/mol}{2} + \frac{0.02698 Kg/mol}{3} \right)$$

$$C_{electrodos} = 3.231x10^{-4} Kg/m^3$$

Para determinar el costo de reemplazo de estos electrodos al tratar  $1 m^3$  de aguas residuales mediante EC se consultó el precio estimado del fierro como de aluminio en el mercado local a s/. 0.70/kg.

$$Costo de electrodo (Fe, Al) = 3.231x10^{-4} \frac{Kg}{m^3} * 0.70 \frac{s/}{Kg}$$

$$Costo de electrodo(Fe, Al) = 2.2617x10^{-4} \frac{s/}{m^3}$$

Para determinar el costo de consumo de energía eléctrica se tomó de referencia establecida por la Empresa Electro Sur Este S.A.A. – Abancay - Apurímac es de 0.50 s/. /kWh, con este dato se calculó consumo de energía eléctrica.

$$C_{energia eléctrica} = 25.2 \frac{kWh}{m^3} * 0.50 \frac{s/}{kWh}$$

$$C_{energia eléctrica} = 12.6 \frac{s/}{m^3}$$

**Tabla 27**

*Consumo de energía – (Electrodos, tiempo de retención, v)*

Consumo de Energía kWh/ $m^3$	Consumo de Electrodos kg/ $m^3$	Tiempo de Retención (min)	Voltaje
25.2	$3.231x10^{-4}$	25	30
6.6	$1.262x10^{-4}$	15	20

*Nota:* Resultados de consumo de electrodos en función a consumo de energía requerido según criterios de operación T y V.

## 5.6 Costo de tratamiento

En la aplicación de EC también se tuvo análisis de costos operativos, donde se tomó en cuenta el material (electrodos y energía eléctrica). Por tanto, se presenta a continuación la fórmula propuesta por el autor Demirbas y Kobya (2017):

Ecuación 8 *Fórmula para determinar - costo por tratamiento.*

$$\text{Costos Operacionales} = a C_{\text{energía}} + b C_{\text{electrodo}}$$

Donde:

a= Costo de energía (S/. /KWh)

b= Costo del Al, Fe (S/. /Kg)

$C_{\text{electrodo}}$  = Consumo de electrodo (kg/m<sup>3</sup>)

$C_{\text{energía}}$  = Consumo de energía eléctrica (kWh/m<sup>3</sup>)

### Tabla 28

*Consumo de energía, electrodos, tiempo de R. y V.*

Consumo de Energía kWh/m <sup>3</sup>	Consumo de Electrodo kg/m <sup>3</sup>	Tiempo de Retención (min)	Voltaje (V)	Costo Operacional S/./m <sup>3</sup>
25.2	$3.231 \times 10^{-4}$	25	30	12.6
6.6	$1.262 \times 10^{-4}$	15	20	3.3

*Nota:* Costo operacional de ejecución de tratamientos según criterios de operación de T, V.

## 5.7 Discusiones

En la caracterización pre tratamiento de las aguas residuales del C.M.A. se obtuvo, concentraciones de 1033.3 mg/l de sólidos suspendidos totales (SST), Vasquez (2019), quien evaluó el agua residual proveniente de un camal de bovinos, obtuvo concentraciones en 1 100 mg/L, también Cueva y Pereda (2020), quien evaluó agua residual proveniente de un camal municipal obtuvo concentraciones en 6430 mg/l, siendo mayor la concentración al estudio de investigación, este aumento podría ser atribuido a una mayor actividad productiva de beneficios, por parte de estos establecimientos lo que resultaría la descarga considerable de sus efluentes, presencia de residuos orgánicos como desechos, entre otros según sus reportes. Para demanda química de oxígeno (DQO), se obtuvo concentraciones de 5960 mg/l y DBO<sub>5</sub> de 4770 mg/l, Vasquez (2019), quien evaluó el agua residual proveniente de un camal de bovinos, obtuvo concentraciones de 16156 mg/l de DQO y DBO<sub>5</sub> de 6736 mg/l, siendo mayor la concentración al estudio de investigación, este aumento podría ser atribuido, a que se descarga mayor cantidad de sólidos en suspensión, incluyendo grasas, trozos de vísceras, y material digestivo según su reporte. Para fósforo total, se obtuvo concentraciones de 45.2 mg/l y nitrógeno total de 338.57 mg/l, Alvino (2019) quien evaluó agua residual proveniente de un matadero municipal dedicado al beneficio de animales vacunos, obtuvo concentraciones de 35.6 mg/l para fósforo total y nitrógeno total de 254.4 mg/l, siendo menor la concentración, al estudio de investigación, esta disminución podría atribuirse a que el establecimiento genera menor cantidad de efluentes provenientes de los procesos de beneficios de animales vacunos según sus reportes. Para pH, se obtuvo concentraciones de 7.74, Carhuapoma (2022), quien evaluó agua residual proveniente del camal frigorífico industrial, obtuvo un pH de 6.7, Cueva y pereda (2020), quien evaluó agua residual proveniente, de camal de beneficio de animales bovinos, obtuvo un pH de 7, y Ticona (2021), quien evaluó agua residual proveniente de camal municipal de beneficio de vacunos, porcinos entre otros obtuvo un pH de 6.6, siendo menor la concentración al estudio de investigación, esta disminución podría atribuirse a la disminución de hidrogeniones por ausencia de sales, minerales en el efluente.

Correspondiente a resultados de reducción eficaz de concentración y porcentaje óptimo de remoción de los parámetros, se precisa que el tratamiento 1 (T1), para: Sólidos suspendidos totales (SST), al emplear 30 V de corriente (DC) y tiempo de 25 minutos en la cámara de EC (electrocoagulación), presentaron reducción de concentración de 1033.3 mg/l a 177.67 mg/l, y el porcentaje óptimo de remoción de 82.81%. Vasquez (2019), al aplicar el mismo método en fluentes de Camal S.A.G.E.I.S.A., donde reporta valores superiores de reducción de concentración de 1100 mg/l a 60 mg/l y logrando una remoción del 94.55% de SST con densidad de corriente de 30 V (DC) y concentración de (NaCl) en 15 g/L y un tiempo retención de 30 minutos. La diferencia en los resultados podría atribuirse a la presencia de NaCl, tal como menciona Flores (2018), los iones de cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) pueden interactuar con los iones metálicos presentes en el agua, como el calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) y el magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), estas interacciones pueden dar lugar a la formación de sales insolubles que actúan como centros de nucleación para los sólidos suspendidos favoreciendo así la precipitación y formación de floculantes. Por otro lado, Cueva y Pereda (2020), en tratamiento de aguas residuales del camal ubicado en José Leonardo Ortiz - Chiclayo con el método EC también reporta valores superiores al estudio de investigación logrando una reducción de 6430 mg/l a 742.67 mg/l y una remoción de 88.45% de SST con amperaje de 12 A (DC) y un tiempo de 30 minutos. La diferencia en los resultados podría atribuirse, en altas intensidades de corriente (DC), incrementa el tamaño de burbujas producidas en los electrodos y/o placas, por ende, mayor es la remoción de SST.

En relación a la DQO, se precisa que el tratamiento 1 (T1), al emplear 30 V de corriente (DC) durante 25 minutos presentaron una reducción de concentración de 5960 mg/l a 475.67 mg/l y el porcentaje óptimo de remoción al 92.02%. Cueva y Pereda (2020), al tratar aguas residuales de un camal en José Leonardo Ortiz Chiclayo mediante electrocoagulación, también reportaron valores superiores al estudio de investigación logrando una reducción de 9941.50 mg/l a 483.45 mg/l y una remoción de 94.27% DQO con 12 A de amperaje (DC) y 30 minutos. La variación en los resultados podría atribuirse al aumento del tiempo y amperaje durante el tratamiento, logrando una reducción y

remoción de hasta 94.27% respecto a los valores iniciales de DQO. Del mismo modo Carhuapoma (2022), al aplicar el mismo método en efluentes de otro Camal, también reportó una reducción de concentración de 4234.4 mg/ a 232.89 mg/l y una remoción de 94.50% de DQO con 3A de densidad de corriente (DC) y 30 minutos. La diferencia en los resultados podría deberse al incremento del amperaje y tiempo, sugiriendo que se deben emplear densidades de corriente inferiores a 20-25 A para el correcto funcionamiento del proceso de EC (Chen, 2004)

Para  $DBO_5$  (Demanda bioquímica de oxígeno) se precisa que el tratamiento 1 (T1), al emplear 30 V de corriente (DC) y tiempo de 25 minutos, presentaron una reducción de concentración de 4770 mg/l a 201.33 mg/l y el porcentaje óptimo de remoción al 95.78%. Alvino (2019), en la eficiencia de la EC, tratamiento del agua residual del Matadero Municipal de Tingo María, reporta valores superiores al estudio de investigación, logrando una reducción y remoción de 96.28%, bajo las condiciones de temperatura 75 °C, 5 A de DC y tiempo de residencia 15 minutos. La diferencia en los resultados podría atribuirse a que a medida que se aumenta la temperatura presentan mayor efecto en la remoción, también según Flores (2018), indica que las proteínas debido a considerable tamaño de moléculas generan soluciones coloidales con el  $H_2O$ , estas soluciones tienen la capacidad de precipitar y formar coágulos cuando se calientan a temperaturas superiores a los 70 °C. Vasquez (2019), al aplicar el mismo método en aguas residuales de Camal (S.A.G.E.I.S.A.), donde reporta valores superiores al estudio de investigación logrando una reducción de concentración de 6736 mg/l a 188.67 mg/ y el porcentaje óptimo de remoción del 97.20% de  $DBO_5$  con una densidad de corriente de 30 V (DC), concentración de NaCl en 15 g/L y un tiempo retención de 30 minutos. La diferencia en los resultados podría atribuirse por la presencia de NaCl, según Flores (2018), la presencia de (NaCl) incrementa la conductividad del  $H_2O$  esto puede aumentar la generación de iones metálicos y dar lugar a la formación de especies oxidantes que pueden contribuir a la oxidación de compuestos orgánicos en el agua, reduciendo así la  $DBO_5$ .

En relación al fósforo total, se precisa que el tratamiento 3 (T3), al emplear 30 V de corriente (DC) durante 25 minutos, presentaron una reducción de concentración de 45.2 mg/l a 10.93 mg/l, y el porcentaje óptimo de remoción al 75.81%. Alvino (2019), al investigar la eficiencia de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales del Matadero Municipal de Tingo María, reportó valores inferiores al estudio de investigación, logrando una reducción y remoción del 63% de fósforo total a 75 °C, 5 A de intensidad de corriente (DC) y tiempo de 15 minutos. La diferencia en los resultados podría atribuirse al tiempo de residencia, según Prieto et al. (2012), ya que mayores tiempos de residencia generan más sólidos debido a la producción de gases que transportan partículas de óxido a la superficie en forma de espuma, promoviendo el crecimiento de flóculos y su precipitación. Resultados superiores fueron reportados por Camargo (2015), al estudiar la remoción de fósforo en lactosuero ácido residual mediante electrocoagulación a nivel de laboratorio. Logró una reducción de 242.22 mg/l a 39.25 mg/l y una remoción al 83.3% en 3 horas y 84.24% en 4 horas, variando el tiempo y el pH de las soluciones. La diferencia en los resultados podría atribuirse a intervalos más prolongados de tiempo de residencia en el tratamiento, generando un aumento significativo en la formación de sólidos y la producción de gases que al ascender arrastran partículas de óxido en forma de espuma, reduciendo así el fósforo total.

Para Nitrógeno total, se precisa que el tratamiento 3 (T3), al emplearon 30 V de corriente (DC) y un tiempo de 25 minutos presentaron una reducción de concentración de 338.57 mg/l a 180.02 mg/l, y el porcentaje óptimo de remoción al 46.83%. Alvino (2019), en la eficiencia de la EC de tratamiento del agua residual del Matadero Municipal de Tingo María, reporta valores superiores al estudio de investigación, logrando una remoción de 70.2% de nitrógeno total bajo las condiciones de temperatura a 75 °C, 5 A de intensidad de corriente (DC) y tiempo de 15 minutos. Cabrera (2017), reporta valores similares al poder evaluar la eficacia de remoción de contaminantes presentes en aguas residuales porcinas mediante la EC y consorcios microbianos en una granja porcina, logrando una remoción del 68.6% de nitrógeno total. La diferencia de los resultados podría atribuirse

según Alvino (2019), al calentamiento a 75 °C del afluente previo al tratamiento ya que ejercen influencia en la remoción de nitrógeno, como también la adición de consorcios microbianos ya que poseen gran potencial de biorrecuperación de efluentes contaminados.

Para pH, se precisa que el (T2 y T4) al emplear 20 V de corriente (DC) y un tiempo de 15 minutos presentaron medidas a escalas de 8.3, Carhuapoma (2022), al aplicar el mismo método en aguas residuales de Camal Privado Frigorífico Industrial Valle Verde Inversiones Trece S.A.C., donde reporta valores inferiores al estudio de investigación, con medidas de 6.9 a 8.1 pH con una densidad de corriente de 2 y 3A (DC) y un tiempo retención de 10 y 30 minutos. La diferencia de los resultados podría atribuirse según Poma y Quispe (2016), el aumento del pH durante la electrocoagulación en aguas residuales de camales municipales puede ser el resultado de la formación de hidróxidos metálicos como subproducto del proceso electroquímico y según Restrepo et al. (2006), durante el proceso de EC el pH puede aumentar en aguas residuales ácidas debido a la generación de hidrógeno molecular en el cátodo, por otro lado en aguas residuales alcalinas el pH puede disminuir y la eficiencia del proceso puede depender de la naturaleza del contaminante según investigaciones anteriores.

Finalmente se precisa que, el T1 y T3 con criterios operacionales de voltaje, y tiempo de retención en 30 V, 25 min respectivamente, tuvo un consumo de energía de 25.2 kWh/m<sup>3</sup>, y consumo de electrodos en 3.23x10<sup>-4</sup> kg/m<sup>3</sup>, y un costo operacional de 12.6 s./m<sup>3</sup>, el T2 y T4 con criterios operacionales de voltaje, y tiempo de retención de 20 V, 15 min respectivamente, tuvo un consumo de energía de 6.6 kWh/m<sup>3</sup>, y consumo de electrodos en 1.262x10<sup>-4</sup> kg/m<sup>3</sup>, y un costo operacional de 3.3 s./m<sup>3</sup>, por ende, el criterio de tiempo de operación favorece al incremento de consumo de energía, por lo que es directamente proporcional al aumento por costos de operación según cada tratamiento realizado.

## VI. Conclusiones

- ✓ La aplicación del método de EC (electrocoagulación) a escala laboratorio permitió caracterizar y reducir de manera efectiva los parámetros fisicoquímicos, alcanzando un óptimo de remoción de los contaminantes analizados de las aguas residuales del camal municipal Abancay.
- ✓ Resultados analizados de la caracterización pre tratamiento de los parámetros fueron: Sólidos suspendidos totales (SST) 1033.3 mg/l, demanda química de oxígeno (DQO), 5960 mg/l, demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) 4770 mg/l, fósforo total 45.2 mg/l, nitrógeno total, 338.57 mg/l y pH de 7.74 respectivamente, se precisó que son elevados en comparación de las normativas establecidos, (VMA) D.S N° 010- 2019 - VIVIENDA y (LMP) propuesta en 2009 MINAM.
- ✓ Al aplicar el prototipo planteado del método de EC (electrocoagulación) a escala laboratorio se logró reducir eficazmente la concentración de: SST (1033.3 mg/l a 177.67 mg/l), DQO (5960 mg/l a 475.67 mg/l), DBO<sub>5</sub> (4770 mg/l a 201.33 mg/l) respectivamente, excepto a pH (7.74 a 8.03) siendo el tratamiento 1 (T1) con mayor eficaz con un voltaje de 30 V y un tiempo de retención de 25 min, para fosforo total (45.2 mg/l a 10.93 mg/l), nitrógeno total (338.57 mg/l a 180.02 mg/l), respectivamente siendo el tratamiento 3 (T3) el más eficaz con un voltaje de 30 V y un tiempo de retención de 25 min.
- ✓ Se obtuvo el porcentaje óptimo de remoción al aplicar el prototipo planteado del método de electrocoagulación siendo el Tratamiento 1 (T1) en 82.81% de sólidos suspendidos totales (SST), 92.02 % de demanda química de oxígeno (DQO) y un 95.78 % de demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y el tratamiento 3 (T3) en 75.81% de fósforo total, 46.83% de nitrógeno total,

demostrando así la eficiencia del prototipo planteado del método de electrocoagulación para su remoción de estos parámetros.

## VII. Recomendaciones

- ✓ En las muestras realizadas del efluente después de cada tratamiento con el método de electrocoagulación se recomienda agregar ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) concentrado a  $pH < 2$  para preservar las propiedades fisicoquímicas con finalidad de obtener reportes mucho más precisos respecto a los diferentes parámetros evaluados.
- ✓ Se sugiere establecer una planta piloto con el fin de examinar la eficacia del método de EC en tratamientos de aguas residuales con mayores volúmenes para mejorar el proceso dado que el trabajo de investigación se realizó a cabo a escala de laboratorio.
- ✓ En la aplicación del prototipo planteado del método, se recomienda realizar pruebas en diferentes distancias entre los electrodos e intensidades distintas de corriente (DC) para obtener resultados más eficientes.
- ✓ En los ensayos de laboratorio se empleó fierro y aluminio como materiales para los electrodos, se recomienda llevar a cabo pruebas adicionales utilizando materiales diferentes, como acero inoxidable, cobre, entre otros.

## VIII. Referencias

- Arango, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Rev. Lasallista de Investigación. Antioquia, Colombia. Vol. 2, N° 1. p. 48-60.
- Aguilar, E. (2015). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua (para optar el grado académico de magíster en ciencias ambientales con mención en control de la contaminación y ordenamiento ambiental). Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- 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. 107p.
- Alvino, A. (2019). Eficiencia de la electrocoagulación a nivel de laboratorio para tratamiento del agua residual del Matadero Municipal Tingo María [Tesis para optar el título de ingeniero ambiental, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unas.edu.pe/>
- Barrenechea, A. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida. Manual I, Capítulo 1-4, CEPIS, Lima.
- Barajas, M. (2002), Tesis Doctoral: Eliminación Biológica de nutrientes en un reactor biológico secuencial. Caracterización y estimulación de las fuentes de carbono del agua residual urbana. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 325p.
- Becerra, G. (2014). Niveles de contaminación en los efluentes provenientes de camales de la región La Libertad. Artículo original. Universidad nacional de Trujillo – Perú. Cowi y Unep. (2000). Cleaner Production Assessment in Meat Processing. 84p.
- Cueva, T. y Pereda, V. (2020). *Efecto del amperaje y tiempo del proceso de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales del camal de José Leonardo Ortíz, 2020* [Tesis de titulación, Universidad Nacional PedroRuizGallo].Repositorioinstitucional.[https://hdl.handle.net/20.500.12893/8688\\_](https://hdl.handle.net/20.500.12893/8688_)
- Chavez, A., Cristancho, D., Ospina, E. (2009). Una alternativa limpia para el tratamiento de aguas residuales galvanizas: Rev. Vol. 5 N° 14. Ingenierías. Medellin, Colombia. p. 40 – 50.
- Chavez, R. y Robles, J. (2019). *Reaprovechamiento de aguas residuales de la industria de embutidos, mediante la electrocoagulación, para el riego de áreas verdes, Villa El Salvador, 2019* [Tesis para optar el título de ingeniero ambiental, UniversidadCesarVallejo].Repositorio.<https://repositorio.ucv.edu.pe/>
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology 38. p. 11-41.
- Chen, G.; Chen, X.; and Yue, P. L. (2000). Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater. In:Journal of environmental engineering. Vol. 126, No. 9,858-863.
- Contreras, E., Chang, M., & Yupari, G. (2017). Aprende a prevenir los efectos del

mercurio módulo 3: agua y alimento, 44. Recuperado de <https://bit.ly/2Cvg2sY>

- Cobo, C. (2019). “*Recuperación de cromo III mediante los métodos de electrocoagulación y precipitación en la Empresa Tenería Díaz*” [Proyecto de investigación para optar el grado académico de Ingeniería Química, Escuela Superior Politécnica Chimborazo]. Repositorio, <http://dspace.esoch.edu.ec/>
- Collazos, C. (2008). Tratamiento de Aguas Residuales - Generalidades. Recuperado el 1 de Julio de 2012, de Universidad Nacional de Colombia: ([http://www.ing.unal.edu.co/catedra/drs\\_diaz\\_collazos](http://www.ing.unal.edu.co/catedra/drs_diaz_collazos)).
- Cruz, C. y Mendoza, R. (2022). “Efectividad del tratamiento electroquímico en aguas residuales provenientes de una planta procesadora de plátanos y de una Industria Agroquímica en Guayaquil” [Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, Universidad Guayaquil]. Repositorio, <http://www.ug.edu.ec/>
- Cortada, A. (2003). Aplicación de microorganismos de acción dirigida al tratamiento de aguas residuales industriales. La Habana, Cuba.
- Camargo, C. (2015). Remoción de Fósforo del Lactosuero Ácido Residual Mediante el Proceso de Electrocoagulación a Nivel de Laboratorio. Tesis. Ing. Ambiental. Junín, Perú.
- Cabrera, A. (2017). Tratamiento de las aguas residuales porcinas mediante la electrocoagulación y consorcios microbianos, en la Granja Porcina Municipales. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- Carhuapoma, N. (2022). Tratamiento de las aguas residuales del camal privado Frigorífico Industrial Valle Verde Inversiones Trece S.A.C. mediante procesos electroquímicos [Tesis para optar el título de ingeniero ambiental, Universidad Nacional José Fausto Sánchez Carrión]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/>
- Demirbas, E., & Kobya, M. (2017). Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. *Process Safety and Environmental Protection*, 105, 79–90. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.013>
- Echarri, L. (2007). Población, ecología y ambiente. 1ra Edición. Madrid – España.
- Flores, T. (2018). Efecto de la dosificación de cloruro de sodio en el proceso de tratamiento de aguas residuales domesticas por electrocoagulación [Tesis para optar el título de ingeniero químico, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unprg.edu.pe/>
- Gilpavas, E., Dario, E., Sierra, L., White, C., Oviedo, C., Restrepo, P. (2008). Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. GIPAB. Medellin, Colombia. Universidad EAFIT. 74p.
- Guanoluiza, LI. (2013). Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con y sin irradiación de electrones acelerados [Tesis Pregrado de la Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería/Química/Agroindustria,

Ecuador].Repositorioinstitucional.<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7062>

- Holt, P.; Barton, G.; Mitchel, C. (2005). The future electrocoagulation as a water treatment technology. *Chemosphere*, Vol. 59, No. 3, p. 358.
- Hernandez, A. (2007). Saneamiento y alcantarillado. Vertidos residuales, 7ma edicion, Madrid, colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos.
- Hernández, S., Fernández, C., & Baptista, L. (2014). Selección de la muestra (Capítulo8). Recuperado de: [http://sined.uaem.mx:8080/bitstream/handle/123456789/2776/506\\_6.pdf?sequence=1](http://sined.uaem.mx:8080/bitstream/handle/123456789/2776/506_6.pdf?sequence=1)
- 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. 136p.
- Koparal, A. S. and Ogutveren, U. B. (2002). Removal of nitrate from water b electroreduction and electrocoagulation. In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 89, No. 1, 83–94.
- 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, p. 29 - 41.
- Morales, V. (2023). “Reducción de contaminantes (Cromo, DBO, DQO) por electrolisis en las curtiembres de la Provincia de Tungurahua” [Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Gestión Ambiental con Mención en Desarrollo Sostenible, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio, <http://https://repositorio.utc.edu.ec/>
- Miranda, J. (2006). Tratamiento analítico de las aguas servidas, Universidad de Chile. Disponible en <http://cabierta.uchile.cl/revista/6/aguas.htm>.
- Mara, (1976). Incorporating all amendments up to 1 January 2006. Published By. The Commissioner Of Law Revision, Malaysia.
- Marin, A. (2013). Operación y mantenimiento de plantas de tratamientos de aguas residuales con el proceso de lodos activados. 1ra Edición. Pág. 88 - 94.
- Miron, A. (1978). Riesgo biológico, prevención en mataderos, instituto Nacional de Higiene. Madrid – España.
- Muñoz, D. (2005). Sistema de tratamiento de aguas residuales de matadero: Para una población menor 2000 habitantes. Facultad de Ciencias Agropecuarias; p.87-98.
- Moreno, J. (1997). Tratamiento de aguas residuales y su reutilización en el riego de los cultivos agrícolas de Ciudad de la Habana. I Seminario Aguas Residuales.
- Martinez, F. (2007). *Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. Tesis Dr. Ing. Química. Ciudad Real, España. Universidad de Castilla la Mancha. 259p.
- Norma Oficial Mexicana. (1996). Norma Oficial Mexicana para Límites Máximos Permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y

bienes nacionales, Pub. L. No. Nom-001-Semarnat-1996. Recuperado de <https://bit.ly/2znuNyM>

- Nemerov, N. (1998). Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. Ediciones Diaz Santos. Madrid – España.
- Nasrullah, M., Singh, L., Krishnan, S., Sakinah, M., & Zularisam, A. W. (2018). Electrode design for electrochemical cell to treat palm oil mill effluent by electrocoagulation process. *Environmental Technology & Innovation*, 9, 323–341. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.10.001>
- OMS. (2006). *Directrices para la calidad del agua potable*. Volumen 2. Criterios de salud Y otra información de apoyo. Segunda edición. Ginebra.
- Orellana, J. (2005). Tratamiento de las aguas, calidad de aguas – necesidad de tratamiento. Ingeniería Sanitaria, Universidad tecnológica Nacional, UTN – FRRO. Argentina.
- Orozco, A. (2005). Bioingeniería de aguas residuales; teoría y diseño. Acodal. 3ra ed. Bogotá, Colombia. 412 p.
- Olivera, C. (2019). “*Tratamiento de Aguas Residuales de la industria mediante la Electrocoagulación*” [Proyecto de grado para optar el grado académico de licenciatura, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio, <https://repositorio.umsa.bo/>.
- Poma J. y Quispe, S. (2016). “*Remoción de Contaminantes de Aguas Residuales Urbanas por el Método de Electrocoagulación*” [Tesis para optar el título profesional de Ing. Químico, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3757>.
- Pedroza, A. (2016). Remoción de color en aguas residuales procedentes de la industria textil mediante electrocoagulación para su posible reutilización. Universidad Autónoma Guerrero, México. Recuperado de <https://bit.ly/2NxEFyu>.
- 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. p. 51-77.
- Quispe, Q. (2021). “*Diseño de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales para Reducir el Impacto Ambiental en la Empresa Multiservicios Astolingón SAC*” [Tesis para optar el título profesional de Ing. Industrial, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/4057>.
- Rigola, M. (1990). Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales. Editorial Marcombo. Barcelona – España. Pág. 28
- Ramalho, R. (1996). Tratamiento de aguas residuales. 2da ed. Barcelona. Editorial reverté, S.A. p. 707-715.
- Ramirez, S. (2013). Remoción de cromo hexavalente por medio de la electrocoagulación. Tesis Ing. Ambiental. Querétaro, España. Universidad Tecnológica de Querétaro. 52p.
- Restrepo, A., Arango, A., Garcés, L. (2006). La Electrocoagulación: retos y

oportunidades en el tratamiento de aguas. Vol. 1 N° 2. Antioquia, Colombia. p. 58-77.

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. 62p.

Siqueiros, A. (2004). Aplicación de la Metodología de Superficies de Respuesta para el Mejoramiento de la Calidad del Aceite de Soya. Universidad de Sonora, México. Recuperado de <https://bit.ly/2MDI7sP>.

Sanchez, J. y Villaverde, Y. (2020). "Sistema de Lodos Activados en la Calidad de Efluentes del Camal Municipal de El Porvenir" [Tesis para optar el título profesional de Ing. Ambiental, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/11537/23958>.

Torres, K. y Guitierrez, M (2017). Estado del arte de las tecnologías más utilizadas en las refinерías de América para el tratamiento de aguas residuales. Universidad de San Buenaventura, Colombia. Recuperado de <https://bit.ly/2Hr4QTq>.

Tenelema, V. (2019). "Diseño de un electrocoagulador para el tratamiento de aguas residuales de la Industria Láctea Familac del Cantón Chambo" [Trabajo de titulación para optar el grado de Ingeniero Químico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio, <http://dspace.esoch.edu.e/>

Villaseñor, J. (1998). Eliminación biológica de nitrógeno en aguas residuales urbanas. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Química. España.

Vasquez, A. (2019). *"Aplicación del Sistema de Electrocoagulación a Nivel de Laboratorio con Electroodos de Aluminio y Fierro para la Reducción de los Parámetros Fisicoquímicos de las Aguas Residuales del Camal S.A.G.E.I.S.A. en el Año 2018"* [Tesis para optar el título profesional de Ing. Ambiental, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional. [repositorioinstitucional@upn.edu.pe](mailto:repositorioinstitucional@upn.edu.pe).

Yavuz, Y., & Ögütveren, ü. B. (2018). Treatment of industrial estate wastewater by the application of electrocoagulation process using iron electrodes. *Journal of Environmental Management*, 207, 151–158. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.034>.

## **IX. ANEXOS**

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes