

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE
RECURSOS NATURALES



**“EFECTO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN CON
ELECTRODOS MÓVILES PARA LA REMOCIÓN DE
CONTAMINANTES EN AGUAS EUTROFIZADAS DE LA
LAGUNA PATARCOCHA, PASCO, 2024”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES**

Jessica Alessandra Navarrete Asian

Ysmael Narciso Timaná Castillo

Giancarlo Luis Ramirez Inoñan

Asesor: Alex Willy Pilco Nuñez

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL AMBIENTE

Callao, 2024

PERÚ



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

VIII CICLO TALLER DE TESIS



ANEXO 3

ACTA N° 013-2024 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

LIBRO 01 FOLIO No. 184 ACTA N°013-2024 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

A los 16 días del mes de junio del año 2024, siendo las 14:00 horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** para la obtención del **TÍTULO Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales** de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

Ms.C.	María Teresa Valderrama Rojas	: Presidente
Mg.	Luis Enrique Lozano Vиейtes	: Secretario
Mtra.	Janet Mamani Ramos	: Vocal
Mg.	Alex Willy Pilco Núñez	: Asesor

Con el quórum reglamentario de ley, de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente, y habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, se dio inicio al acto de sustentación de la tesis, de los bachilleres Jessica Alessandra Navarrete Asian, Ysmael Narciso Timana Castillo y Giancarlo Luis Ramirez Inoñan, titulada: **"EFECTO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS MÓVILES PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS EUTROFIZADAS DE LA LAGUNA PATARCOCHA, PASCO, 2024"**, cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera presencial en el auditorio de la Facultad;

Luego de la exposición, la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, el jurado acordó: Dar por **APROBADO** la presente tesis, con la escala de calificación cualitativa **BUENO** y calificación cuantitativa **QUINCE (15)**, conforme a lo dispuesto en el Art. 24 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 150-2023-CU del 15 de junio de 2023.

Se dio por cerrada la Sesión a las 14:50 horas del día domingo 16 de junio del año en curso.

Presidente
Ms.C. María Teresa Valderrama Rojas

Secretario
Mg. Luis Enrique Lozano Vиейtes

Vocal
Mtra. Janet Mamani Ramos

Asesor
Mg. Alex Willy Pilco Núñez

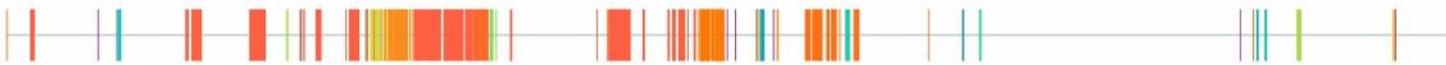


1A; NAVARRETE ASIAN-Jessica Alessandra; TIMANÁ CASTILLO-Ysmael Narciso; RAMÍREZ INOÑAN-Giancarlo Luis; TESIS CON CT.



Nombre del documento: 1A; NAVARRETE ASIAN-Jessica Alessandra; TIMANÁ CASTILLO-Ysmael Narciso; RAMÍREZ INOÑAN-Giancarlo Luis; TESIS CON CT..pdf ID del documento: b1d0ba12b11f286d9a687d931391fe9cd497f0d7 Tamaño del documento original: 2.2 MB	Depositante: FIARN PREGRADO UNIDAD DE INVESTIGACION Fecha de depósito: 11/6/2024 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 11/6/2024	Número de palabras: 19.231 Número de caracteres: 125.924
--	--	---

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes de similitudes

Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.unac.edu.pe https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/8160/TESIS - ARROYO - RAMOS.pdf?.. 6 fuentes similares	11%		Palabras idénticas: 11% (2133 palabras)
2	repositorio.upn.edu.pe https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/31248/Tesis.pdf?sequence=2	3%		Palabras idénticas: 3% (610 palabras)
3	1A_HINOSTROZA ANTONIO; EDILBERTO_TESIS DE MAESTRIA.pdf 1A_HIN... #2ac2e0 El documento proviene de mi biblioteca de referencias 2 fuentes similares	3%		Palabras idénticas: 3% (522 palabras)
4	estrucplan.com.ar La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de ... https://estrucplan.com.ar/la-electrocoagulacion-una-alternativa-para-el-tratamiento-de-aguas-resid... 9 fuentes similares	2%		Palabras idénticas: 2% (325 palabras)
5	repositorio.uap.edu.pe https://repositorio.uap.edu.pe/xmlui/bitstream/20.500.12990/1067/1/Tesis_Recuperación Fósforo_L... 9 fuentes similares	2%		Palabras idénticas: 2% (327 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.upn.edu.pe Evaluación de parámetros de operación de un equipo de ... https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/27731	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (36 palabras)
2	Documento de otro usuario #dfaec El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (20 palabras)
3	TESIS FINAL - ASMA MONTESINOS-DIAZ CABRERA.pdf TESIS FINAL - AS... #75bf82 El documento proviene de mi grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (23 palabras)
4	repositorio.unu.edu.pe http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4290/UNU_AMBIENTAL_2020_T_ZUELY-VILLAC...	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (20 palabras)
5	Documento de otro usuario #fa8764 El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (17 palabras)

Fuente mencionada (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1	https://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2016/PueblosAndinosEcologia/f
---	---

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

MIEMBROS DEL JURADO EVALUADOR

Presidente: MsC. María Teresa Valderrama Rojas

Secretario: Mg. Luis Enrique Lozano Vieytes

Vocal: Mtra. Janet Mamani Ramos

Asesor: Mg. Alex Willy Pilco Nuñez

Nº DE LIBRO: 01

Nº DE FOLIO: 184

Nº DE ACTA: 013-2024

FECHA DE APROBACION DE TESIS: 16 DE JUNIO, 2024

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD: Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN: Unidad de investigación de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales.

TÍTULO: Efecto del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles para la remoción de contaminantes en aguas eutrofizadas de la laguna Patarcocha, Pasco, 2024.

AUTOR (es):

Jessica Alessandra Navarrete Asian / CODIGO ORCID: 0009-0001-9850-3743/ DNI: 71957087

Ysmael Narciso Timaná Castillo, CODIGO ORCID: 0009-0001-4635-8003/ DNI: 44138980

Giancarlo Luis Ramirez Inoñan, CODIGO ORCID: 0009-0001-1142-5827/DNI: 45337160

ASESOR(A): Alex Willy Pilco Nuñez; CODIGO ORCID: 0000-0002-3911-6428; DNI: 10291118

LUGAR DE EJECUCIÓN: Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao.

UNIDAD DE ANÁLISIS: Las aguas eutrofizadas de la Laguna Patarcocha, Pasco.

TIPO/ ENFOQUE / DISEÑO

Aplicada/Cuantitativo/ Experimental

TEMA OCDE: 1.05.08 -- Ciencias del Medio Ambiente.

DEDICATORIA

A nuestros queridos padres, quienes con su amor incondicional y apoyo inquebrantable nos han guiado a lo largo de este camino. A nuestros estimados docentes, cuya sabiduría y aliento nos han inspirado a alcanzar nuestras metas académicas. A nuestras amistades, cuyo constante apoyo y ánimo nos han fortalecido en cada paso del camino. A todos ustedes, que siempre creyeron en nosotros y nos alentaron a perseguir nuestros sueños con valentía y determinación

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestra más sincera gratitud a nuestros padres, cuyo sacrificio y dedicación han sido la fuerza motriz detrás de nuestro éxito. A nuestros profesores, por su paciencia, guía y enseñanzas que han moldeado nuestro pensamiento crítico y nos han preparado para enfrentar los desafíos del mundo académico y profesional. A nuestros amigos, por su constante apoyo moral y por ser nuestra fuente de inspiración.

Sin su apoyo inquebrantable, este logro no habría sido posible. Cada palabra de aliento, cada gesto de confianza, ha sido el impulso que necesitábamos para perseverar en los momentos difíciles y celebrar en los triunfos. A todos ustedes, les dedicamos este logro.

ÍNDICE

RESUMEN	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN	16
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.1. Descripción de la realidad problemática	17
1.2. Formulación del problema	20
1.3. Objetivos	21
1.4. Justificación.....	21
1.5. Delimitantes de la investigación	24
II. MARCO TEÓRICO.....	26
2.1. Antecedentes.....	26
2.2. Bases teóricas	36
2.3. Marco conceptual	55
2.4. Definición de términos básicos.....	58
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	60
3.1. Hipótesis	60
IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	62
4.1. Diseño metodológico	62
4.2. Método de investigación.....	62
4.3. Población y muestra	70
4.4. Lugar de estudio	72
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información ..	73
4.6. Análisis y procesamiento de datos.....	75

4.7. Aspectos éticos de la investigación.....	75
V. RESULTADOS.....	76
5.1. Resultados descriptivos.....	76
5.2. Resultados inferenciales	94
5.3. Otro tipo de resultados estadísticos, de acuerdo a la naturaleza del problema y la Hipótesis	108
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	108
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados 108	
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares. ..	110
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes .	115
VII. CONCLUSIONES	116
VIII. RECOMENDACIONES.....	118
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	119
ANEXOS	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de grupos de algas	46
Tabla 2 Operacionalización de las Variables.....	61
Tabla 3 Parámetros iniciales a considerar.....	63
Tabla 4 Cálculos del área superficial de los electrodos	64
Tabla 5 Factores y niveles del diseño experimental.....	68
Tabla 6 Matriz del diseño factorial completo.....	68
Tabla 7 Métodos analíticos para la determinación de los indicadores	74
Tabla 8. Caracterización físico-química del Agua Superficial	76
Tabla 9. Resultados de la dosificación pH y dosis de hierro	77
Tabla 10. Resultados de los tratamientos	78
Tabla 11. Resultados descriptivos.....	79
Tabla 12. Análisis ANOVA modelo lineal para la Turbidez	102
Tabla 13 Análisis R^2 , R^2_{pred} y R^2_{adj}	102
Tabla 14. Análisis ANOVA modelo lineal para el pH.....	103
Tabla 15 Análisis R^2 , R^2_{pred} y R^2_{adj}	104
Tabla 16. Análisis ANOVA modelo lineal para el Conductividad	105
Tabla 17 Análisis R^2 , R^2_{pred} y R^2_{adj}	106
Tabla 18	107
Tabla 19	107
Tabla 20 Matriz de consistencia.....	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Turbidez en diferentes muestras de agua.....	37
Figura 2	Escala del pH.....	39
Figura 3	Eutrofización, el proceso de envejecimiento por sucesión ecológica	42
Figura 4	Imagen microscópica de diversidades de algas	44
Figura 5	Sistema de electrocoagulación para remoción de algas.....	48
Figura 6	Representación esquemática de los mecanismos de (a) electrocoagulación	50
Figura 7	Impacto de la densidad de corriente en el proceso de electrocoagulación	54
Figura 8	Distribución y arreglo de electrodos en electrocoagulación.....	55
Figura 9	Imagen referencial del movimiento giratorio del electrodo.....	66
Figura 10	Representación del reactor de electrocoagulación batch	67
Figura 11	Fotografía de la Laguna Patarcocha	72
Figura 12	Mapa de ubicación de la Laguna Patarcocha en la región Pasco	73
Figura 13	Efecto de la concentración de Fe_2SO_4 , tiempo y voltaje sobre la turbidez	80
Figura 14	Interacción del voltaje y la concentración de Fe_2SO_4 en la remoción de turbidez	81
Figura 15	Interacción concentración de Fe_2SO_4 y voltaje en la remoción de turbidez	83
Figura 16	Interacción voltaje y tiempo en la remoción de turbidez	84
Figura 17	Interacción tiempo y voltaje en la remoción de turbidez	84
Figura 18	Interacción del tiempo y la concentración de Fe_2SO_4 en el pH85	
Figura 19	Interacción del voltaje y la concentración de $FeSO_4$ en el pH 86	

Figura 20 Interacción de la concentración Fe_2SO_4 sobre el voltaje.....	88
Figura 21 Interacción del voltaje y tiempo en el pH.....	88
Figura 22 Efecto de la concentración de Fe_2SO_4 en la conductividad.....	89
Figura 23 Efecto del tiempo en la conductividad.....	90
Figura 24 Efecto del voltaje en la conductividad	91
Figura 25 Interacción del tiempo y la concentración de Fe_2SO_4 en la conductividad	92
Figura 26 Interacción del tiempo y la concentración de Fe_2SO_4 en la conductividad	92
Figura 27 Efecto de la concentración de Fe_2SO_4 tiempo y voltaje en la energía consumida	94
Figura 28 Probabilidad normal vs los Residuales externamente estandarizado en la turbidez.....	96
Figura 29 Probabilidad normal vs los Residuales externamente estandarizado en el pH.....	96
Figura 30 Probabilidad normal vs los Residuales externamente estandarizado en la conductividad.	97
Figura 31 Probabilidad normal vs los Residuales externamente estandarizado en la energía consumida.....	97
Figura 32 Los residuales externamente estudentizados vs los valores predichos en la turbidez.....	99
Figura 33 Los residuales externamente estudentizados vs los valores predichos en el pH.....	99
Figura 34 Los residuales externamente estudentizados vs los valores predichos en la conductividad.....	100
Figura 35 Los residuales externamente estudentizados vs los valores predichos en la energía consumida.....	101

ÍNDICE DE ABREVIATURA

- AFM: Microscopía de fuerza atómica
- ANA: Autoridad Nacional del Agua
- CE: Conductividad eléctrica
- D: Dimensión
- DBO: Demanda bioquímica de oxígeno
- DEP: Dielectroforética
- DQO: Demanda Química de Oxígeno
- EC: Electrocoagulación
- ECA: Estándares de Calidad Ambiental
- ECEF: electrocoagulación-electroflotación
- ECF: Electrocoagulación-flotación
- EM: Microorganismos eficaces
- F: Hierro
- FTIR: Espectroscopia infrarroja transformada de Fourier
- I: Indicadores
- ICA: Índice de calidad de agua
- MINAM: Ministerio del Ambiente
- N: Nitrógeno
- OD: Oxígeno disuelto
- P: Fósforo
- PFV: Panel fotovoltaico
- pH: Potencial de hidrógeno

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar la influencia del sistema electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de contaminantes en aguas eutrofizadas de la laguna Patarcocha, Pasco. Se logró determinar la influencia del voltaje, el tiempo de operación, la concentración de sulfato de hierro como procesos del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas. La metodología fue el diseño y puesta en marcha de un novedoso electrocoagulador con electrodos móviles, se usó un diseño experimental Box-Benkhen con 15 tratamientos, donde se manipulo el voltaje (10 a 30 voltios) y la concentración de sulfato de hierro (500 a 1000 ppm) tiempo de electrocgulación (30 a 90 segundos). Los resultados descriptivos demostraron un porcentaje máximo de remoción de turbidez del 95.74%, una eficiencia máxima de reducción de conductividad del 84.76%, un pH promedio de 6.07 y un consumo mínimo de energía de 1.00 kW/s. Los resultados inferenciales muestran que voltaje, la concentración de sulfato de hierro y el tiempo de electrocgulación tienen un efecto significativo, sobre la turbidez, energía consumida, pH y la conductividad de la agua tratada.

Palabras clave: *Laguna, eutrofización, electrocoagulación, sulfato de hierro.*

ABSTRACT

The objective of this research work was to determine the influence of the electrocoagulation system with mobile electrodes on the removal of contaminants in eutrophicated waters of the Patarcocha lagoon, Pasco. It was possible to determine the influence of voltage, operation time, and iron sulfate concentration as processes of the electrocoagulation system with mobile electrodes in the removal of contaminants in eutrophicated waters. The methodology was the design and implementation of a novel electrocoagulator with mobile electrodes, a Box-Benken experimental design was used with 15 treatments, where the voltage (10 to 30 volts) and the concentration of iron sulfate (500 to 3000 ppm) were manipulated. Electrocoagulation time (30 to 90 seconds). The descriptive results demonstrated a maximum turbidity removal percentage of 95.74%, a maximum conductivity reduction efficiency of 84.76%, an average pH of 6.07 and a minimum energy consumption of 1.00 kw/s. The inferential results show that voltage, iron sulfate concentration and electrocoagulation time have a significant effect on the turbidity, energy consumed, pH and conductivity of the treated water.

Keywords: *Lagoon, eutrophication, electrocoagulation, iron sulfate.*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, una parte significativa de la población mundial no cuenta con acceso a servicios de saneamiento de agua adecuados. El constante incremento de la densidad poblacional en las áreas urbanas demanda una distribución sostenible de agua potable para todos, lo que subraya la necesidad de una planificación hidrológica armoniosa y sinérgica (Molina y Villegas, 2015). La eutrofización de los lagos y sus impactos en los ecosistemas naturales concluye que la contaminación de estos cuerpos de agua acelera la desaparición parcial o total de especies en los sistemas acuáticos.

Además, La laguna Conococha, ubicada en la cordillera de los Andes en la Región Ancash, Perú, a una altitud de 4050 msnm, está siendo afectada por actividades ganaderas y poblacionales que aceleran su envejecimiento debido a la eutrofización. Es por ello que se están aplicando metodologías específicas en seis puntos de monitoreo, considerando factores como efluentes y fuentes contaminantes en épocas de estiaje y lluvia (Díaz y Sotomayor, 2013).

Por otro lado, se observa que diversas actividades humanas en los alrededores de los lagos, junto con las causas tanto naturales como causadas por el hombre que provocan la eutrofización, transforman un medio acuático en una zona degradada, esto conlleva a un desequilibrio ecológico en el entorno, con efectos que, en muchos casos, pueden ser irreversibles.

La laguna Patarcocha está eutrofizada por las aguas residuales generadas en las actividades de los pobladores locales y esta investigación tiene como propósito evaluar el efecto de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles para remoción de los contaminantes de esta laguna. La investigación es de tipo aplicada/ enfoque cuantitativo/ nivel experimental. Este proyecto tiene la finalidad el tratamiento de las aguas eutrofizadas de la laguna, para su reúso en actividades ganaderas y agrícolas, así como mejorar la salubridad pública de la población que reside alrededor de la laguna Patarcocha.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

A nivel global, los lagos y lagunas desempeñan un papel crucial como valiosos recursos acuáticos, al proporcionar una serie de servicios eco sistémicos vitales y desempeñar un papel significativo en los ciclos biogeoquímicos y la regulación del clima (Chen et al., 2022). Sin embargo, lamentablemente, se observa un preocupante deterioro en muchos de estos cuerpos de agua, con la consiguiente disminución en la capacidad de brindar servicios ecosistémico (Monchamp et al., 2018).

En los últimos años, los lagos han sufrido una grave contaminación del agua debido a actividades antropogénicas, incluida la agricultura intensiva, el desarrollo industrial y la urbanización (Zheng et al., 2022). Las lagunas eutrofizadas promueven el crecimiento estacional masivo de algas siendo una fuente crucial de emisión de compuestos volátiles de azufre, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el metanotiol ($CH_3 SH$), disulfuro de carbono (CS_2), sulfuro de dimetilo ($(CH_3)_2S$) y disulfuro de dimetilo ($(CH_3)_2S_2$) (Liu et al., 2019). Los compuestos volátiles se consideran la principal fuente de mal olor en el agua debido a sus bajos umbrales olfativos, estos compuestos volátiles emitidos de modo excesivos pueden causar un gran daño al sistema nervioso humano, de igual manera influye en un impacto climático como la formación de nubes y el ciclo global del azufre (Li et al., 2022).

Kiersch et al.(2004) ya hacía mención que existen pocos datos sobre estudios de lagos con eutrofización y sus diferentes relaciones con parámetros ambientales y antropológicos en las zonas tropicales de América Latina. De igual forma en el Perú, la contaminación de los lagos es uno de los mayores problemas ambientales, considerando que la fragilidad de estos ecosistemas están impactada destructivamente en su biodiversidad, cuya biota local concentra comunidades ecológicas únicas (Cusiche & Miranda, 2019). Ya desde los estudios de Krenkel (2012) manifiesta la eutrofización de lagos y

lagunas como un problema a nivel local en nuestro país por falta de información en la caracterización y el estado de concentración de nitrógeno y fósforo.

La Ciudad de Cerro de Pasco en la región de Pasco a 4333 msnm tiene alto déficit de desagüe y servicios de saneamiento lo que impacta a las lagunas locales con aguas residuales, causando eutrofización. Como consecuencia los servicios ambientales de estos cuerpos de agua están en desaparición o se van contaminando a grandes niveles (Guere, 2017). La laguna Patarcocha, es un laguna que constituye una fuente importante del recurso hídrico en Cerro de Pasco, sin embargo, el desarrollo urbano ha ignorado la importancia de la laguna, ya que actualmente se encuentra en peligro de desaparecer por fuentes de proceso de eutrofización por las actividades antropogénicas o llamado también eutrofización artificial, siendo la calidad de sus aguas seriamente deterioradas además de la evidente la formación de cordones litorales de vegetación invasora, turbiedad de las aguas, presencia de espuma en la zona litoral ya que la laguna está recibiendo constantemente entradas de agua desde su cuenca de drenaje (Lopez y Beatriz, 2020).

El crecimiento poblacional puede promover la degradación de aguas superficiales, lo que llevaría a una eutrofización (Zorzal et al., 2018). La eutrofización se refiere a un estado ecológico en el que se produce la proliferación de algas debido a un aumento en la carga de nutrientes como el fósforo y nitrógeno por que pueden impulsar el crecimiento de las algas (Pang et al., 2018). En un lago sano, el nutriente se produce en cantidades limitadas, por lo que se restringe el crecimiento de algas. Sin embargo, los residuos de las actividades humanas, como las aguas residuales domésticas industriales, agrícolas y urbanas, aumentan la concentración de nutrientes como fósforo y nitrógeno y, posteriormente, conducen a un crecimiento excesivo de algas (Tay et al., 2022).

Las investigaciones sobre los procesos de tratamiento de electrocoagulación (EC) han ganado interés entre los investigadores debido a su capacidad para eliminar una variedad de contaminantes, como metales pesados, materia orgánica, aceites, partículas suspendidas, partículas disueltas y varios compuestos químicos (Franco et al., 2017). La disolución anódica del sistema de electrocoagulación produce coagulantes in situ, iones de hidroxilo y gas hidrógeno en el cátodo. La producción de flóculos del tipo de hidróxidos y/o polihidróxidos metálicos es causada por estas coagulantes in situ. Al agregar flotabilidad adicional, el gas de hidrógeno producido en el cátodo impulsa los flóculos a la superficie del agua (Supriya et al., 2023).

Aunque la idea de usar la electrocoagulación (EC) para el tratamiento se enfoca directamente a la recolección de microalgas, actualmente esta técnica se ha utilizado con éxito para recuperar sistemas eutrofizados (Castellanos-Estupinan et al., 2018). Del mismo modo usar al Hierro como un catalizador permite mejorar el tratamiento en la remoción de fósforo (Liu et al., 2023).

El P ligado al hierro (Fe-P), se forma mediante la adsorción de P en minerales que contienen hierro o viceversa (Liu et al., 2023). Durante un enlace simple, el proceso de formación de Fe-P, la materia orgánica coexistente en las aguas de las lagunas puede competir con P y formar asociaciones OM-Fe-P (Wang et al., 2021). Este tipo de asociación permite potenciar la mejora en la remoción de contaminantes en las lagunas eutrofizadas.

De acuerdo a lo descrito, el problema central de la laguna Patarcocha se centra en su alta presencia de contaminantes, como es el nitrógeno y el fósforo haciendo proliferar fitoplancton, y algas generando un impacto directo al ecosistema y a población aledaña, por lo tanto, se plantea usar la electrocoagulación para la remoción de los contaminantes, así como la generación de eliminación de microalgas, para mayor eficiencia se plantea asistir a la electrocoagulación usando diferentes dosis de Hierro que en

asociación con el fósforo permitirán maximizar la eficiencia en el tratamiento del agua.

1.2. Formulación del problema

Por todo lo expuesto en la descripción de la problemática, nos planteamos que el efecto de la aplicación del sistema de electrocoagulación usando electrodos móviles, permitirá la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas. Por consiguiente, nos formulamos la pregunta.

1.2.1. Problema general

¿En qué medida el sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye en la remoción de contaminantes en aguas eutrofizadas de la laguna Patarcocha, Pasco?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿En qué medida la densidad de corriente del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas?
- ¿En qué medida el tiempo de operación del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas?
- ¿En qué medida la velocidad de rotación de los electrodos del sistema de electrocoagulación influye en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas?
- ¿En qué medida la concentración de sulfato de hierro del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la influencia del sistema electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de contaminantes en aguas eutrofizadas de la laguna Patarcocha, Pasco.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la influencia del voltaje del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.
- Determinar la influencia del tiempo de operación del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.
- Determinar la influencia de la concentración de sulfato de hierro del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación teórica

El presente trabajo de investigación se realizará para conocer el efecto de la electrocoagulación en la remoción de contaminantes a partir de muestras de aguas contaminadas de una laguna eutrofizada, existe una gran cantidad de literatura referente a electrocoagulación para diferentes tipos de aguas contaminadas, con metales pesados, industriales, lixiviados de relleno sanitario (Mamelkina et al., 2017). Sin embargo, en lo que respecta al proceso de electrocoagulación para la remoción de contaminantes de lagunas eutrofizadas, existían pocos estudios en el ámbito académico y científico. En ese sentido, fue importante contribuir al estado del arte de la temática mencionada. Dentro de las diferentes tecnologías de tratamiento de agua, la aplicación de la electrocoagulación con electrodos móviles representaba una

tecnología innovadora. El enfoque rotatorio permitía un escalamiento de la electrocoagulación para maximizar el tratamiento de las aguas eutrofizadas.

La electrocoagulación resulta ser un método aplicable y eficiente de acuerdo a la naturaleza de la investigación ya que existe bibliografía que menciona que las algas presentes en el agua, pueden ser removidas, y así cumplir con ciertos aspectos normativos que los países tuvieran (Khatib et al., 2021). Uno de los grandes desafíos que enfrenta la humanidad actualmente es proporcionar agua limpia a una inmensa mayoría de la población mundial, además, los cuerpos de agua se ven afectados por las actividades humanas, muchos de ellos presentan contaminación de tipo orgánico, eutrofizando los lagos. La electrocoagulación, aunque no es una tecnología nueva, ha sido poco estudiada y desarrollada. Pese a esto, ha logrado alcanzar un aprovechamiento comercial importante en el tratamiento puntual de algunos contaminantes, ubicándose como una técnica con mayores ventajas comparativas con respecto a las tecnologías tradicionales de tratamiento.

1.4.2. Justificación social

El tratamiento de una laguna eutrofizada aporta beneficios sociales significativos, mejorando la calidad de vida de las comunidades locales. Al abordar la eutrofización, se restaura la salud del ecosistema acuático, aumentando la disponibilidad de agua para consumo humano, agricultura e industria. Esto asegura el acceso a este recurso vital, previene conflictos por el agua y promueve su distribución equitativa. Además, la recuperación de la laguna impulsa actividades recreativas y turísticas, estimulando la economía local y generando empleo en sectores como el turismo y la hostelería. En resumen, el tratamiento de la laguna no solo protege el medio ambiente, sino que también refuerza el bienestar y el desarrollo sostenible de las comunidades que dependen de ella.

1.4.3. Justificación ambiental

Además de acuerdo a la actividad operativa A0 002 “Asistencia técnica a las entidades en el diseño e implementación de inversiones en recuperación y conservación de ecosistemas que brindan servicios ecosistémico” de la Política Nacional Ambiental al 2030 (El Peruano, 2014) se justifica ambientalmente la aplicación de tecnologías en harás de recuperar los servicios ecosistémico de la laguna Patarcocha, entendiendo a un servicio ecosistémico como beneficios que las sociedades humanas obtienen de la biodiversidad y de los ecosistemas, y estos pueden ser aire limpio, la protección de las costas del impacto de huracanes y tsunamis o la regulación del clima (Rosales & Olmos, 2020).

1.4.4. Justificación económica

El tratamiento de una laguna eutrofizada mediante tecnologías como la electrocoagulación no solo conlleva beneficios ambientales, sino que también presenta una sólida justificación económica. Esta implementación no solo reduce los costos a largo plazo en gestión y mantenimiento, sino que también optimiza los procesos de tratamiento, lo que resulta en una minimización de intervenciones costosas. Además, al mejorar la calidad del agua y restaurar el equilibrio ecológico, se abren nuevas oportunidades económicas en actividades recreativas y turísticas. La revitalización de la laguna no solo impulsa la economía local, sino que también genera empleo en sectores como la hostelería y el transporte, lo que contribuye al desarrollo socioeconómico de la región. Además, la mejora en la calidad del agua beneficia directamente a la agricultura y la pesca, garantizando un suministro más confiable y saludable para estas actividades. Esto, a su vez, aumenta la productividad y los ingresos locales, fortaleciendo aún más la base económica de la comunidad.

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1. Teórico

El alcance teórico de esta investigación se centró en varios aspectos fundamentales. En primer lugar, se exploró la teoría general del agua, abordando sus características y parámetros relevantes para comprender su comportamiento y sus implicaciones en los ecosistemas acuáticos. Posteriormente, se profundizó en la teoría de la eutrofización de lagos, analizando los procesos y factores que contribuyen a este fenómeno y sus efectos en la calidad del agua y la biodiversidad. Como parte de la solución a la eutrofización, se estudió en detalle la teoría de la electrocoagulación, examinando sus principios fundamentales, mecanismos de operación y eficacia en la remoción de contaminantes presentes en cuerpos de agua eutrofizados. Se analizaron los diferentes aspectos relacionados con la aplicación práctica de la electrocoagulación, incluyendo los parámetros de diseño, las condiciones de operación óptimas y los resultados esperados en términos de calidad del agua tratada. El enfoque teórico de esta investigación permitió comprender en profundidad los procesos involucrados en la eutrofización de lagos y la aplicación de la electrocoagulación como una estrategia efectiva para su mitigación y restauración ambiental.

1.5.2. Temporal

En esta investigación se identificó como limitante temporal la accesibilidad a la Laguna Patarcocha en el distrito de Chaupimarca, Pasco, durante la temporada de febrero-marzo. Esta temporada se caracterizó por lluvias en la zona, lo que generó una mayor carga de sedimentos en la laguna y dificultó su accesibilidad. La laguna tiene un acceso accidentado, por lo que para llegar a ella se necesitó de un guía y se tuvo que modelar la accesibilidad.

1.5.3. Espacial

El presente proyecto de tesis titulado “Efecto del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles para la remoción de contaminantes en aguas eutrofizadas de la laguna Patarcocha, Pasco”, se llevó a cabo en el departamento de Cerro de Pasco, distrito de Chaupimarca, Laguna Patarcocha.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. A nivel internacional

Wang et al. (2023) en su investigación titulada “*Evaluación energética del tratamiento de aguas residuales con fenol mediante un reactor de electrodiálisis inversa utilizando diferentes ánodos*”. Tuvo como objetivo evaluar el reactor de electrodiálisis inversa (REDR) utilizando diferentes ánodos (Ti/IrO₂-RuO₂, Ti/PbO₂ y Ti/Ti₄O₇). Se discutieron los efectos de la corriente de salida y el caudal de la solución de enjuague de electrodos (ERS) sobre la eficiencia de mineralización y la producción de energía. Los resultados demostraron que la tasa de eliminación de COD (η COD) aumentó casi linealmente con la corriente de salida y el caudal de ERS cuando se usa Ti/Ti₄O₇ ánodo, pero las condiciones de operación excesivas causaron un aumento lento o incluso una disminución de η COD cuando se usaban ánodos de Ti/IrO₂-RuO₂ o Ti/PbO₂. Los resultados mostraron que el orden de pérdida de potencial del sistema de electrodos (E_{ele}) para los tres ánodos fue Ti/Ti₄O₇ > Ti/PbO₂ > Ti/IrO₂-RuO₂. También se definieron cuatro parámetros de eficiencia energética para evaluar la recuperación de energía desde múltiples perspectivas al vincular la producción de energía con la capacidad de mineralización. Eran eficiencia de electrodo (η ele), eficiencia energética (EE), eficiencia de corriente general (GCE) y consumo de energía (CE), respectivamente. Los resultados mostraron que REDR con Ti/Ti₄O₇. Los ánodos y las condiciones de operación adecuadas lograron los indicadores energéticos y la eficiencia de mineralización óptimos, lo que brindó una opción eficiente y económica para el tratamiento de aguas residuales y la recuperación de energía.

Yang et al.(2022) en su trabajo de investigación titulado “*Remoción de fosfato en efluentes secundarios de aguas residuales de plantas de tratamiento municipales por electrocoagulación de hierro y aluminio: Mecanismos y eficiencia*”. Tuvo como objetivo investigar la remoción de fosfato en efluentes secundarios de aguas residuales domésticas reales durante el proceso Fe-EC en concentraciones bajas y altas de oxígeno disuelto (OD). La eliminación de fosfato también se investigó durante el proceso Al-EC para comparar. Los resultados mostraron que el fosfato (1.3 mg/L) podía ser removido eficientemente con una eficiencia de $98\% \pm 2\%$ tanto durante el proceso Fe-EC con baja y alta concentración de OD, así como durante el proceso Al-EC, con una ligera menor tasa de remoción durante Al-EC (en 5 min) en comparación con Fe-EC (en 2 min), a 10 mA/cm^2 . La composición de los flocos fue principalmente de óxido verde durante Fe-EC con bajo DO, óxido/hidróxido de hierro trivalente amorfo durante Fe-EC con alto DO e hidróxido de aluminio amorfo durante Al-EC. Del mecanismo de remoción también se dedujo que la remoción de fosfato por Fe-EC con alto DO y Al-EC fue principalmente por coagulación, mientras que por Fe-EC con baja concentración de DO fue principalmente por adsorción de intercambio iónico. Finalmente se concluye que el aluminio podría lograr una eliminación de algas mucho mejor que la de los electrodos de hierro, como lo indica el menor tiempo de electrólisis requerido para la eliminación completa de aguas y el agua tratada más clara.

Lucakova et al. (2021) en su trabajo de investigación titulado “*La electrocoagulación reduce los costos de recolección de microalgas*”. Tuvo como objetivo evaluar los principales parámetros que afectan el proceso y rendimiento mediante la identificación de rangos óptimos en el proceso de electrocoagulación. Se realizaron estudios detallados sobre varios parámetros en el proceso de electrocoagulación, incluyendo la carga eléctrica, la concentración inicial de la biomasa, el pH, la temperatura, la agitación y el contenido residual de sal. Los resultados demostraron que, al optimizar estos

parámetros, los costos totales de energía se redujeron significativamente a 0,136 kWh/kg de biomasa seca, lo que representa menos del 14% de los costos asociados únicamente con la centrifugación. Este hallazgo subraya la eficiencia y la viabilidad económica de la electrocoagulación como una tecnología de tratamiento de aguas contaminadas. Se logró una eficiencia de recolección superior al 95% en una amplia gama de condiciones y el residuo. Se concluye que la electrocoagulación-sedimentación es un proceso muy prometedor para la preconcentración de *Chlorella*, que puede conducir a una reducción significativa de los costos de cosecha y, al mismo tiempo, a una mejor utilización de la biomasa cosechada para la nutrición humana.

Khatib et al. (2021) en su trabajo de investigación titulado “*Mejora del proceso de electrocoagulación para la recolección de microalgas marinas (Tetraselmis sp.) utilizando electrodos interdigitados*”. Tuvo como objetivo investigar el rendimiento de una nueva matriz de electrodos inter-digitados cilíndricos en electrocoagulación para la recolección de microalgas marinas (*Tetraselmis sp.*). Por lo que se espera que la nueva matriz de electrodos ejerza una fuerza dielectroforética (DEP) que ayudaría a recolectar las microalgas en el proceso de electrocoagulación. Los resultados indican que el tiempo de electrólisis de 10 min fue suficiente para cosechar el 82,4% de las microalgas con una distancia de electrodo de 1 cm y una densidad de corriente de 50 mA/cm². Además, la disminución de la distancia del electrodo a 0,5 cm aumentó la eficiencia de recolección de algas al 96,18%. Se concluye que el análisis de energía mostró que la matriz de electrodos propuesta muestra un consumo de energía específico de 38% menor que la matriz de electrodos de lámina plana convencional.

Parmentier et al. (2020) en su trabajo de investigación titulado “*Un nuevo diseño de reactor para la cosecha de algas mediante electrocoagulación-flotación en modo continuo*”. Tuvo como objetivo evaluar un nuevo sistema de electrocoagulación-flotación con reactor tubular coaxial, desarrollado por Noah

Water Solutions, para la recolección autónoma de la especie de microalga verde *Chlorella vulgaris*. No se aplicaron ajustes de pH ni otros tratamientos previos para que el método fuera aplicable en el campo. Los resultados indicaron que con este tipo de reactor de electrocoagulación-flotación las algas estaban en promedio un factor 100 más concentradas, es decir a partir de la suspensión de microalgas afluente de 0,2 g/L hasta 18,5 g/L con electrodos de hierro y 35,2 g/L con electrodos de aluminio. Además, con este tipo de reactor solo había que aplicar corrientes bajas (0,8 A para Fe y 0,3 A para Al), lo que resultaba en bajos consumos energéticos (2,0 kWh/kg para Fe y 1,1 kWh/kg para Al. La concentración de metal remanente en las algas recolectadas fue baja, es decir, 0,6% para los electrodos de Fe y 0,3% para los electrodos de Al. La combinación de estos resultados con la eliminación autónoma y continua de las algas concentradas hace que este reactor tubular de electrocoagulación-flotación sea excelente para la recolección de microalgas a escala industrial. Se concluye que al reciclar la suspensión de microalgas dos veces con electrodos de Fe y una vez con electrodos de Al, se obtuvo una buena floculación y remoción de microalgas tanto para Fe (88%) como para Al (73%).

Inan & Alaydin (2014) en su trabajo de investigación titulado "*Eliminación de fosfato y nitrógeno por hierro producido en reactor de electrocoagulación*". Tuvo como objetivo remover nutrientes de la orina humana (agua amarilla). El agua amarilla se preparó sintéticamente con los componentes principales: nitrógeno y fósforo. Como resultado del ajuste del pH, el nitrógeno y el fósforo, que están presentes en la orina, reaccionan con la solución de hierro generada electroquímicamente y luego se acumulan en el lodo por precipitación. La metodología de los experimentos se realizó bajo diferentes valores de pH para la evaluación de este nuevo proceso de eliminación de nutrientes EC. El efecto del tratamiento EC sobre la eliminación de nutrientes fue seguido por mediciones de nitrógeno total y fosfato y espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR). También se examinaron los efectos de los

parámetros de tratamiento (pH, hierro/fosfato, hierro/nitrógeno, hierro/nutrientes) sobre el rendimiento del tratamiento EC para evaluar la aplicabilidad de este novedoso método EC para el tratamiento de aguas amarillas. Los resultados muestran que el aumento del pH mejoró las eficiencias de eliminación de fosfato en proporciones molares de nutrientes definidas. La eficiencia de eliminación de fosfato fue de aproximadamente 98% a pH 8 para una relación molar de hierro/nutriente de 1:1 y, por otro lado, la eliminación de nitrógeno fue de solo 21% a pH 8 para una relación molar de hierro/urea de 4:1. En conclusión, se logró una eficiencia de eliminación del 26% del carbono orgánico total (TOC) durante el proceso de tratamiento. Además, se examinaron y discutieron los espectros de absorción FTIR para los lodos obtenidos, lo que proporcionó información valiosa sobre la composición química y la estructura de los contaminantes eliminados. Estos hallazgos destacan la efectividad del proceso en la reducción del TOC y la importancia de estudiar los productos residuales generados durante el tratamiento para comprender mejor los mecanismos de remoción y optimizar aún más el rendimiento del sistema de electrocoagulación en aplicaciones de tratamiento de aguas residuales.

Tumsri y Chavalparit (2011) en su trabajo de investigación titulado "*Optimización del proceso de electrocoagulación-electroflotación para la eliminación de algas*". Tuvo como objetivo realizar un proceso de electrocoagulación-electroflotación (ECEF) para eliminar las algas del agua. Se investigó el efecto de los materiales del ánodo, así como las condiciones operativas para la eliminación de algas del agua, como la agitación, la densidad de corriente y el pH inicial. *Chlorella Vulgaris* se utilizó como alga modelo a una densidad de población de 108 células/L. Los resultados indicaron que la eliminación completa de algas se logró al utilizar aluminio como ánodo y grafito como cátodo a una densidad de corriente de 20A/m², pH inicial de 6-8, tiempo de electrólisis de 60 minutos y consumo de energía de 1,84 kWh/m³. Este proceso, por lo tanto, tiene el potencial de ser una de las

opciones de tratamiento donde se espera una gran cantidad de algas en un recurso hídrico.

2.1.2. A nivel nacional

Monge y Arroyo (2021) en su investigación titulado *“Evaluación de parámetros de operación de un equipo de electrocoagulación para la reducción de la dureza total a partir de agua residual proveniente de ósmosis inversa”*, realizada en la Universidad Privada del Norte, Perú. Tuvo como objetivo evaluar los parámetros de operación de un equipo de electrocoagulación para reducir la dureza total en agua residual de ósmosis inversa. Se diseñó un equipo de electrocoagulación con electrodos paralelepípedos de magnesio y acero inoxidable en forma de zigzag, y se evaluaron variables como el potencial eléctrico, el flujo volumétrico y el volumen tratado del agua residual. Se consideraron diferentes valores para las variables, incluyendo flujos de 100 mL/s y 150 mL/s, potenciales eléctricos de 4V y 7.4V, y volúmenes de 1000 mL y 3000 mL. Los resultados mostraron que los parámetros más adecuados fueron un flujo de 150 mL/s, un potencial eléctrico de 7.4V y un volumen de 3000 mL, lo que resultó en una mayor remoción de la dureza total, alcanzando un porcentaje de reducción del 24.61%. La dureza total promedio disminuyó de 534.355 a 427.70 (mgCaCO₃), valor por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el D.S. N°031-2010 SA. En conclusión, se sugiere que este método puede ser eficaz para reducir la dureza en el agua residual de ósmosis inversa.

Pacheco (2019) en su investigación titulado *“Remoción de colorantes en soluciones acuosas sintéticas por electrocoagulación aplicando energía generada por un panel solar”*. Tuvo como objetivo determinar la eficiencia de remoción de colorante mediante un sistema electrocoagulación asistida por un panel solar. Para llevar a cabo el proceso de electrocoagulación, se prepararon cuidadosamente soluciones acuosas con colorantes a una concentración de 2 g/L. Estas soluciones se ajustaron a dos valores de pH distintos: 3 y 10, para

evaluar cómo la acidez y alcalinidad afectan la eficiencia del tratamiento. El pH de las soluciones es un factor crítico que puede influir significativamente en la solubilidad de los contaminantes y la formación de flóculos necesarios para su eliminación. Se emplearon electrodos de hierro y aluminio, colocados a una distancia de 1.5 cm entre ellos. El experimento se llevó a cabo utilizando tres niveles de voltaje: 2, 4 y 6 voltios. La variación en el voltaje permitió analizar el efecto de la intensidad eléctrica en la generación de coagulantes y en la eficiencia global del proceso de remoción de colorantes. Cada experimento se realizó con un tiempo de residencia de 30 minutos. Los resultados mostraron que existe una alta remoción del colorante y que la energía suministrada por el panel solar al sistema de electrocoagulación fue suficiente llegando a un % de remoción de (93.5% a 97.5%) en pH alcalino (PH₁₀) y (18% a 86.5%) en pH ácido (PH₃). Se concluyó que el uso de energía renovables como la solar es una contribución a la reducción de la huella ecológica ocasionada por los colorantes que contienen las aguas residuales de la industria. En conclusión, los parámetros de operación óptimos identificados fueron un flujo de 150 mL/s, un potencial eléctrico de 7.4 V y un volumen de 3000 mL.

Diego y Mas (2019) en su investigación titulada “*Influencia de la densidad de corriente y pH, para evaluar la remoción del Cr⁺³ y DQO en efluente de etapa de curtido, mediante electrocoagulación fotovoltaica*”. Realizada en la Universidad Nacional De Trujillo, Perú. Tuvo como objetivo estudiar la influencia del pH y la densidad de corriente en un sistema de electrocoagulación (EC). Para garantizar la eficacia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de contaminantes de las aguas eutrofizadas, se controlaron cuidadosamente diversos parámetros de operación. Entre estos parámetros, se prestó especial atención al pH (14,25; 21,38; 28,51) y a la densidad de corriente (4; 6; 8), ambos factores críticos que influyen significativamente en el rendimiento del proceso. Los resultados mostraron que, a un pH de 8 y una densidad de corriente de 28.51 mA/cm², se logró una notable reducción del DQO y Cr⁺³ en un 71.48%

y 99.17%, respectivamente. Comparativamente, otros resultados obtenidos indicaron reducciones del 66.61% para DQO y del 79.5% para Cr+3. En términos de consumo energético, se registraron valores de 36.58 kWh/m³ cuando se combinó la electrocoagulación (EC) con la fotovoltaica (PFV), y de 43.93 kWh/m³ solo con la EC. Estos resultados demuestran que el proceso de tratamiento fue altamente eficiente, tanto en la reducción de contaminantes como en el consumo energético. Además, la combinación de EC y PFV mostró una mayor eficiencia energética en comparación con la EC sola, sugiriendo que la integración de tecnologías puede optimizar el rendimiento del tratamiento de aguas eutrofizadas. En conclusión, el método aplicado no solo redujo significativamente los niveles de DQO y Cr+3, sino que también mantuvo un consumo energético razonable, consolidándose como una solución efectiva y sostenible para la remoción de contaminantes en aguas eutrofizadas.

Cuba y Chambi (2018), en su investigación titulado "*Remoción de iones cromo, níquel y zinc de efluentes de la industria galvánica usando técnica de electrocoagulación*", realizada en la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. Tuvo como objetivo utilizar un sistema de electrocoagulación para lo cual tener resultados previos al se realizó ensayos experimentales con una muestra sintética bajo un sistema por lotes y otro sistema continuo cuyo contenido para ambos está conformado por los iones Cromo (+6), Níquel (+2) y Zinc (+2) con el fin de establecer parámetros de operación como pH, temperatura, tiempo y Densidad de Corriente. Los valores óptimos de operación que se obtuvieron con la muestra sintética bajo un sistema por lotes fueron con una intensidad de corriente $i=166.7 \text{ A/m}^2$, con un pH máximo de 7.90 y un tiempo de tratamiento de 20 minutos, cuyos porcentajes de remoción fueron 100% para los 3 iones en estudio. Al tratar la muestra sintética a 166.7 A/m^2 mediante el sistema continuo con un flujo de 50 mL/min, con un pH máximo de 7.80 y un tiempo de tratamiento de 30 minutos, se obtuvieron los porcentajes de remoción de 97.8% de Cr⁺⁶, 99,7% de Ni²⁺y 99.5% de Zn²⁺, cumpliendo con la

normativa vigente del país. En conclusión, el estudio confirma que la implementación de un sistema de tratamiento continuo con las especificaciones mencionadas resulta ser una solución viable y efectiva para la remoción de iones metálicos. Esto proporciona una herramienta valiosa para industrias que buscan cumplir con las regulaciones ambientales y reducir su impacto ecológico.

Poma y Quispe (2016) en su trabajo de investigación titulado *“Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación”*, realizada en la Universidad Nacional del Centro del Perú. Tuvo como objetivo remover los contaminantes de las aguas residuales urbanas del colector de aguas de la Universidad Nacional del Centro del Perú variando la densidad de corriente y el tiempo de residencia por el método de electrocoagulación a nivel laboratorio. Se realizaron 3 tomas de muestras en diferentes semanas y a diferentes horas, se realizó un muestreo manual con la ayuda de un recipiente de plástico que se enjuagó varias veces con el agua a muestrear antes de la colección. Se colectó un total de 40 L de agua residual por muestra, de los cuales 15 L se envasaron para caracterizar el agua antes del tratamiento y el resto se trató por el método de electrocoagulación. La densidad de corriente óptima del proceso es $32,72 \text{ A/m}^2$, con un área total de contacto de $0,08253 \text{ m}^2$ y $2,7 \text{ A}$. Se obtuvo como resultados porcentajes de remoción de los indicadores de los contaminantes de las aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación son 85,9% para DBO, 75,3% para DQO, 93,8 % para aceites y grasas, 89,5% para conductividad eléctrica, 79,6% para turbiedad, 95,3% para sólidos totales, 91,0% para sólidos suspendidos, 91,3% para sólidos disueltos, 70,3% para dureza total, 91,3% para dureza cálcica, 91,9% para cloruros, 100,0% para coliformes totales y 98,9% para escherichia coli. Se concluye que la aplicación del sistema puede ser eficiente, por otro lado, se comparó los resultados obtenidos con el Decreto Supremo 003-2015-MINAN, en el cual se confirma que el proceso de la electrocoagulación es una alternativa para el tratamiento de aguas residuales.

Rengifo y Neolita (2016) en su trabajo de investigación titulado “*Modelo dinámico de sistemas para determinar la calidad de agua en la Laguna Patarcocha por vertimiento de aguas residuales de los Asentamiento Humanos aledaños, Pasco, 2016*”, realizada en la Universidad Cesar Vallejo, Perú. Tuvo como objetivo principal mostrar el comportamiento dinámico del conjunto de parámetros que miden la calidad de agua de Laguna Patarcocha con el software Stella, frente a los vertimientos de aguas residuales, que genera la población aledaña en un periodo de diez años. Para obtener los datos actuales se subdividió por cuatro puntos de la Laguna, considerando los siguientes parámetros indicadores de afectación para la medición de la calidad de agua: sólidos suspendidos, pH, DBO, oxígeno disuelto, nitratos, fósforo total, coliformes totales, ajustados al índice de calidad de agua (ICA), y comparados con los estándares de calidad en la categoría 4 del MINAM. En los resultados obtenidos se tiene que el caudal de los vertimientos de aguas residuales aumentará debido al crecimiento poblacional de los asentamientos humanos cercanos que se proyecta según los datos del INEI, considerando que el caudal inicial (2010), es de 8.97 L/s llegando a ser hasta 10.2 L/s (2026), deteriorando gradualmente la calidad de agua de la Laguna Patarcocha representado mediante un modelo dinámico de sistemas, Pasco, en el año 2026. Y que el crecimiento de la población tendrá un comportamiento ascendente hasta el 2026 generando alteración de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua de la Laguna, por lo que los nitratos aumentaran, en cambio el fósforo total con concentración de 78 mg/l del 2010 tiene una variación llegando a tener una concentración de 68 mg/l en el 2026, estimulando al crecimiento de los microorganismos siendo en 1200 en el año 2010. Siendo en su conjunto los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, elementos de medición de la calidad de agua de la Laguna Patarcocha se verá afectada cuan más vertimiento de aguas residuales reciba, demostrado en un modelo de dinámica de sistemas al año 2026.

Camargo (2015) en su trabajo de investigación titulado “*Recuperación del fósforo del lactosuero ácido residual mediante el proceso de electrocoagulación a nivel laboratorio Distrito de Yanacancha – Junín*”, realizada en la Universidad Alas Peruanas. Tuvo como objetivo determinar la recuperación de fósforo mediante el proceso de electrocoagulación del lactosuero ácido residual. El método usado fue la electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio y fierro en una celda tipo batch de 1.5 litros de capacidad. Se caracterizó el lactosuero ácido residual del distrito de Yanacancha obteniendo los siguientes resultados: cantidad de fósforo inicial que posee el lactosuero ácido residual es de 242,26 mg/L, pH 4,5, sólidos totales 6452,26 mg/L, calcio 147,1 mg/L, cloruros 92,4 mg/L y DQO 824,5 mg/L. En el proceso de electrocoagulación se monitoreo la intensidad de corriente para cada prueba experimental. Las pruebas realizadas en laboratorio nos permiten concluir que las mejores condiciones para obtener una alta eficiencia de recuperación de fósforo, en función del tiempo y en las diferentes soluciones de pH se realiza en las tres primeras horas luego se mantiene constante, obteniendo así un 83,3% de recuperación de fosfato en 3 horas y un 84,24% en 4 Horas. El resultado de la EC permitió la remoción del fósforo en un 84%, pasando de la fase acuosa a la fase floculada y de esta manera puede ser recuperado por precipitación en forma de estruvita y ser utilizado como fertilizante, mientras que de la fase acuosa el 16% puede permanecer en el agua y dichas aguas, ya reducidas en DQO, puedan ser empleadas directamente para riego agrícola (agua enriquecida en este nutriente P).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. El agua

Los recursos hídricos son una parte muy crítica tanto para los ecosistemas naturales como para el desarrollo humano. La calidad del agua en cualquier ecosistema brinda información relevante sobre el estado de la flora y fauna del

ecosistema. La buena calidad de los recursos hídricos depende de una gran cantidad de parámetros físicos, químicos y de características biológicas. La gran mayoría de estos parámetros en el Perú están estipulados en los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA). La buena calidad del agua es importante para que un ecosistema sea saludable. Los parámetros físicos, químicos y biológicos de calidad del agua se describen a continuación (Liu et al., 2019).

a. Parámetros Físicos

i. Turbidez

La turbidez nos indica la cantidad de partículas finas que están suspendidas en el agua. Es causada por partículas en suspensión como arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos. Una alta concentración de partículas en suspensión podría dañar el hábitat de los peces y otros organismos acuáticos (Brasington y Richards, 2000).

Figura 1

Turbidez en diferentes muestras de agua



Nota: Extraído de Brasington & Richards, (2000)

ii. Temperatura

La temperatura (T°) del agua puede afectar muchos aspectos críticos del ecosistema acuático como la distribución espacial de los peces, el crecimiento microbiano, la salinidad y el oxígeno disuelto (OD) lo cual generaría efectos nocivos a la vida acuática. La temperatura también influye en la tasa de fotosíntesis de algas y plantas acuáticas. Las actividades humanas que afectan la temperatura del agua incluyen la descarga de efluentes domésticos e industriales, la agricultura y las actividades relacionadas al proceso de tala de árboles (Terzi y Verep, 2012).

iii. Sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos totales (SST) generalmente se definen como partículas en agua mayores de 0.005 mm. Estas partículas son arrastradas en dirección del flujo de agua y precipitan cuando el flujo es insuficiente para mantenerlas en suspensión. El agua con alto contenido de sólidos en suspensión puede ser estéticamente insatisfactoria para el uso diario, incluido el baño. Una alta presencia de SST también evita que la luz solar penetre en el agua lo cual afecta a las plantas en el medio acuático ya que no pueden realizar la fotosíntesis (Boman, Wilson y Onterma, 2002).

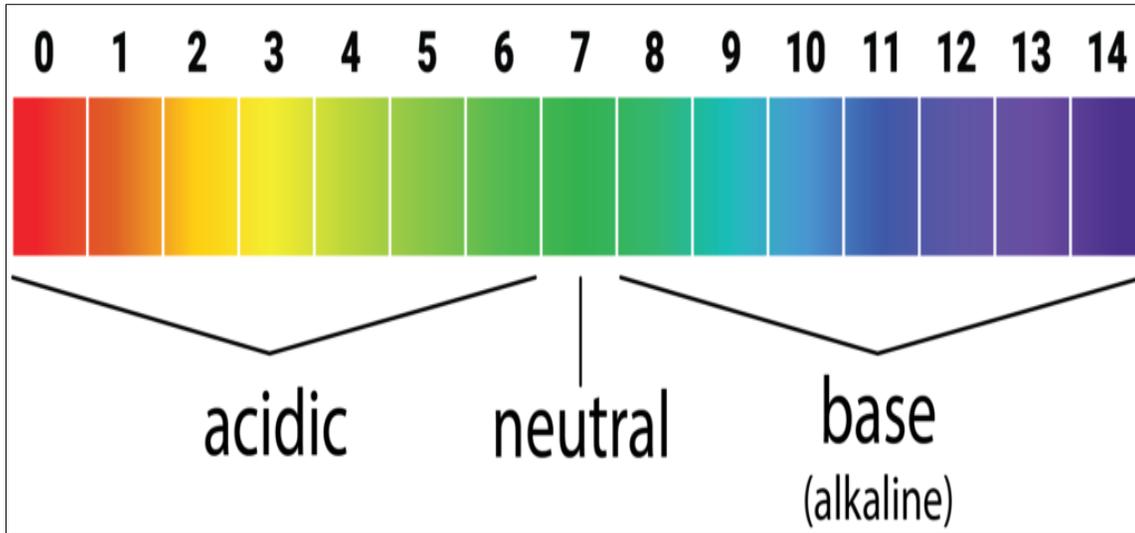
b. *Parámetros Químicos*

i. pH

El pH es uno de los parámetros más importantes y se utiliza con frecuencia para monitorear la calidad del agua, ya que el proceso del tratamiento de aguas residuales depende del pH. La medición del pH muestra si una solución es ácida o alcalina. Si la solución tiene la misma concentración de iones hidrógeno e iones hidroxilo, el pH se considera neutro. La escala de pH es logarítmica y va de 0.0 a 14.0, con 7.0 siendo neutro. Las lecturas de <7.0 indican soluciones ácidas, mientras que las lecturas superiores a 7.0 indican soluciones alcalinas o básicas (Li et al., 2019).

Figura 2

Escala del pH



Nota: Extraído de (Aseptic Health, 2018)

ii. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es la medida de la capacidad que tiene una solución acuosa para conducir la corriente eléctrica. Esta capacidad está directamente relacionada con la concentración de iones en el agua. Frecuentemente se usa como una medida indirecta de la salinidad y de los sólidos disueltos totales (SDT). Los compuestos inorgánicos son buenos conductores eléctricos a comparación de los compuestos orgánicos (Crescentini, Bennati y Tartagni, 2011). Medir la conductividad eléctrica proporcionará una buena información sobre el estado de las aguas naturales con respecto a la idoneidad del agua tanto para la vida acuática como para la bebida. La conductividad se mide normalmente en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S} / \text{cm}$) (Li et al., 2019).

iii. Demanda bioquímica de oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) también llamada demanda biológica de oxígeno es la cantidad de oxígeno disuelto que los

microorganismos aeróbicos necesitan para la descomposición del material orgánico presente en una muestra de agua a cierta temperatura y durante un período de tiempo específico (Kaiser et al., 1998).

iv. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto (OD) se refiere a la cantidad de oxígeno gaseoso libre presente en el agua u otros líquidos. Es un parámetro importante para poder evaluar la calidad del agua debido a su influencia en los organismos que viven dentro de un cuerpo de agua). El OD es esencial para la supervivencia de la flora y fauna acuática y es un indicador importante de contaminación y eutrofización en los sistemas acuáticos. La solubilidad del oxígeno está relacionada directamente con la temperatura y salinidad del agua. El agua en equilibrio con el aire normalmente está saturada de oxígeno y el OD puede expresarse como % de saturación o en términos de concentración como mg/L de O₂ (Li y Liu, 2019).

La eutrofización es el aumento de los productores primarios (fotosíntesis) en un cuerpo de agua debido a una mayor disponibilidad o uso de nutrientes. Es uno de los problemas más comunes que afecta la calidad del agua en sistemas acuáticos en todo el mundo (Li y Liu, 2019).

v. Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO) es una medida indicativa de la cantidad de oxígeno que pueden consumir las reacciones en una solución medida. Se expresa comúnmente en masa de oxígeno consumido sobre el volumen de solución, que en unidades SI es miligramos por litro (mg/L). Es un indicador del contenido de sustancias reductoras en el agua, que son orgánicas, nitritos, sulfuros, sales ferrosas, etc. La aplicación más común de DQO es cuantificar la cantidad de contaminantes oxidables que se encuentran en las aguas superficiales (por ejemplo, laguna, lagos y ríos) o aguas residuales (Becouze et al., 2019).

c. *Parámetros microbiológicos*

Las aguas crudas pueden tener una gran variedad de microorganismos, algunos de estos son patógenos y otros no patógenos. Por patógenos se entienden aquellos organismos con la capacidad de causar enfermedades a los seres vivos mientras que los no patógenos no generan efectos en la salud humana o animal. Los microorganismos más importantes que se encuentran en el agua y que tienen potencial patógeno son las bacterias, virus, algas, hongos y algunos protozoos (Gualdrón, 2016).

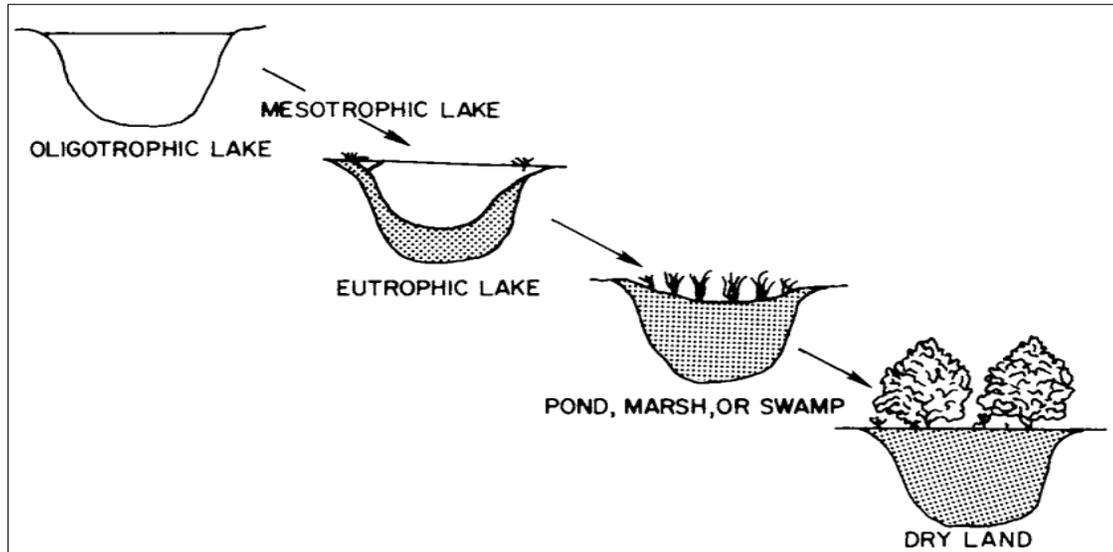
2.2.2. La eutrofización de lagos

A pesar de los avances en el tratamiento de las aguas residuales humanas en algunos países a finales del siglo XX, la prohibición del uso de fósforo en ciertas prácticas domésticas o industriales, la reducción de fertilizantes agrícolas en algunas regiones geográficas y mejoras modestas en la educación ambiental en áreas locales, el masivo y continuo aumento en el crecimiento de la población humana a nivel mundial ha incrementado la carga de nutrientes en los ecosistemas acuáticos (Burkholder y Glibert, 2022).

La eutrofización es el proceso natural de envejecimiento de los lagos que puede afectar a todas las masas de agua superficiales. El proceso evoluciona progresivamente desde el origen geológico de un lago hasta su extinción. El proceso procede independientemente de las actividades del hombre. Sin embargo, las actividades culturales como la agricultura, la construcción y la eliminación de aguas residuales pueden acelerar significativamente el proceso y acortar la vida útil de los cuerpos de agua (Novotny y Krenkel, 1980). El proceso de eutrofización y los estados tróficos relevantes de los cuerpos de agua superficiales han recibido recientemente mucha atención pública.

Figura 3

Eutrofización, el proceso de envejecimiento por sucesión ecológica



Nota. Extraído de Novotny, V. y Krenkel, P.A. (1980).

El Comité Técnico Asesor Nacional sobre Criterios de Calidad del Agua (USEPA, 1973) estableció varias condiciones, análisis o medidas que se consideran indicadores de eutrofización. Dado que estos parámetros no son infalibles, se debe utilizar la experiencia y el juicio en su aplicación. Las condiciones indicativas de enriquecimiento orgánico son

- Una disminución general lenta año tras año en el oxígeno disuelto en el hipolimnion, como lo indican las determinaciones realizadas poco tiempo antes del vuelco de la caída.
- Un aumento de los sólidos disueltos, especialmente los materiales nutritivos como el nitrógeno, el fósforo y los carbohidratos simples.
- Un aumento de sólidos en suspensión, especialmente materiales orgánicos.
- Un cambio de una población de plancton dominada por diatomeas a una dominada por algas verdeazuladas y/o algas verdes, asociado con

aumentos en las cantidades y cambios en la abundancia relativa de nutrientes.

- Una disminución constante, aunque lenta, en la penetración de la luz.

Un aumento de materia orgánica y nutrientes, en particular un aumento de las concentraciones de fósforo en los depósitos de fondo.

a. Las algas en el agua dulce

Ciertos organismos se denominan como algas. Según Rojo (2006) el término "alga" se refiere a "*...la mayoría de las plantas que contienen clorofila, excluyendo aquellas que inicialmente crecen como parásitos en plantas anfitrionas...*"

Las primeras formas de vida vegetal, conocidas como algas, surgieron en ambientes marinos que satisfacían sus necesidades básicas. Al adaptarse a este entorno favorable, las algas modernas conservaron una simplicidad en comparación con las plantas terrestres. Carecen de raíces, tallos y hojas definidas, exhiben una amplia diversidad en su morfología y fisiología, y en su mayoría tienen una capacidad de movimiento limitada o nula, dependiendo de las corrientes de agua (Rojo, 2006).

Según lo señalado por Cronquist (1993), las algas son plantas acuáticas, aunque se pueden encontrar en tierra, especialmente en lugares húmedos, en tamaños que van desde lo microscópico hasta algunas especies de algas marinas que son macroscópicas y estructuralmente complejas, siendo su característica más destacada su capacidad para realizar la fotosíntesis autótrofa como principal método de obtención de nutrientes y síntesis de materia orgánica para su propio crecimiento.

i. Morfología y fisiología

Según lo documentado por Hawkins y Griffiths (1993) las algas exhiben una amplia variedad de formas y tamaños, como se ilustra en la Figura 3. Muchas de estas especies son unicelulares y pueden tener formas esféricas, bacilares,

en forma de clava o puntiagudas. Otras se agrupan en colonias multicelulares con formas altamente variables, que pueden ser de gran tamaño y complejidad. Algunas colonias incluso tienen una estructura membranosa, mientras que otras forman grupos de filamentos simples o conglomerados con cordones individuales. Estos cordones pueden ser ramificados o no, y algunos pueden estar divididos por paredes celulares.

En el caso de algunas colonias, son simplemente agrupaciones de células individuales que permanecen juntas después de dividirse y son "idénticas". Otras colonias están compuestas por diferentes tipos de células especializadas en diversas funciones. Estas colonias pueden llegar a ser extremadamente complejas y, en términos de su estructura superficial, pueden parecerse a las plantas superiores (Pelczar et al., 1984).

Figura 4

Imagen microscópica de diversidades de algas



Nota. Extraído de *Hawkins y Griffiths (1993)*

ii. Clasificación

En 1836, el botánico irlandés Harvey llevó a cabo una clasificación seminal de las algas, dividiéndolas en tres grupos principales. Esta distinción es fundamental en la comprensión de la diversidad de organismos autótrofos acuáticos. Los grupos identificados por Harvey aproximadamente corresponden a las algas rojas, algas pardas y algas verdes. En aquel entonces, estas categorías sentaron las bases para la taxonomía de las algas, proporcionando una estructura para estudiar y comprender su amplia variedad morfológica y funcional.

Es importante destacar que, en el momento de la clasificación de Harvey, también se reconocían las algas verde-azules como un grupo separado de las algas. Sin embargo, con el avance del conocimiento científico, se descubrió que las algas verde-azules, también conocidas como cianobacterias, tienen características que las diferencian claramente de las algas en un sentido biológico y filogenético. Aunque inicialmente se consideraron algas, hoy en día se comprende que pertenecen al dominio Bacteria y no al Reino Protista, al que pertenecen las verdaderas algas.

Las algas verde-azules se reconocieron como un grupo separado de las algas verdes en 1853 por el botánico suizo Karl Wilhem von Naegeli, aunque no propuso un nombre oficial. No fue hasta 1883 que George Klebs propuso que varios grupos de flagelados estaban relacionados con diferentes grupos de algas, lo que llevó a considerar a las algas verde-azules como parte de este grupo (Mader et al., 2004).

Las algas se dividen en siete grupos principales en función de varias características, como la naturaleza y composición química de los pigmentos, la composición química de los productos alimenticios de reserva o los productos asimilables producidos durante la fotosíntesis, el tipo, número, ubicación y morfología de los flagelos, la composición química y las características físicas de la pared celular, las características morfológicas de

las células y del talo, el ciclo de vida y la reproducción, así como las estructuras y métodos de reproducción (Rojo, 2006).

La Tabla 1 resume las características más importantes de cada uno de los siete grupos.

Tabla 1

Características de grupos de algas

GRUPO	FORMA DEL TALO	PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS	FORMA DE ALMACENAR SU ALIMENTO	COMPOSICIÓN DE LA PARED CELULAR
<i>Chlorophyta</i> (algas verdes)	Unicelular, multicelular y filamentosas	Clorofilas <i>a</i> y <i>b</i> , carotenoides	Almidón	Polisacáridos y celulosa
<i>Pheophyta</i> (algas pardas)	Multicelular	Clorofilas <i>a</i> y <i>c</i> , carotenoides y fucoxantina	Laminarina (aceites y carbohidratos)	Celulosa principalmente
<i>Rhodophyta</i> (algas rojas)	Multicelular	Clorofila <i>a</i> , <i>d</i> ficobilinas y carotenoides	Almidón	Celulosa o pectina con carbonato de calcio
<i>Bacillariophyta</i> (diatomeas)	En su mayoría unicelular	Clorofilas <i>a</i> y <i>c</i> , carotenoides y xanthophylla	Leucosina (aceites de carbohidratos)	Pectina, y en algunos casos dióxido de silicón
<i>Dinoflagellata</i> (dinoflageladas)	Unicelular	Clorofilas <i>a</i> y <i>c</i> , carotenoides	Almidón	Celulosa
<i>Crysophyta</i> (algas doradas)	En su mayoría unicelular	Clorofilas <i>a</i> y <i>c</i> , carotenoides y xanthophylla	Laminarina (aceites y carbohidratos)	Celulosa
<i>Euglenophyta</i> (euglenoides)	Unicelular	Clorofilas <i>a</i> y <i>b</i> , carotenoides y xanthophylla	Almidón	No presentan pared celular, solo una película rica en proteínas

Nota. Extraído de *Mader et al. (2004)*

iii. Las microalgas en el agua dulce

Las microalgas se distinguen de las macroalgas por ser organismos unicelulares que no presentan estructuras tan complejas. Están categorizadas

en cuatro grupos principales según diversos criterios como la pigmentación, los productos de almacenamiento fotosintético, la membrana fotosintética y la morfología.

Estos grupos son *Chlorophyceae*, también conocidas como algas verdes; *Cyanophyceae*, que son las algas azul-verde; *Bacillariophyceae*, representadas por las diatomeas; y *Chrysophyceae*, denominadas algas doradas. Esta clasificación permite una comprensión más detallada y sistemática de la diversidad de las microalgas y facilita su estudio y aplicación en diversos campos científicos y tecnológicos. (Khan et al., 2009).

b. La remoción de algas

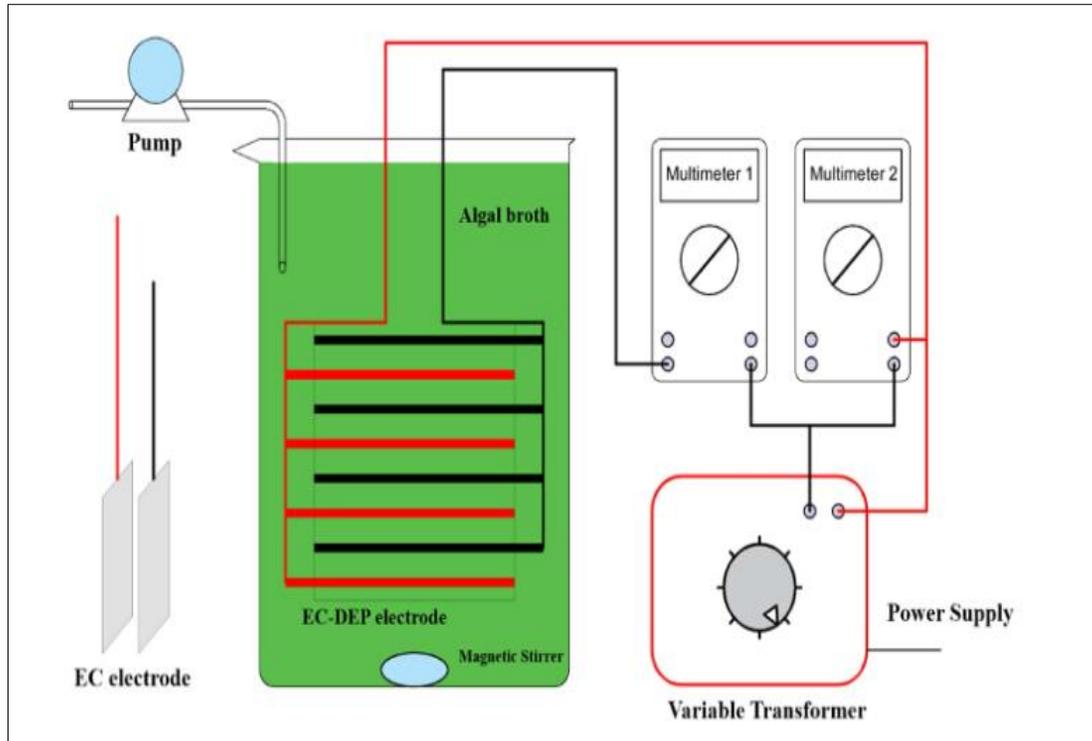
La demanda de biomasa de algas ha ido en aumento en los últimos años debido a su amplio rango de aplicación (Khatib et al. 2021). La biomasa de algas se utiliza en diferentes aplicaciones, como las industrias de bioquímica, bioplásticos, biocombustibles, farmacéutica, nutrición y cosmética (Gouveia ,2011).

Además, debido a su alto contenido de nutrientes, también se ha encontrado que la biomasa de algas es adecuada como alimento para el ganado. La biomasa de algas se extrae de las microalgas, que son microorganismos fotosintéticos que crecen en diferentes cuerpos de agua, incluidos agua dulce, agua de mar y aguas termales.

En ese sentido su remoción y aprovechamiento representa un reto para seguir investigando sobre todo por el potencial económico y energético (Hawari et al., 2020).

Figura 5

Sistema de electrocoagulación para remoción de algas



Nota. Extraído de (Khatib et al., 2021)

2.2.3. La electrocoagulación

La electrocoagulación se basa en el proceso fisicoquímico de coagulación de sistemas coloidales bajo la acción de una corriente eléctrica continua. Mientras se lleva a cabo la electrólisis de aguas residuales con ánodos de acero o aluminio, tiene lugar la disolución electroquímica del metal anódico. Los cationes disueltos de aluminio y hierro se hidrolizan y actúan como coagulantes, que inician la adhesión y fusión de las partículas. En general, la coagulación significa la pérdida de estabilidad de los agregados en sistemas dispersos que conduce a la separación de fases. Se puede eliminar una amplia gama de contaminantes del agua mediante el proceso de electrocoagulación (Shestakova y Sillanpää, 2017).

La electrocoagulación (EC) es una alternativa a la coagulación porque utiliza corriente eléctrica para producir especies coagulantes a partir de la disolución de ánodos de sacrificio (típicamente Fe o Al y menos frecuentemente otros metales, como el magnesio), siendo una de sus principales ventajas porque evita la adición química y por lo tanto menor costo de proceso.

Después de complejos procesos de especiación, que dependen del pH y la composición de los desechos, se forman muchas especies coagulantes en los medios de reacción, incluidos no solo los hidróxidos de metales amorfos sino también muchas especies (Cañizares et al., 2006).

Estas especies pueden neutralizar las cargas de los contaminantes micelares (o las de las microgotas en el caso de las emulsiones), favoreciendo la formación de flóculos a partir de los coloides contenidos en los residuos con turbiedad o la fase coalescente en las emulsiones, permitiendo así separar los contaminantes de las aguas residuales (Nidheesh, Zhou y Oturan, 2018).

La coalescencia de las partículas coaguladas se ve favorecida por el suave mezclado generado por las burbujas de hidrógeno producidas en el cátodo. Este proceso se conoce como electrofloculación, siendo una de las principales ventajas de todo el proceso de electrocoagulación, ya que ayuda a ahorrar energía de mezcla respecto a la coagulación convencional.

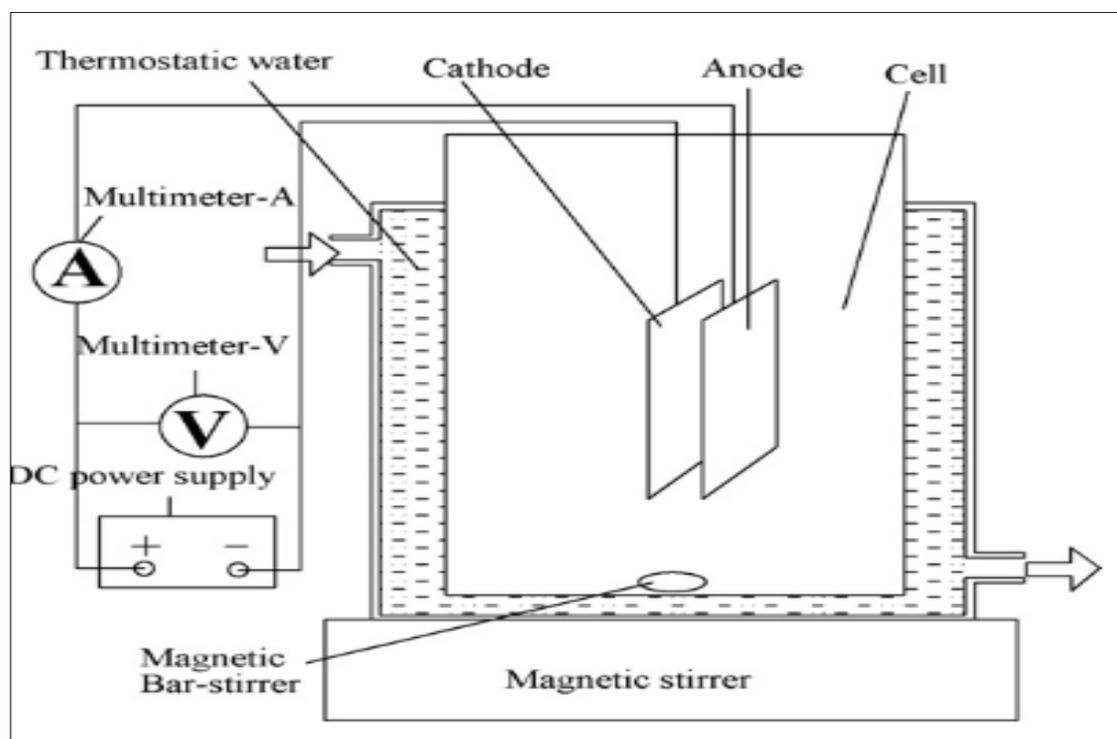
Entonces, estas minúsculas burbujas también pueden adherirse a la superficie de los flóculos, disminuyendo su densidad relativa, y permitiendo su transporte a la superficie de los residuos tratados, donde pueden ser fácilmente removidas.

El proceso al que nos referimos se denomina electroflotación y representa la técnica primordial de separación en la electrocoagulación. Sin embargo, cabe destacar que esta no es la única tecnología implicada en este proceso. En la electrocoagulación, además de la electroflotación, las partículas coaguladas de mayor peso también pueden separarse mediante sedimentación. Este

fenómeno se produce cuando las partículas coaguladas se asientan en el fondo del contenedor debido a su peso, lo que facilita su posterior eliminación del agua tratada. Esta combinación de electroflotación y sedimentación maximiza la eficiencia del proceso de separación, contribuyendo así a la remoción efectiva de contaminantes del agua (Brillas y Martínez, 2015).

Figura 6

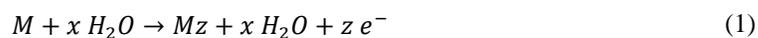
Representación esquemática de los mecanismos de (a) electrocoagulación

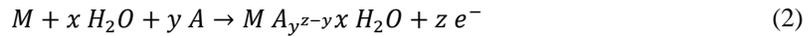


Nota. Extraído de Gao, S. et al. (2010)

a. Principios de electrocoagulación

Una reacción general de disolución de metal anódico del metal que conduce a la formación de iones hidratados simples y iones metálicos complejos, respectivamente, puede escribirse como sigue (Shestakova y Sillanpää, 2017):





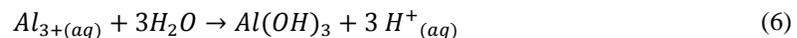
La cantidad de metal disuelto en la electrólisis está determinada por la ley de Faraday y por el consumo de energía:

$$m = CE \frac{ltM}{Fz} \quad (3)$$

Teóricamente, mientras se consumen 96.500 C/mol de electricidad, la cantidad de aluminio y hierro disueltos es de 8,99 y 27,93 g, respectivamente. La eficiencia actual (kWh/m³) durante el proceso de electrocoagulación se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$EC = \frac{Ult}{V} \quad (4)$$

Dónde: U es el voltaje aplicado (V); I es la intensidad de corriente (A); es el tiempo de electrocoagulación (h); y V es el volumen de solución tratada (L). El mecanismo de disolución electroquímica de metales consta de dos procesos. Son disolución anódica del metal al aplicar corriente eléctrica y disolución química debido a la interacción del metal con el medio. El mecanismo propuesto de las reacciones químicas que ocurren en el proceso de la electrocoagulación se muestra mediante las siguientes reacciones principales con electrodos de Hierro y Aluminio. En el caso de ánodo de aluminio (İleri et al., 2017):





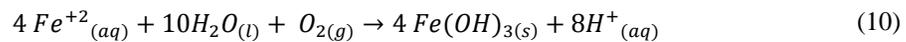
En el caso del ánodo del aluminio:



En el caso de ánodo de acero. En este caso se genera $Fe(OH)_n$ por dos mecanismos

Mecanismo 1:

Ánodo:



Cátodo:

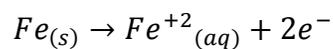


Global:

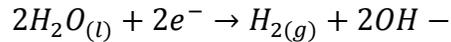


Mecanismo 2:

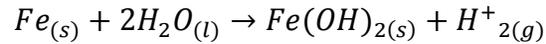
Ánodo:



Cátodo:



Global:



Los iones nacientes Al^{3+} o Fe^{2+} son coagulantes muy eficientes para la floculación de partículas. Los iones de aluminio hidrolizados pueden formar grandes redes de $Al - O - Al - OH$ que pueden absorber químicamente contaminantes. El aluminio se usa generalmente para el tratamiento de aguas y el hierro para el tratamiento de aguas residuales. La calidad final del agua tratada durante la electrocoagulación está influenciada por los materiales del ánodo, la distancia entre los ánodos, el caudal de agua en el espacio entre electrodos, la temperatura, el pH, la composición aniónica y catiónica del medio, la frecuencia de cambio de polaridad, la densidad de corriente, etc. La influencia de estos parámetros en la electrocoagulación se indica a continuación.

b. Factores que afectan la electrocoagulación

i. Densidad de corriente

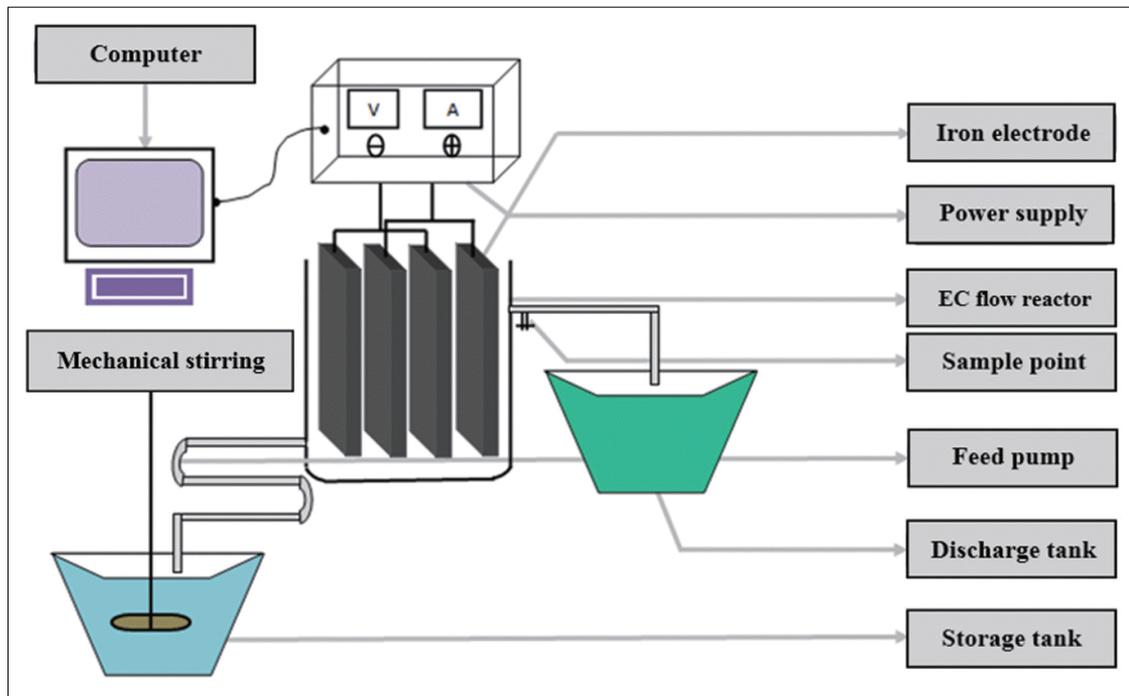
Un parámetro clave que afecta la eficiencia de EC es la densidad de corriente, que es la corriente aplicada por área de superficie efectiva del electrodo. La densidad de corriente determina la tasa de liberación de electrones como consecuencia de la disociación de los iones metálicos del (Hakizimana et al., 2017). De hecho, la disociación del electrodo corresponde directamente a la densidad de corriente aplicada (Moussa et al., 2017).

Sin embargo, el rango de densidad de corriente aplicada varía ampliamente para los diferentes tipos de aguas residuales. Las diferencias surgen principalmente debido a la variación en la interacción iónica resultante de la

naturaleza de los contaminantes presentes en las aguas residuales (Tahreen, Jami y Ali, 2020).

Figura 7

Impacto de la densidad de corriente en el proceso de electrocoagulación



Nota. Extraído de Hossain et al. (2013)

ii. Tipo y arreglo de electrodos

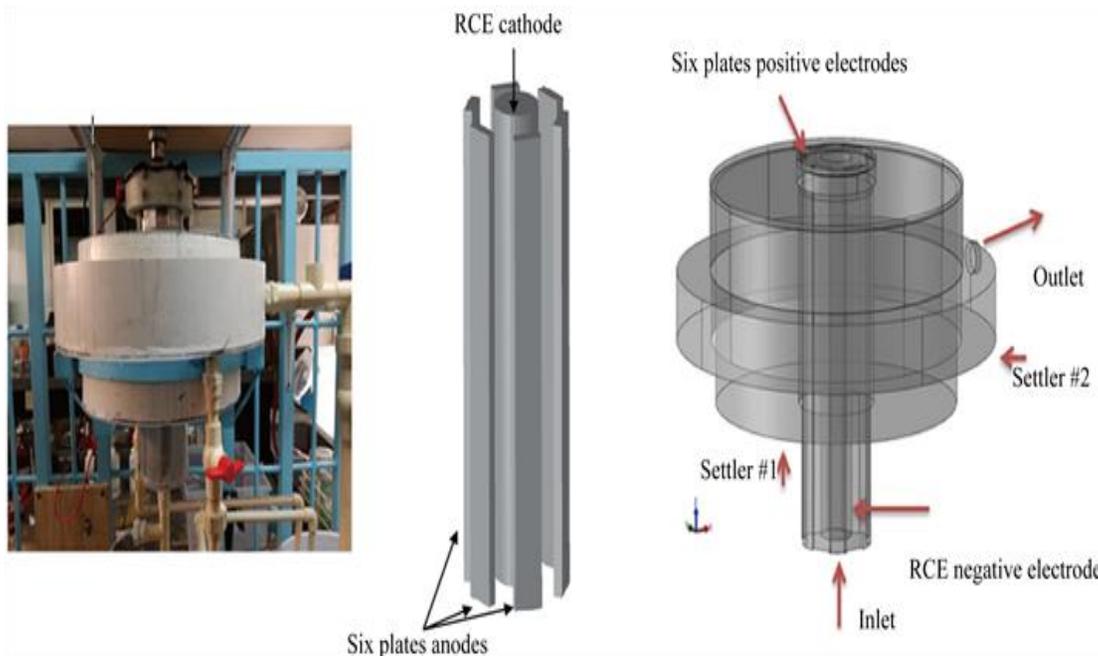
El material del electrodo influye enormemente en el rendimiento, la eficiencia y el costo de EC. El material determina el tipo de reacción electroquímica que tendrá lugar. La eficiencia se juzga principalmente por la tasa de disociación del electrodo, el porcentaje de eliminación de contaminantes y el coagulante necesario.

Estos parámetros corresponden directamente a la liberación de los coagulantes de iones metálicos en la solución electrolítica. Los coagulantes con una mayor valencia de carga se ven favorecidos debido a su capacidad

para mejorar la coagulación de los contaminantes con la ayuda de su mayor nivel de compresión eléctrica de doble capa (Garcia et al., 2017).

Figura 8

Distribución y arreglo de electrodos en electrocoagulación



Nota. Extraído de Ghernaout y Elboughdiri (2020)

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Electrocoagulación con electrodos

Según Eckenfelder y Cecil (2013) “La electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificador. La técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente utilizados están el hierro y el aluminio”.

Chen (2004) explica que, “en el proceso de electrocoagulación hay generación de coagulantes in situ por la disolución de iones de aluminio o de hierro de los

electrodos de aluminio o hierro respectivamente. La generación de iones metálicos tiene lugar en el ánodo y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso las cuales ayudan a la flotación de las partículas floculadas, las mismas que serán retiradas posteriormente”.

Según Kobya y Can (2003) “la electrocoagulación es utilizada en la remoción de contaminantes de muy diversas aguas residuales, tales como las de la industria de galvanoplastia, electro-plateado metálico, fábricas de envasados, industria del papel (desperdicios de molinos de papel), peleterías, molinos de acero, efluentes con contenido de cromo, plomo o mercurio y efluentes con contenido de aceites como los generados por talleres de maquinaria, refinerías, talleres de reparación de autos, transporte, almacenamiento y distribución de aceites, efluentes de la industria alimentaria, lavanderías e industria textil, y finalmente ha sido utilizada en la remoción de los contaminantes de las aguas para consumo humano y residuales domésticas”.

Según Morales (2021) “el reactor utilizado para realizar la electrocoagulación en una operación por batch, en su forma más simple, está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectados a una fuente de energía externa.

El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo. El diseño formado por un par de electrodos, no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una adecuada disolución del metal se requiere de electrodos de gran área superficial, es por esta razón que se utilizan celdas con electrodos monoplares en paralelo o conectados en serie”.

Según Industriapedia (2020) “un electrodo es un conductor eléctrico que hace contacto con las partes no metálicas de un circuito, como un electrolito, un semiconductor o el vacío. Si se encuentra en una celda electroquímica, también se conoce como ánodo o cátodo”.

Teniendo en cuenta los conceptos anteriores, la electrocoagulación con electrodos es un proceso electroquímico, en el cual se utilizan los electrodos como un conductor de electricidad, esto ayuda a la remoción de contaminantes, en otras palabras, a llevarlos a un proceso de coagulación, estos contaminantes se separan del agua, de manera que se suspenden en la superficie obteniendo la materia residual gracias a la acción eléctrica bajo el agua.

2.3.2. Remoción de contaminantes

Según Panduro y Rojas (2021) la remoción de contaminantes “es el proceso de tratamiento que pasa el agua para eliminar cualquier tipo de contaminante”

Según Arango y Garcés (2007) “La remoción de los contaminantes en la electrocoagulación, es un tratamiento electroquímico por medio del cual se desestabilizan contaminantes suspendidos, emulsificador o disueltos en un medio acuoso”. Engineers (1978) explica que “La remoción de contaminantes orgánicos depende del peso molecular, polaridad, solubilidad y ramificación de cada compuesto; los más eficientemente removidos son aquellos cuyo peso - molecular varía entre 100 y 10 000”. Según Primost et al. (2022) “la remoción de contaminantes comprende diversos procesos biológicos y físico-químicos, que se traducen en bienes y servicios ecosistémicos muy valiosos”. Según Abdel (2013) “para la remoción de contaminantes emergentes se requiere de tratamientos avanzados para una incorporación segura de las aguas residuales al ambiente. Se han estudiado varias opciones que incluyen sistemas con tratamientos físico-químicos, procesos de oxidación avanzada, procesos biológicos, tratamientos combinados, entre otros”. La remoción de contaminantes se entiende como la eliminación de compuestos dañinos dentro de un medio, esta necesita de procesos biológicos y fisicoquímicos para su correcta disposición, este proceso elimina cualquier contaminante dentro del suelo, agua o aire. Para lograr esto, se debe pasar por varias etapas.

2.4. Definición de términos básicos

Agua

“Es un recurso natural renovable, indispensable para la vida, vulnerable y estratégico para el desarrollo sostenible” (ANA, 2020).

Laguna

“Depósito de agua, generalmente dulce, de menor tamaño y profundidad que un lago. Su temperatura es relativamente uniforme” (ANA, 2020).

Hierro

“El hierro es el segundo metal más abundante y el cuarto de todos los elementos, superado únicamente por el oxígeno, el silicio y el aluminio” (Nordberg, 2017).

Electrocoagulación

“La electrocoagulación es un método alternativo para la depuración de aguas residuales. Consiste en un proceso de desestabilización de los contaminantes del agua ya estén en suspensión, emulsionados o disueltos” (Condorchem , 2021).

Remoción

“Acción y efecto de remover” (Rae, 2022).

Electrodos

“Extremo de un conductor en contacto con un medio, al que transmite o del que recibe una corriente eléctrica” (Rae, 2022).

Eutrofización

“La eutrofización se refiere al aporte en exceso de nutrientes inorgánicos (procedentes de actividades humanas), principalmente Nitrógeno (N) y Fósforo (P), en un ecosistema acuático, produciendo una proliferación descontrolada

de algas Fitoplanctónicas y provocando efectos adversos en las masas de agua afectadas” (Zarza, 2023).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

Hipótesis General

El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye en la remoción de contaminantes en aguas eutrofizadas de la laguna Patarcocha, Pasco.

Hipótesis Específicas

- El voltaje del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye sobre la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.
- El tiempo de operación del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye sobre la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.
- La concentración de sulfato de hierro del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye sobre a remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.

3.1.1. Operacionalización de las variables

Tabla 2

Operacionalización de las Variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	INDICE	MÉTODO	TÉCNICA
Independiente (X1): Sistema de electrocoagulación con electrodos móviles	Según Eckenfelder y Cecil (2013) la electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificador	Electrocoagulación con electrodos móviles (VI) se evaluará mediante los parámetros de operación (D) como el voltaje, tiempo de operación y la concentración de sulfato de hierro (I).	Parámetros de operación	Voltaje	10, 20 J/C	Hipotético - Deductivo	Observación experimental
				Tiempo de operación	10, 15 min		
				Concentración de sulfato de hierro	1, 2 g/L		
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSION	INDICADORES	INDICE		
Dependiente (Y1): Remoción de contaminantes	La remoción de contaminantes es el proceso de tratamiento que pasa el agua para eliminar cualquier tipo de contaminante Panduro y Rojas (2021).	La remoción de contaminantes se medirá en función de su eficiencia de remoción en las características fisicoquímicas y biológicas.	Remoción de contaminantes físico-químicas	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L		
				Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)	mg/L		
				Nitrato	mg/L		
				Amonio	mg/L		
				Fósforo Total	mg/L		
			Remoción de contaminantes biológicos	Organismos fitoplactónicos	Unidades		

IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1. Diseño metodológico

Esta investigación es de tipo básica, tiene como motivación la simple curiosidad, el inmenso gozo de descubrir nuevos conocimientos, sirviendo de cimiento a la investigación aplicada o tecnológica; y fundamental porque es esencial para el desarrollo de la ciencia (Ñaupas et al., 2014). Así también, esta investigación será de nivel explicativo es un nivel más complejo, más profundo y riguroso, de la investigación básica, cuyo objetivo principal es la verificación de hipótesis causales o explicativas y de enfoque cuantitativo.

El diseño de investigación es un plan, una estructura concebidos de tal manera que puedan obtener respuestas a las preguntas de investigación (Kerlinger y Lee, 1991). El diseño de investigación será experimental puro con grupo aleatorizados con pre y post prueba.

4.2. Método de investigación

El método aplicado fue el hipotético-deductivo, el cual ayudó a alcanzar la información científica. Este método, por medio de la observación del fenómeno, permitió plantear las hipótesis para contrastar la veracidad de los enunciados realizando las pruebas experimentales (Behar, 2008). Para demostrar las hipótesis, se desarrolló una serie de procedimientos como se describe a continuación.

4.2.1. Recolección y caracterización del agua eutrofizada

Se realizó una caracterización de los parámetros de calidad de agua, tales como DQO (mg/L), DBO (mg/L), Nitrato (mg/L), Amonio (mg/L), Fósforo Total (mg/L) y organismos fitoplanctónicos. Esta caracterización permitió trazar una línea base para posteriormente evaluar la eficiencia del tratamiento en la reducción de estos contaminantes.

4.2.2. Diseño y construcción del electrocoagulador con agitación rotatoria

a. Cálculo del tamaño de electrodos experimentales

El diseño de la celda de electrocoagulación se basó en tener la mayor superficie disponible posible para mayor eficiencia en el proceso de electrocoagulación, utilizando parámetros predefinidos por el investigador. La Tabla 9 muestra los valores iniciales seleccionados para el diseño de la celda.

Tabla 3

Parámetros iniciales a considerar

Parámetros	Valor	Unidad	Rango Variable
Voltaje	0.2	$\frac{mA}{cm^2}$	Mínima
	0.8		Máxima
Tiempo de rotación de electrodos	5	min	Mínima
	15		Máxima
Concentración de contaminantes	<3	$\frac{mg}{L}$	
Cantidad de electrodos	2		1 ánodo y 1 cátodo
Distancia entre cátodo y ánodos	2.5	cm	1 cm – 3 cm

Para el diseño de la celda y la elección de diseño de los electrodos se usó la Ley de Faraday. Investigaciones como Khaled et al. (2019), de acuerdo a esta investigación la ley de Faraday permite relacionar la intensidad de corriente y la concentración del contaminante y sus propiedades químicas. La ecuación 11 muestra la ley de Faraday.

$$\frac{V (L) \cdot c \frac{g}{L} \cdot z \cdot F \frac{C}{mol}}{M_{Microplástico} (\frac{g}{mol}) \times T (h)} = I_{microplástico} \quad (11)$$

Donde:

[v] Volumen total del experimento)

[T] Tiempo de electrocoagulación

[c] Concentración de contaminante en la salida (l/h)

[M] Masa molar de Microplástico.

[z] Cantidad de electrones

[c] Constante de Faraday

Esta ecuación permitió determinar el área superficial necesaria para generar la corriente teórica de acuerdo a la naturaleza del contaminante. La Tabla 10 muestra los cálculos para el amperaje teórico.

Tabla 4

Cálculos del área superficial de los electrodos

Parámetros	Cantidad
Volumen (L)	16
Tiempo (h)	0.25
c (g/L)	0.0023
z	1
F C/mol (A/h)	96485.33
Peso molar (g/mol)	1579.18
DQO (mg/L)	1185.18
DBO (mg/L)	284
Nitrato (mg/L)	62
Amonio (mg/L)	17.03
Fosforo Total (mg/L)	30.97
Cálculo	
Amperaje Teórico (I)	0.145
Área superficial Mínima (cm ²)	20.28
Área superficial Máxima (cm ²)	71.01

Para determinar el área superficial teniendo en cuenta el amperaje teórico de consumo, esta se divide entre las densidades de corriente (mínima y máxima) que es parte del diseño experimental de la Tabla 4.

$$J = \frac{I}{A} \quad (12)$$

$$\text{Área superficial mínima} = \frac{0.079}{80} = 10.1 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área superficial máxima} = \frac{0.079}{20} = 40.02 \text{ cm}^2$$

Esta superficie se dividió por la cantidad deseada de electrodos, para este caso se utilizaron 1 ánodo y 1 cátodo. La longitud de ancho y espesor de los electrodos lo determino el recipiente que contendrá los electrodos. El experimento se desarrolló en vasos de 1 L, fijándose el Ancho (A) = 7.1 cm y Espesor (E) = 0.2 cm. De acuerdo a estos valores se determinó la altura deseada para los electrodos. La siguiente ecuación h es la altura de los electrodos, se puntualizó que la altura calculada es la altura sumergida y se debe encontrar entre 10.10-40.02 cm².

$$\frac{A_s}{b} = .h \quad (13)$$

Donde:

[h] altura del electrodo

[b] base

[A_s] área superficial

$$\frac{71.01 \text{ cm}^2}{7.1 \text{ cm}} = h$$

$$10 \text{ cm} = h$$

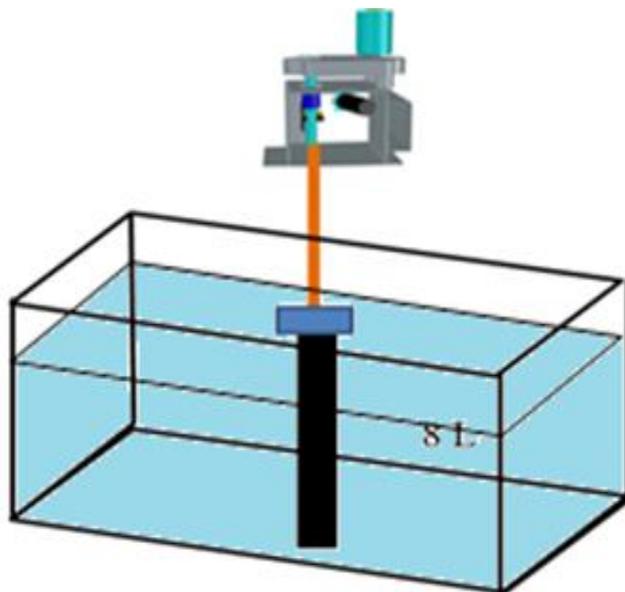
De esto resultados, se preparó electrodos de 10 cm de altura en total y se proyecta sumergir en los tratamientos hasta una distancia de 7.01 de altura.

b. Configuración de los electrodos giratorios

De acuerdo a los cálculos anteriores, la configuración para esta investigación serán electrodos de placas rectangulares como una forma geométrica convencional. Para proporcionar el giro de los electrodos se usará un motor que supere un gran torque debido a que tendría que mover un litro de agua y vencer el peso de los electrodos. La placa de área A (Fig. 9a), en contacto con el agua, por su geometría requiere gran fuerza para agitar la masa de agua en contacto. Si los electrodos fueran de platinas de forma longitudinal (Figura 9) el inconveniente antes mencionado se reduciría y el motor sería de menor potencia y trabajaría con mayor seguridad sin riesgos de recalentar. Constituyendo este hecho el criterio fundamental para que los electrodos sean diseñados y construidos de forma longitudinal (Figura 9) y no de placas rectangulares (Figura 9).

Figura 9

Imagen referencial del movimiento giratorio del electrodo



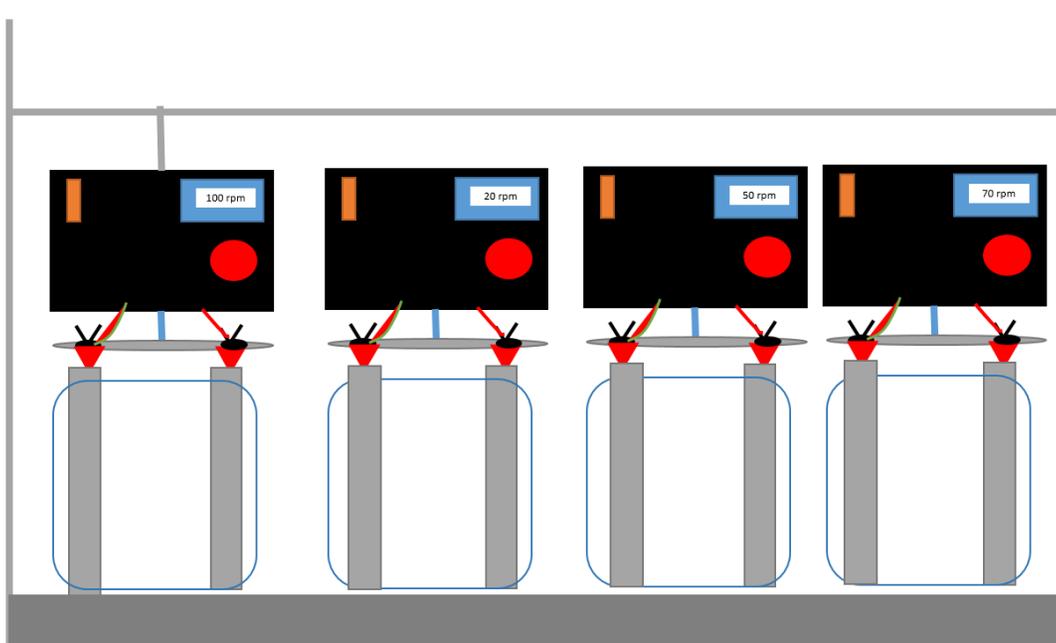
Nota. Extraído de (Milla, 2019)

c. Configuración del electrocoagulador

Se implementó un reactor tipo lotes de 1 Litro de volumen para realizar los experimentos de electrocoagulación. Se aplicaron dos electrodos rectangulares de aluminio y hierro con 1 cm de separación entre los electrodos, de dimensiones de (80 mm x 85 mm) de 98.5% de pureza. El cátodo y ánodo se conectaron a una fuente de alimentación de corriente continua TAIDOX (0-30 V y 0-5 A) (Figura 7a), también se utilizó un agitador magnético INTLLAB MS-500 (0-3000RPM) (Figura 7b).

Figura 10

Representación del reactor de electrocoagulación batch



4.2.3. Puesta en marcha del electrocoagulador

Se pretende realizar las pruebas experimentales con un electrocoagulador con electrodos móviles a escala laboratorio

4.2.4. Diseño experimental

En ese sentido, se propuso un diseño factorial simple de 3 factores y 2 niveles (2^3), 2 réplicas y 4 puntos centrales. Para ello, se hizo uso del software estadístico Design Expert 11. Dichos factores, niveles y los tratamientos respectivos se observan en la Tabla 4 y 5.

La Tabla 4 muestra los indicadores que se manipularan como factores en el diseño de experimentos, cada factor cuenta con 2 niveles, un nivel mínimo (-1) y un nivel máximo (+1).

Tabla 5

Factores y niveles del diseño experimental

Factores	Niveles	
	-1	+1
Voltaje (J/C)	20	40
Tiempo de retención (min)	15	30
Cantidad de Hierro (mmol)	20	30

Luego de definido los niveles de cada factor se realiza el diseño de la cantidad de tratamientos, combinando cada nivel y sus repeticiones de una forma aleatorizada. La tabla 5 muestra la matriz experimental desarrollada en el software estadístico, con un total de 20 tratamientos.

Tabla 6

Matriz del diseño factorial completo

Corridas	A: Voltaje corriente	B: Tiempo de retención	C: Cantidad de Hierro
	J/C	min	mmol
1	10	5	0

2	10	5	0
3	50	5	0
4	50	5	0
5	10	30	0
6	10	30	0
7	50	30	0
8	50	30	0
9	10	5	14
10	10	5	14
11	50	5	14
12	50	5	14
13	10	30	14
14	10	30	14
15	50	30	14
16	50	30	14
17	30	17.5	7
18	30	17.5	7
19	30	17.5	7
20	30	17.5	7

4.2.5. Análisis de la remoción de contaminantes

Para el diseño experimental los indicadores de respuestas a medir serán DQO (mg/L), DBO (mg/L), Nitrato (mg/L), Amonio (mg/L), Fosforo Total (mg/L) Densidad de microorganismo, Total de fitoplancton, número de fitoplancton.

Según la matriz operacional y el planteamiento del problema se busca ver la eficiencia de remoción, por lo tanto, los indicadores respuestas obtenidos en

los experimentos y la caracterización del agua inicial determinarán el porcentaje de eficiencia según la siguiente fórmula.

$$\% \text{ Remoción } Y = \frac{C_0 - C_t}{C_0}$$

Donde:

- C_0 = Concentración inicial
- C_t = Concentración final
- Y = Respuesta

4.3. Población y muestra

Según Babbie, (2000), la unidad de análisis se refiere a "*La entidad que se selecciona para su estudio en un análisis particular*". Esta investigación ha seleccionado como la unidad de análisis a las "*Aguas eutrofizadas de la Laguna Patarcocha, Pasco, 2024*"

4.3.1. Población

La población estuvo conformada por las Aguas eutrofizadas de la Laguna Patarcocha, Pasco, 2024.

4.3.2. Muestreo

Para poder seleccionar la muestra se ha considerado un muestreo *No probabilístico*. El tipo de muestreo no probabilístico es aquel en el que la selección de los participantes no se basa en una muestra aleatoria y en el que no todos los miembros de la población tienen las mismas posibilidades de ser seleccionados. En este tipo de muestreo, la selección de la muestra se realiza de forma intencional y con un criterio específico, por lo que no se pueden generalizar los resultados a toda la población.

De los tipos de muestreo no probabilísticos se ha considerado el muestreo por conveniencia. En este tipo de muestreo se seleccionan los objetos que están disponibles y dispuestos a participar en la investigación.

4.3.3. Muestra

De acuerdo al muestreo por conveniencia, la selección de una muestra de la laguna de Patarcocha se lleva a cabo referente a la cantidad eutrofizada que se usaría para los ensayos de laboratorio. Para la selección de la cantidad de muestra se han considerado los siguientes criterios de elegibilidad.

2. Se realizarán pruebas preliminares para la validación de los equipos y el procedimiento experimental por lo que necesitará 20 litros de agua eutrofizadas.

De acuerdo a los criterios mencionados, la muestra recolectada será en total 60L litros de agua eutrofizada por triplicado.

a. Procedimiento de toma de muestras

Este procedimiento se lleva a cabo durante el muestreo de lagos desde la orilla, empleando un brazo muestreador. (ANA 2016).

- El personal responsable se colocó las botas de jebe y los guantes descartables antes del inicio de la toma de muestras de agua.
- Se ubicaron en un punto donde existía fácil acceso y la corriente era homogénea y poco turbulenta.
- Antes de iniciar la toma de muestras, se enjuagó el balde con agua del punto de muestreo al menos dos veces. Luego se tomó una muestra de agua para medir los parámetros de campo según el ítem a.3 y se registraron las mediciones en la Ficha de registro de datos de campo.
- Para tomar las muestras, se colocó un frasco en el brazo muestreador, se aseguró y se retiró la tapa y contratapa sin tocar la superficie interna del frasco. Se extendió el brazo muestreador y se sumergió la botella en sentido contrario a la corriente hasta que estuviera parcialmente llena, y luego se procedió a su enjuague (mínimo dos veces), excepto para los frascos destinados al análisis de parámetros orgánicos o microbiológicos.

- Se sumergió el recipiente a una profundidad aproximada de 20 a 30 cm desde la superficie del lago.

4.4. Lugar de estudio

El lugar de estudio se centra en la Laguna Patarcocha, situada al sureste de la ciudad de Pasco, en el distrito de Chaupimarca, Provincia y Departamento de Pasco. Esta laguna abarca una superficie de 6.7 hectáreas y se encuentra a una altitud de 4378 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas UTM de 8818438N, 363060E (punto medio de la laguna). La comunidad que habita en esta área depende en gran medida de los recursos naturales para su subsistencia.

Figura 11

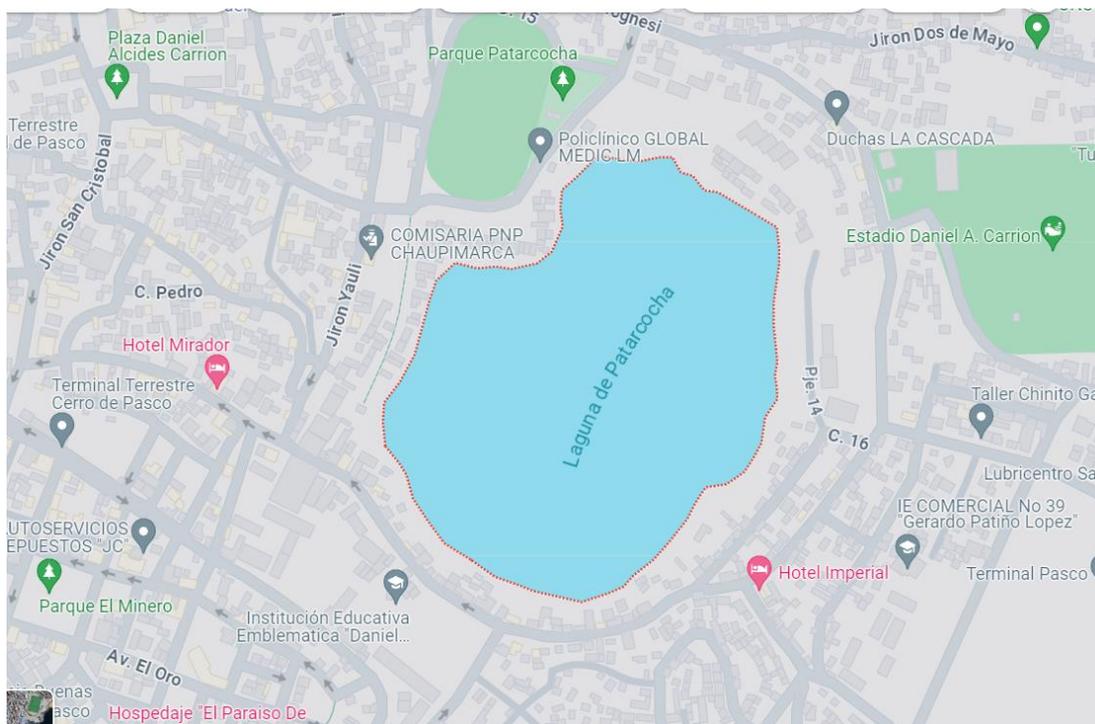
Fotografía de la Laguna Patarcocha



Nota. https://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2016/PueblosAndinosEcologia/files/roy_ventura-p.l_laguna_de_patarcocha_490-2016.pdf.

Figura 12

Mapa de ubicación de la Laguna Patarcocha en la región Pasco



Nota. *Google Maps*

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

En concordancia con lo descrito por Hernández et al. (2014), la recolección de datos implica la elaboración de un plan de procedimientos que nos conduzcan a reunir datos con un propósito específico. En el presente capítulo se detalla las técnicas e instrumentos de recolección de información.

4.5.1. Técnica

Hernández et al. (2014) afirma que la observación consiste en el registro sistemático, válido y confiable de los comportamientos o conductas que manifiesta el estudio. Por lo tanto, la técnica utilizada fue la observación, ya que esta permitió evaluar el comportamiento de las variables y los cambios

que se presentan en las aguas ácidas de la laguna contaminada de Pasco después del tratamiento con diferentes dosis de biocarbón.

4.5.2. Instrumentos

La recolección se realizó mediante registros o fichas experimentales, las cuales sirvieron como guía para observar los cambios que se generaron en la variable dependiente de acuerdo al diseño experimental.

a. Métodos analíticos

En cuanto a los métodos analíticos que se utilizaron en el laboratorio, se tuvieron en cuenta los establecidos por (APHA, 2017) se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Métodos analíticos para la determinación de los indicadores

Tipo de microorganismo	Método Analítico
Fosforo Total	Métodos Standards (APHA, 2017) Método Colorimétrico o Reflujo Cerrado(5220D)
DQO	Métodos Standards(APHA, 2017), Prueba de DBO de 5 días (5210 B)
Nitrato	Método Macro-Kjeldahl (4500-Norg B.)
Amonio	Método reducción (5001-Norg B.)

b. Validación de instrumentos

Los instrumentos fueron validados de acuerdo a los análisis de ensayo para la calibración del método y mediante los certificados de validación de los equipos utilizados para el desarrollo del experimento.

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Los resultados fueron analizados mediante el coeficiente de determinación (R^2) y R^2 ajustado, el análisis de varianza (ANOVA) ($p < 0.05$), el diagrama de Pareto, diagramas de superficie de respuesta y diagramas de probabilidad normal de residuales. Se utilizó un método de regresión no lineal para identificar los términos relevantes del modelo. La respuesta se modeló inicialmente mediante una función lineal con el análisis ANOVA del diseño factorial, cuya función de aproximación era un modelo empírico de primer orden de la forma:

$$y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_4X_2X_3 + B_5X_1X_3 + B_6X_1X_2 + B_7X_1X_2X_3$$

Para el planteamiento del diseño de experimentos y el desarrollo de la metodología de superficie de respuesta se utilizó el software desing expert versión 11.

4.7. Aspectos éticos de la investigación

En la presente tesis titulada "Efecto del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles para la remoción de contaminantes en aguas eutrofizadas de la laguna Patarcocha, Pasco, 2024", los tesistas señalamos que nos comprometemos a cumplir fielmente con el código de ética de investigación de la Universidad Nacional del Callao, aprobado y actualizado por RDU N° 210-2017-CU.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

5.1.1. Resultados de las características físico-químicas de la laguna Patarcocha

Las aguas eutrofizadas, recolectadas y envasadas según rigurosos protocolos de muestreo, fueron enviadas al laboratorio para una caracterización detallada. Este ensayo presenta los resultados de las mediciones de varios parámetros de calidad del agua, específicamente Sólidos Suspendidos Totales (SST), Amoníaco, Fósforo Total y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (Tabla 8). Los resultados de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) muestran variaciones significativas. De manera similar, la concentración de amoníaco aumenta significativamente, lo cual podría deberse a descargas de aguas residuales o actividades agrícolas. Mientras que la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) refleja la cantidad de materia orgánica presente en el agua que puede ser descompuesta por microorganismos.

Tabla 8.

Caracterización físico-química del Agua Superficial

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
				1	2	3	4
Sólidos Suspendidos Totales (*)	mg/L	2,0	5,0	46,0	44,0	40,0	-
Amoníaco (*)	mg/L	0,006	0,012	19,600	19,521	18,977	18,748
Fósforo Total (*)	mg/L	0,004	0,010	2,593	2,844	2,853	2,575

Demanda							
Bioquímica							
de Oxígeno	mg/L	0,4	2,0	7,4	99,4	8,0	89,3
(*)							

Nota: *) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL – DA.

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.

5.1.2. Resultados de la prueba de dosificación de Hierro

Se presentan los resultados del pH de las pruebas realizadas antes de aplicar el tratamiento de electrocoagulación. Durante estas pruebas, se identificó el rango de dosis óptima de hierro para un intervalo de pH de 5 a 6 unidades. Además, se tomaron en consideración relaciones volumétricas específicas de hierro respecto al agua eutrofizada, con valores de 1/8 y 1/12. Este proceso de selección de dosis y relaciones volumétricas fue crucial para determinar las condiciones ideales para el tratamiento electrocoagulante, garantizando así su eficacia y eficiencia en la remoción de contaminantes presentes en el agua.

Tabla 9.

Resultados de la dosificación pH y dosis de hierro

Fe/Agua eutrofizada	1/4	1/6	1/8	1/10	1/12	1/16
pH1	4.02	4.27	5.10	5.83	6.04	6.52
pH2	4.05	4.28	5.11	5.8	6.02	6.56
pH_{promedio}	4.04	4.28	5.11	5.82	6.03	6.54

5.1.3. Resultados experimentales del tratamiento electrocoagulación con electrodos giratorios

Después de la aplicación del tratamiento electro-sinérgico, se evidencian los porcentajes promedio de reducción de los parámetros físico-químicos del agua tratada, los cuales se encuentran detallados en la Tabla 10. Este análisis pos-tratamiento permite evaluar el impacto y la eficacia de dicho proceso en la mejora de la calidad del agua, proporcionando datos importantes sobre la eficiencia de remoción de diferentes contaminantes presentes en el agua tratada.

Tabla 10.
Resultados de los tratamientos

Corrida	Concentración FeSO ₄ (mg/L)	Tiempo (seg)	Voltaje (V)	%Turbidez	pH	%Cond	Energía consumida (kw/s)
1	750	60	20	87.40	5.06	84.76	2.5956
2	750	60	20	85.82	5.25	84.30	2.5578
3	500	90	20	92.24	5.31	79.03	3.8394
4	1000	60	30	90.29	5.33	83.30	3.4578
5	750	30	10	77.29	5.61	82.17	1.0035
6	1000	90	20	91.78	5.61	81.62	3.8637
7	500	60	30	95.74	5.88	82.43	3.546
8	500	60	10	82.83	5.94	83.76	2.0142
9	500	30	20	90.88	6.14	80.51	1.296
10	750	60	20	91.06	6.34	81.75	2.7

11	1000	30	20	85.84	6.41	81.40	1.5291
12	750	90	30	91.29	6.77	81.84	5.211
13	750	30	30	94.75	6.79	81.65	1.35
14	750	90	10	89.53	7.26	76.07	4.5873
15	1000	60	10	87.07	7.35	75.25	3.474

La tabla 10 que sigue proporciona un resumen detallado de los resultados descriptivos obtenidos. Se logró un porcentaje máximo de eliminación de turbidez del 95.74%, una eficacia máxima de reducción de la conductividad del 84.76%, un pH promedio de 6.07 y un consumo mínimo de energía de 1.00 kw/s. Estos hallazgos resaltan los logros significativos alcanzados en el proceso, demostrando la efectividad del tratamiento en la mejora de la calidad del agua tratada, así como la eficiencia en el uso de recursos como la energía.

Tabla 11.

Resultados descriptivos

Parámetros	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
% Turbidez	77.29	95.74	88.92	4.73
% Conductividad	75.25	84.76	81.32	2.72
pH	5.06	7.35	6.07	0.73
Energía consumida (kw/s)	1.00	5.21	2.87	1.27

A partir de los datos presentados en la tabla 10 y la tabla 11, se puede observar que la máxima reducción porcentual de la turbidez (95.74%) se obtiene en la corrida número 7. En esta corrida, se empleó una concentración de FeSO₄ de

500 mg/L, un tiempo de tratamiento de 60 segundos y un voltaje de 30 V. Por otro lado, se identifica que el consumo mínimo de energía (1.0035 kw/s) se registra en el tratamiento número 5.

En esta instancia, la concentración de FeSO_4 utilizada fue de 750 mg/L, el tiempo de tratamiento fue de 30 segundos y el voltaje aplicado fue de 10 V. Estos resultados resaltan la importancia de ajustar cuidadosamente los parámetros del tratamiento para lograr la máxima eficacia en la remoción de turbidez con el mínimo consumo de energía.

5.1.4. Análisis estadístico para la estimación del efecto de los factores

Se empleó el programa estadístico Design Expert Versión 11 (Stat Ease, EEUU) para llevar a cabo el análisis de los resultados. Además, se utilizó ANOVA para examinar los datos obtenidos. Design Expert realiza la aleatorización del orden de rendimiento del diseño experimental, lo que ayuda a asegurar que el modelo satisfaga ciertas suposiciones estadísticas y también puede contribuir a minimizar los efectos de los factores que no se incluyeron explícitamente en el estudio.

i. Efecto de los factores en la remoción de Turbidez

La figura 14 muestra cómo el voltaje (V) y la concentración de Fe_2SO_4 (mg/L) influyen en la turbidez. Se observa que la eliminación de la turbidez tiende a disminuir cuando el voltaje se sitúa en un rango más alto, específicamente entre 25 y 30 V. Además, se observa que las concentraciones más bajas de Fe_2SO_4 favorecen la eliminación de la turbidez.

Figura 13

Efecto de la concentración de Fe_2SO_4 , tiempo y voltaje sobre la turbidez

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

Turbidez (NTU)

● Design Points

-- 95% CI Bands

Actual Factors

A: Concentración FeSO4 = 750

B: Tiempo = 60

C: Voltaje = 20

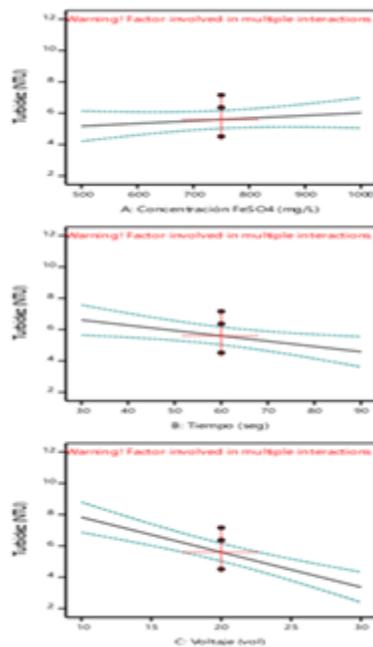


Figura 14

Interacción del voltaje y la concentración de Fe_2SO_4 en la remoción de turbidez

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Turbidez (NTU)

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

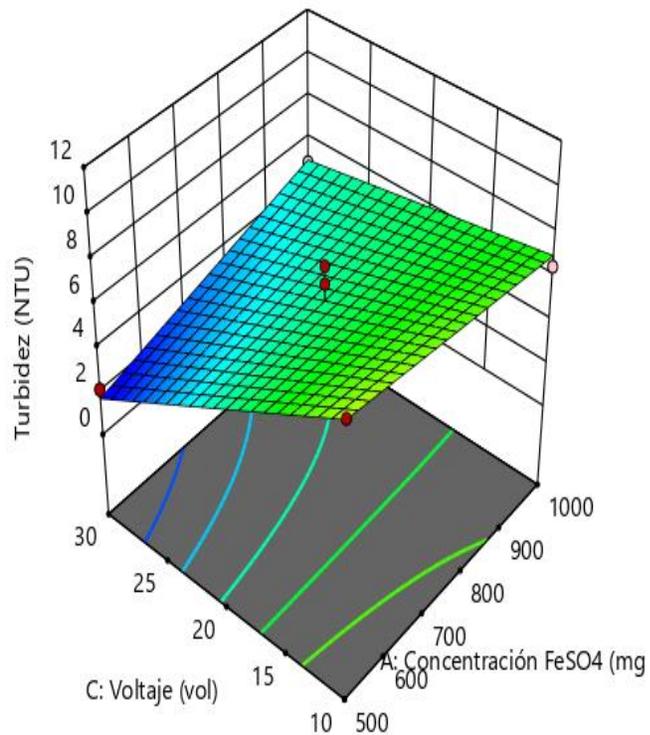
2.15  11.4667

X1 = A: Concentración $FeSO_4$

X2 = C: Voltaje

Actual Factor

B: Tiempo = 60

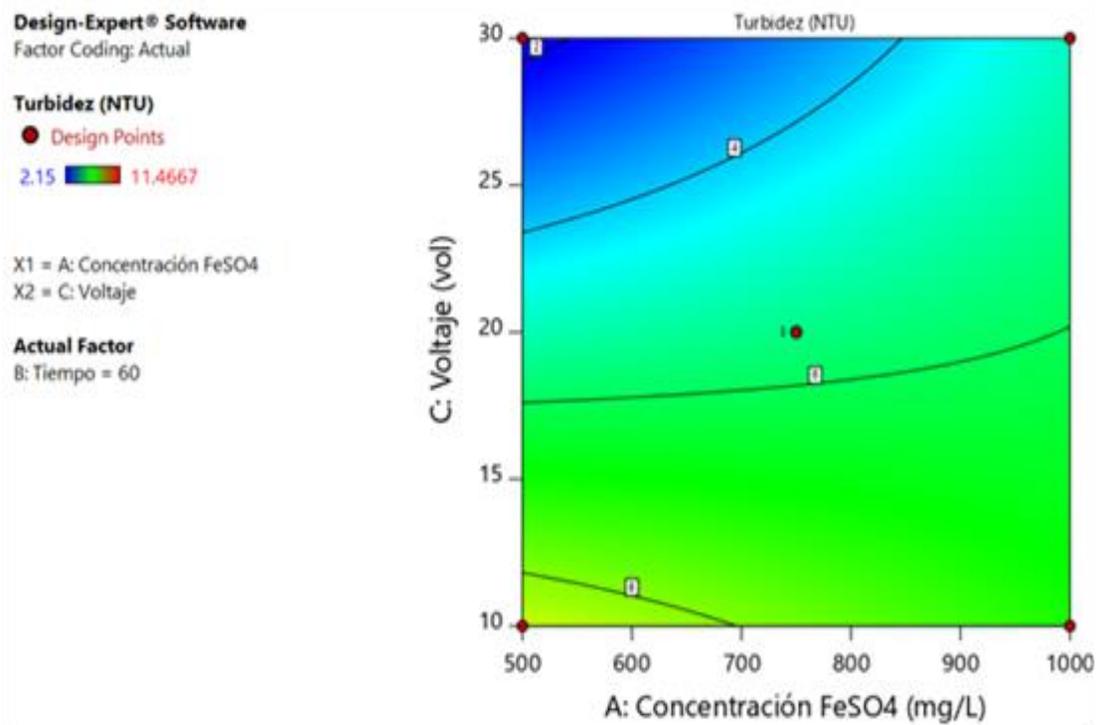


A partir del gráfico, se puede deducir que aumentar el voltaje tiene un impacto positivo en la variable de interés. Esto se debe a que durante el proceso de electrocoagulación se generan más iones metálicos, los cuales tienen la capacidad de coagular y flocular de manera más eficiente las partículas que causan la turbidez.

Por lo tanto, cuando el voltaje alcanza niveles óptimos, se reduce la necesidad de agregar Fe_2SO_4 adicionalmente para lograr un tratamiento efectivo del agua.

Figura 15

Interacción concentración de Fe_2SO_4 y voltaje en la remoción de turbidez



La figura 16 ilustra que, para el nivel alto de voltaje (30 V), la remoción de turbidez aumenta a una concentración de Fe_2SO_4 determinada de 750 mg/L. La pendiente es positiva respecto a este factor. Sin embargo, para tiempos intermedios y altos, se observa un incremento de la turbidez.

Esto indica que proporcionar mayor voltaje durante tiempos cortos puede ser una medida eficaz para mejorar la remoción de turbidez con concentraciones fijas de Fe_2SO_4 . Por lo tanto, es posible encontrar un valor óptimo para el tiempo en el que se alcanza la máxima remoción de la turbidez.

Figura 16

Interacción voltaje y tiempo en la remoción de turbidez

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

Turbidez (NTU)

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

2.15  11.4667

X1 = B: Tiempo

X2 = C: Voltaje

Actual Factor

A: Concentración FeSO4 = 750

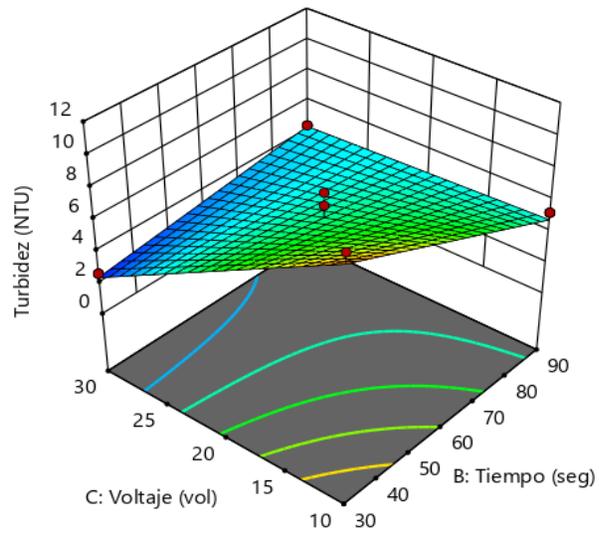


Figura 17

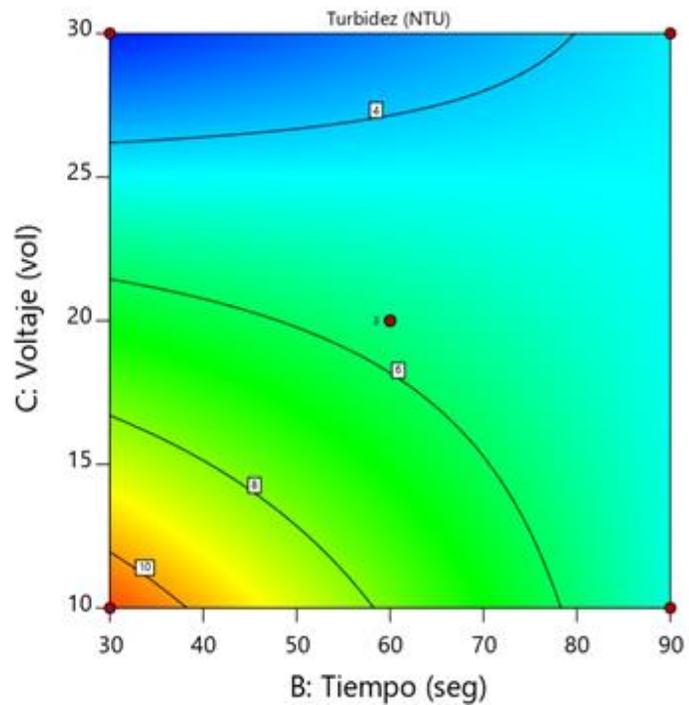
Interacción tiempo y voltaje en la remoción de turbidez

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

Turbidez (NTU)
● Design Points
2.15 11.4667

X1 = B: Tiempo
X2 = C: Voltaje

Actual Factor
A: Concentración FeSO4 = 750



ii. Efecto de los factores en el pH

La figura 18 ilustra cómo interactúan los factores de tiempo y concentración de Fe_2SO_4 en el pH. Se observa que el tiempo tiene un efecto inverso en el aumento del pH cuando se utilizan concentraciones bajas de Fe_2SO_4 (500 mg/L).

Por otro lado, cuando se emplean concentraciones más altas de Fe_2SO_4 y tiempos más cortos (30 segundos), el pH tiende a ser ligeramente ácido, mientras que para tiempos más prolongados (90 segundos), se observa una disminución más notable del pH.

Figura 18

Interacción del tiempo y la concentración de Fe_2SO_4 en el pH

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

pH

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

5.05667  7.345

X1 = A: Concentración FeSO4

X2 = B: Tiempo

Actual Factor

C: Voltaje = 20

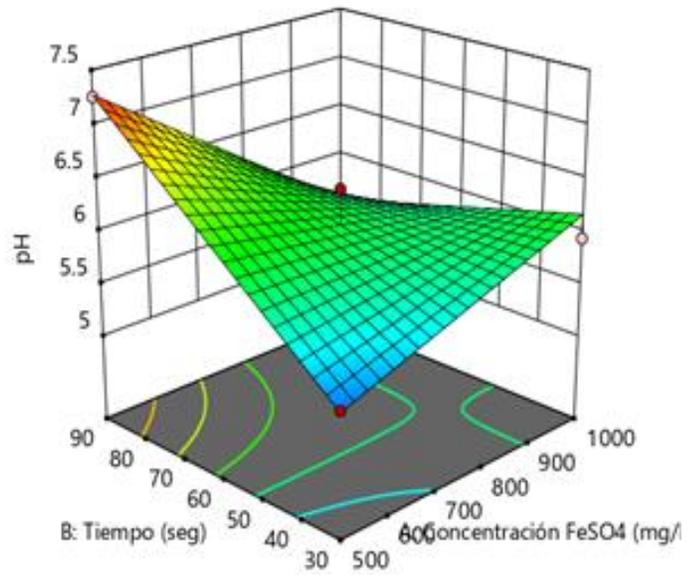


Figura 19

Interacción del voltaje y la concentración de FeSO4 en el pH

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

pH

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

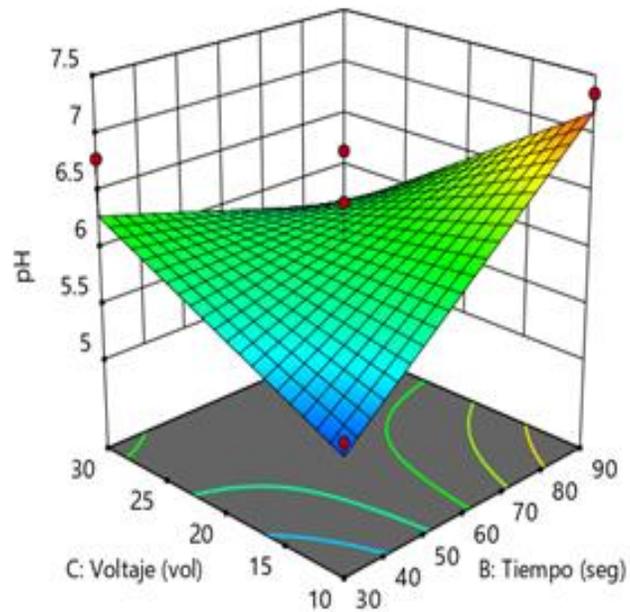
5.05667  7.345

X1 = B: Tiempo

X2 = C: Voltaje

Actual Factor

A: Concentración FeSO₄ = 750



En la figura 19 se evidencia que, cuando el voltaje se mantiene en un nivel bajo (10 V) y la concentración de Fe₂SO₄ es reducida (750 mg/L), se registra la menor conductividad.

Por otro lado, se observa una disminución de la conductividad cuando tanto el voltaje como la concentración de Fe₂SO₄ se encuentran en niveles altos. Este patrón sugiere que los valores extremos de los factores analizados resultan en una mayor reducción de la conductividad después del tratamiento, siempre y cuando el tiempo se mantenga en un nivel intermedio de 60 segundos.

Figura 20

Interacción de la concentración Fe_2SO_4 sobre el voltaje

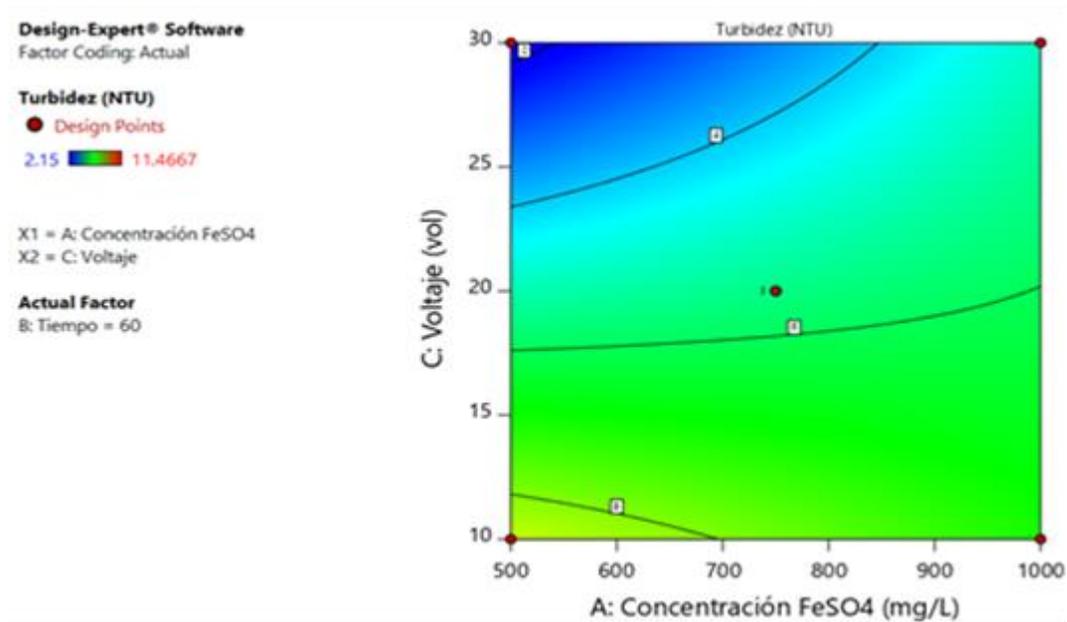


Figura 21

Interacción del voltaje y tiempo en el pH

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

pH

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

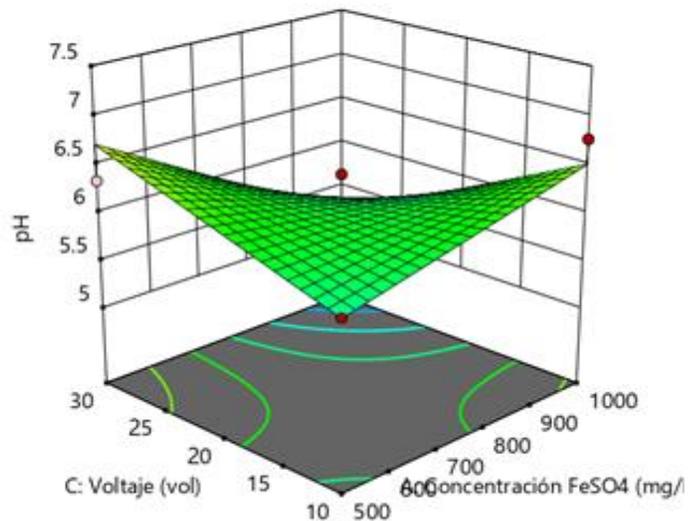
5.05667  7.345

X1 = A: Concentración FeSO4

X2 = C: Voltaje

Actual Factor

B: Tiempo = 60



En la figura 21 se observa que los puntos mínimos de pH se alcanzan con niveles bajos de voltaje (10 V) y tiempos cortos (30 seg), mientras que el mismo efecto se produce con niveles altos de voltaje (30 V) y rangos mayores de tiempo (90 seg). Además, el pH es neutro (pH=7) cuando se operan a condiciones de bajo voltaje (10 V) y rangos de tiempo alto (90 seg).

iii. Efecto de los factores en la remoción de conductividad

La figura 22 muestra que, al mantener el voltaje (20 V) y el tiempo (60 segundos) constantes como factores determinados, se observa una disminución en la conductividad para niveles elevados de concentración de Fe_2SO_4 (1000 mg/L). Se observa una pendiente negativa en un rango que va desde intermedio hasta alto, lo que indica que al aumentar la concentración de Fe_2SO_4 (entre 750 mg/L y 1000 mg/L), se reduce la presencia de iones que permanecen en la muestra después del tratamiento.

Figura 22

Efecto de la concentración de Fe_2SO_4 en la conductividad

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Conductividad

● Design Points

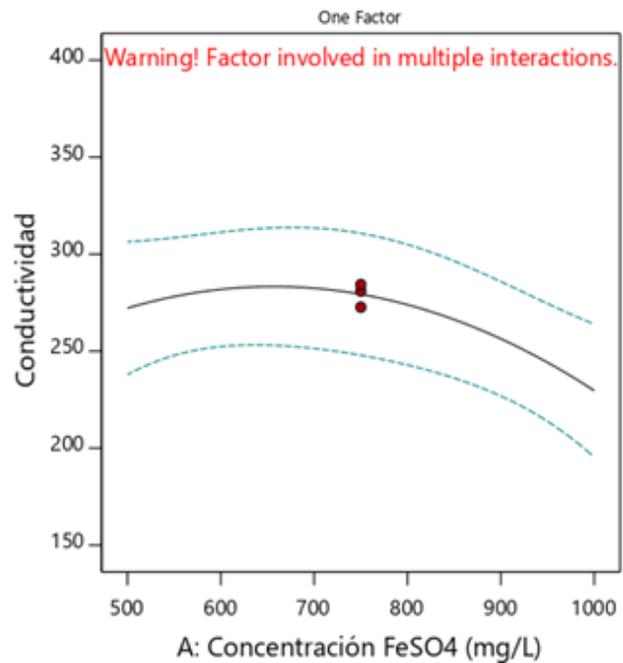
-- 95% CI Bands

X1 = A: Concentración FeSO_4

Actual Factors

B: Tiempo = 60

C: Voltaje = 20



La figura 23, se presenta el efecto del tiempo cuando los factores de voltaje (20 V) y concentración de Fe_2SO_4 (750 mg/L) se mantienen constantes. En un rango de tiempo entre 30 seg y 50 seg, la conductividad disminuye hasta estabilizarse. Sin embargo, a partir de un nivel intermedio a alto, la conductividad presenta un incremento continuo en la muestra tratada.

Figura 23

Efecto del tiempo en la conductividad

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

Conductividad
● Design Points
-- 95% CI Bands

X1 = B: Tiempo

Actual Factors
A: Concentración FeSO₄ = 750
C: Voltaje = 20

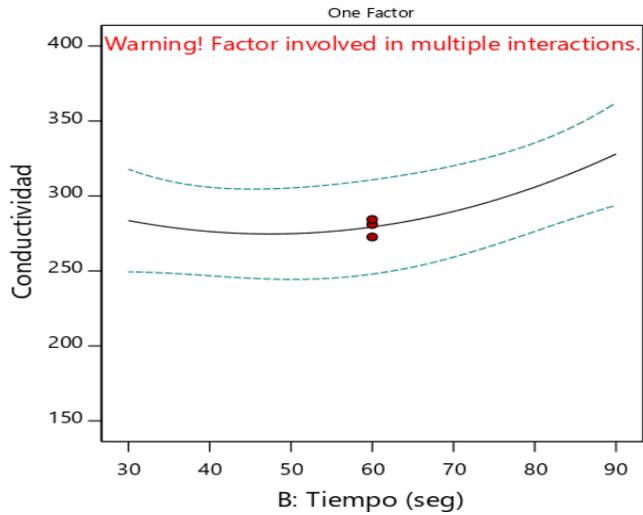


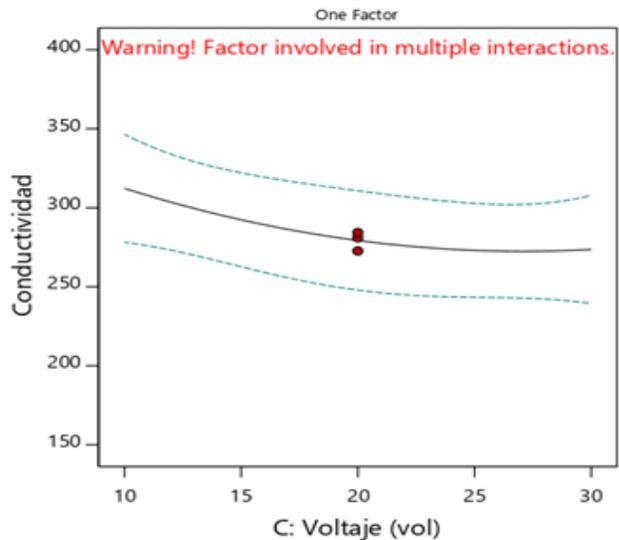
Figura 24 Efecto del voltaje en la conductividad

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

Conductividad
● Design Points
-- 95% CI Bands

X1 = C: Voltaje

Actual Factors
A: Concentración FeSO₄ = 750
B: Tiempo = 60



En la Figura 24 se puede apreciar el impacto del voltaje en la conductividad, mientras se mantiene constante la concentración de Fe₂SO₄ (750 mg/L) y el tiempo (60 segundos). Se evidencia un patrón inverso en el cual, al incrementarse el voltaje, la conductividad experimenta una tendencia a la baja

a lo largo del rango evaluado. Este fenómeno sugiere que el aumento del voltaje contribuye a la disminución de la conductividad del agua tratada. Este hallazgo es relevante ya que proporciona información importante sobre cómo ajustar el voltaje para optimizar la eficiencia del proceso de tratamiento, lo que puede tener implicaciones significativas en la calidad del agua tratada y en la eficacia general del sistema de electrocoagulación.

Figura 25

Interacción del tiempo y la concentración de Fe_2SO_4 en la conductividad

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Conductividad

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

233  378.456

X1 = A: Concentración $FeSO_4$

X2 = B: Tiempo

Actual Factor

C: Voltaje = 20

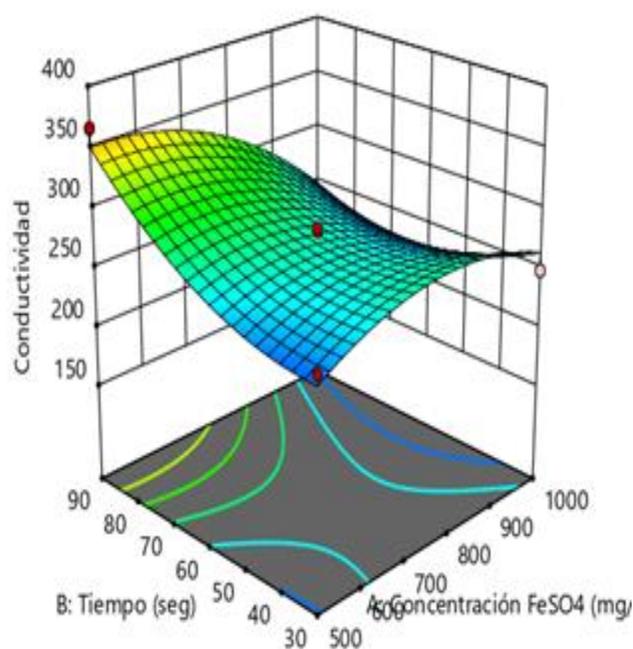


Figura 26

Interacción del tiempo y la concentración de Fe_2SO_4 en la conductividad

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

Conductividad

● Design Points

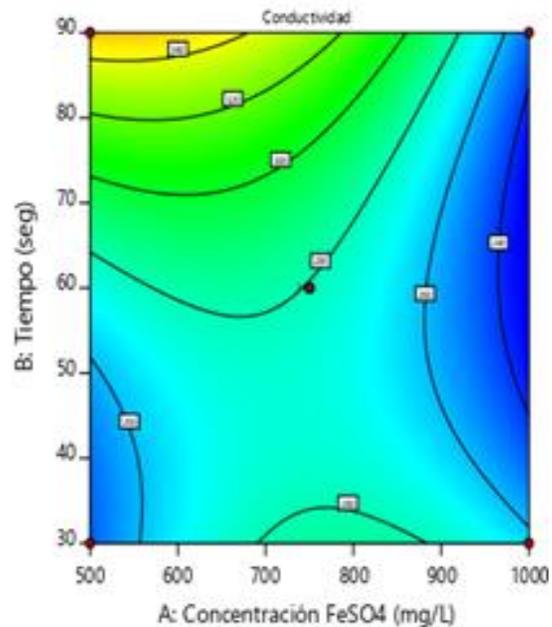
233  378.456

X1 = A: Concentración FeSO₄

X2 = B: Tiempo

Actual Factor

C: Voltaje = 20



En la figura 26, se puede observar que, al mantener constante un voltaje de 20 V y un tiempo intermedio de 60 segundos, se registra una reducción en la conductividad para un nivel elevado de concentración de Fe₂SO₄ (1000 mg/L). Además, al considerar la interacción entre un tiempo bajo (30 segundos) y una concentración de Fe₂SO₄ también baja (500 mg/L), se obtienen valores inferiores de conductividad.

Esto sugiere que aumentar la cantidad de Fe₂SO₄ puede ser una medida efectiva para mejorar la disminución gradual de la conductividad, manteniendo el voltaje constante (20 V). Por ende, es posible identificar un valor óptimo para la concentración de Fe₂SO₄ que resulte en la mínima conductividad en la muestra después del tratamiento.

iv. Efecto de los factores en la remoción de energía consumida

Figura 27

Efecto de la concentración de Fe_2SO_4 tiempo y voltaje en la energía consumida

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Energía Consumida (watts)

● Design Points

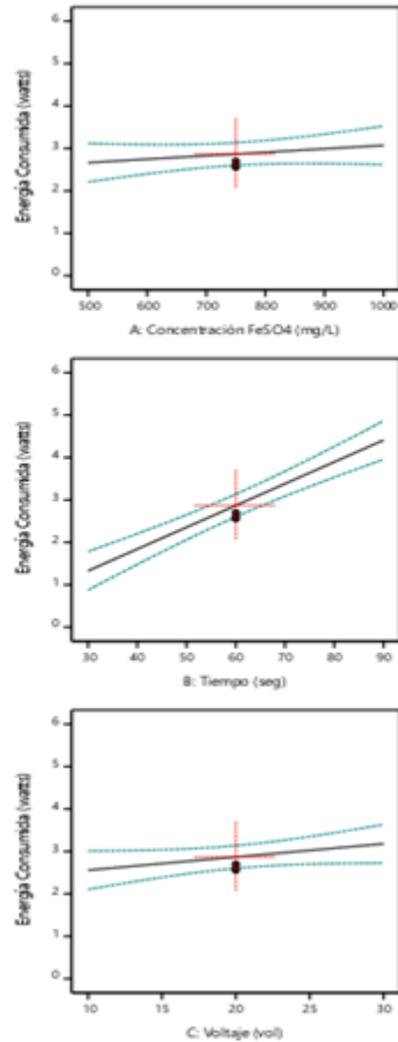
-- 95% CI Bands

Actual Factors

A: Concentración $FeSO_4$ = 750

B: Tiempo = 60

C: Voltaje = 20



5.2. Resultados inferenciales

Como parte inicial del análisis estadístico de los datos, se llevó a cabo la evaluación de los supuestos de normalidad de los residuos y homogeneidad

de la varianza. Estas pruebas fueron fundamentales para determinar la distribución y la consistencia de los datos recopilados. Una vez clasificados los datos como paramétricos o no paramétricos según estos supuestos, se procedió con las técnicas estadísticas adecuadas para garantizar la validez y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

5.2.1. Validación de supuestos de la normalidad de los residuos

Hipótesis

H₀: Los errores tienen distribución normal

H₁: Los errores NO tienen distribución normal

Nivel de significación

$\alpha=0.05$; $P>0.05$

A continuación, la Figura 28 muestra la relación entre la probabilidad normal y los residuos externamente estandarizados. Las Figuras 28 a 31 presentan diversos análisis relacionados con esta relación. Al observar las Figuras 28 y 29, se puede apreciar una distribución de probabilidad normal adecuada, ya que los puntos se alinean aproximadamente en una línea recta. Este patrón indica que la distribución subyacente de los datos es normal.

Las Figuras 30 y 31 complementan este análisis proporcionando una perspectiva adicional sobre la variabilidad y el comportamiento de los residuos. Una distribución normal de los residuos es un indicio de que el modelo estadístico utilizado es apropiado y ajusta bien a los datos observados. Esto es crucial para la validez de las inferencias y conclusiones derivadas del análisis.

Por tanto, las representaciones gráficas en estas figuras no solo verifican la normalidad de los datos, sino que también refuerzan la robustez del modelo aplicado.

Figura 28

Probabilidad normal vs los Residuales externamente estandarizado en la turbidez.

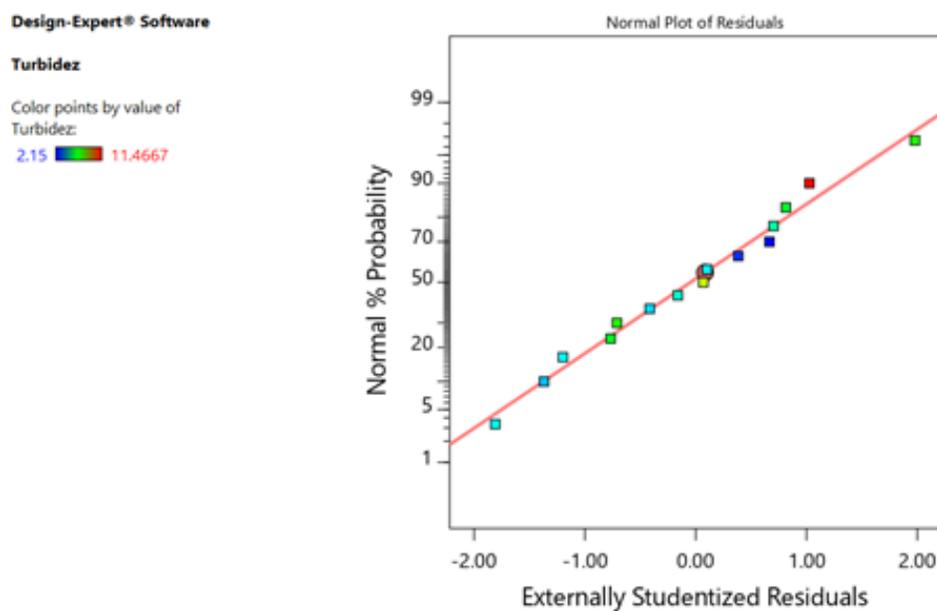


Figura 29

Probabilidad normal vs los Residuales externamente estandarizado en el pH.

Design-Expert® Software

pH

Color points by value of
pH:

5.05667  7.345

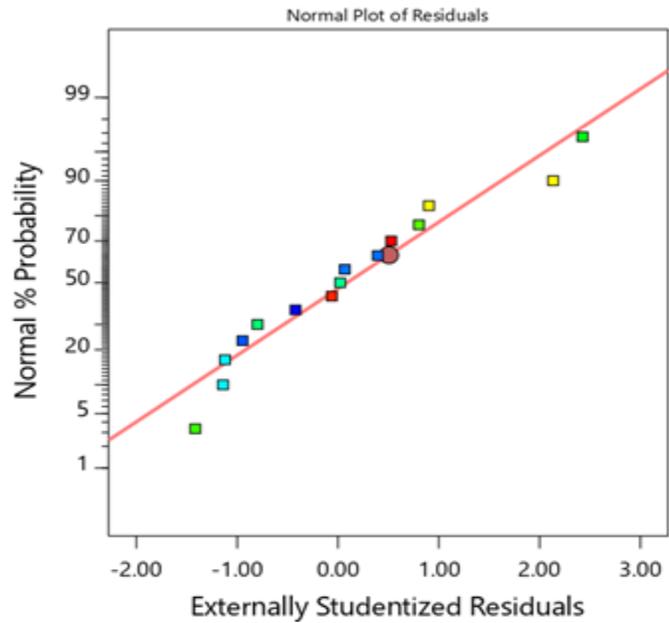


Figura 30

Probabilidad normal vs los Residuales externamente estandarizado en la conductividad.

Design-Expert® Software

Conductividad

Color points by value of
Conductividad:

233  378.456

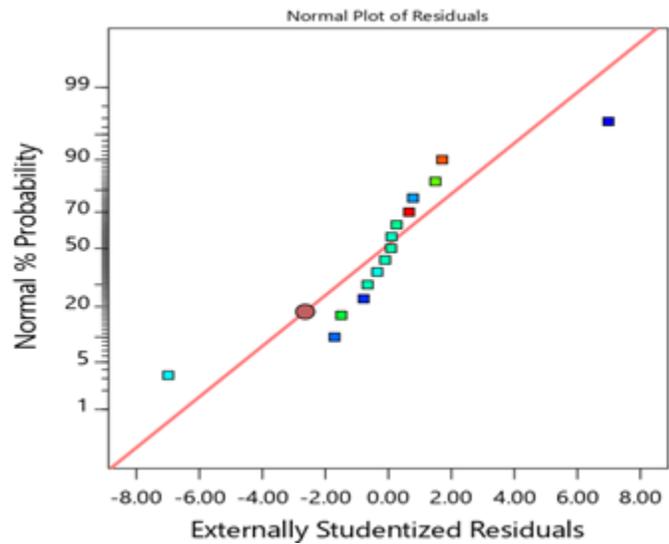


Figura 31

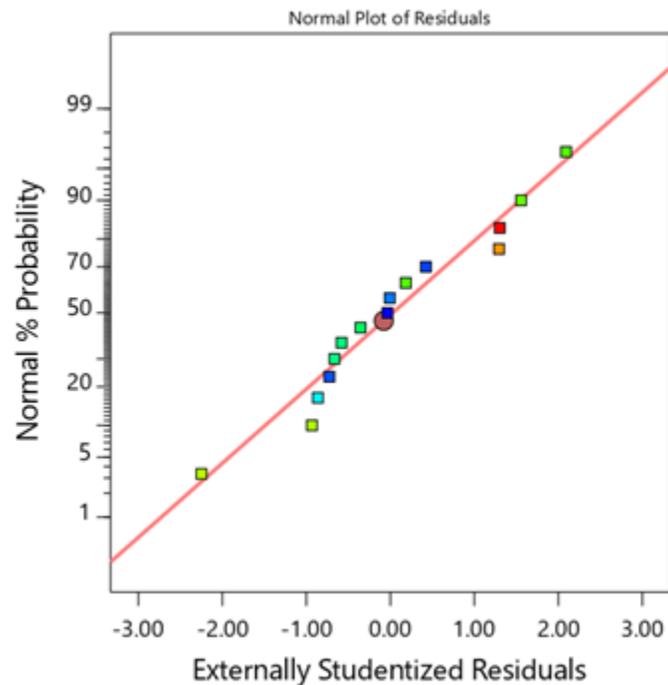
Probabilidad normal vs los Residuales externamente estandarizado en la energía consumida.

Design-Expert® Software

Energía Consumida

Color points by value of
Energía Consumida:

1.0035 5.211



5.2.2. Homogeneidad de la varianza

Hipótesis

H₀: Las varianzas son iguales ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$)

H₁: Al menos una varianza es diferente (al menos uno ($\alpha_i \neq 0$))

Nivel de significación

$\alpha=0.05$; $P>0.05$

Adicionalmente, la figura 33 exhibe los residuales externamente estandarizados en función del número de corrida experimental, desde la figura 33. a hasta la figura 35. Al analizar las figuras 32 y 33, se puede observar que los residuos están dentro de una banda horizontal y fluctúan de manera más

o menos aleatoria dentro de dicha banda. Esta observación sugiere que no se presentan defectos obvios en el modelo analizado

Figura 32

Los residuales externamente estudentizados vs los valores predichos en la turbidez.

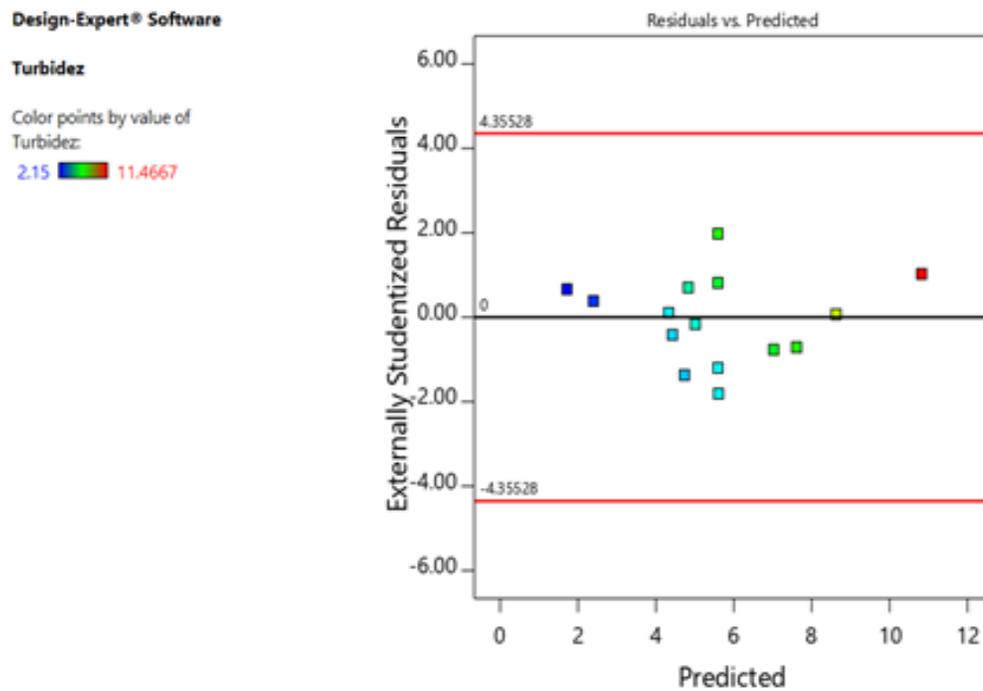


Figura 33

Los residuales externamente estudentizados vs los valores predichos en el pH

Design-Expert® Software

pH

Color points by value of pH:
5.05667 7.345

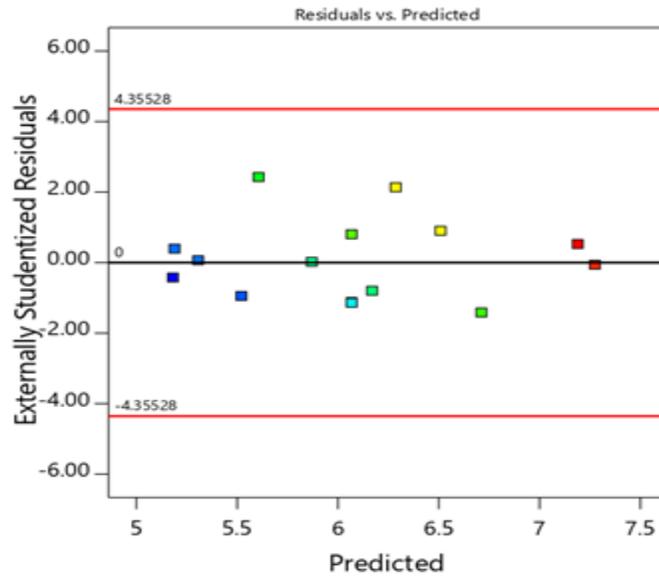


Figura 34 Los residuales externamente estudentizados vs los valores predichos en la conductividad

Design-Expert® Software

Conductividad

Color points by value of Conductividad:
233 378.456

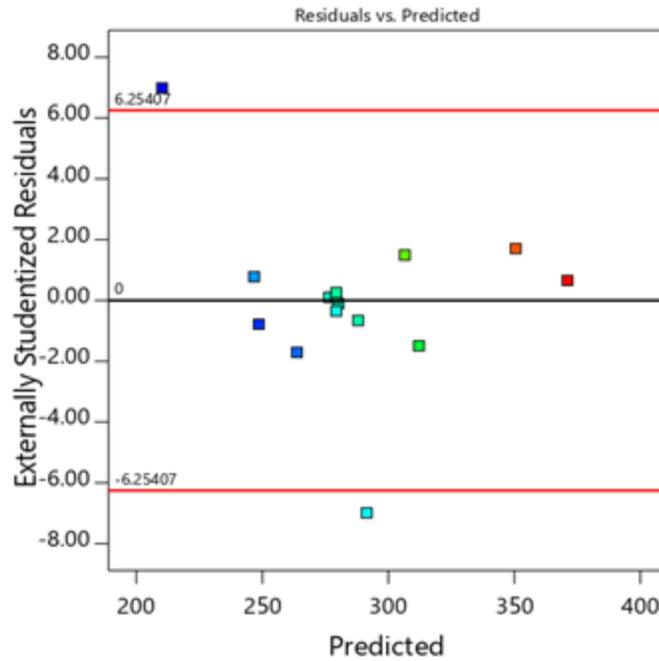
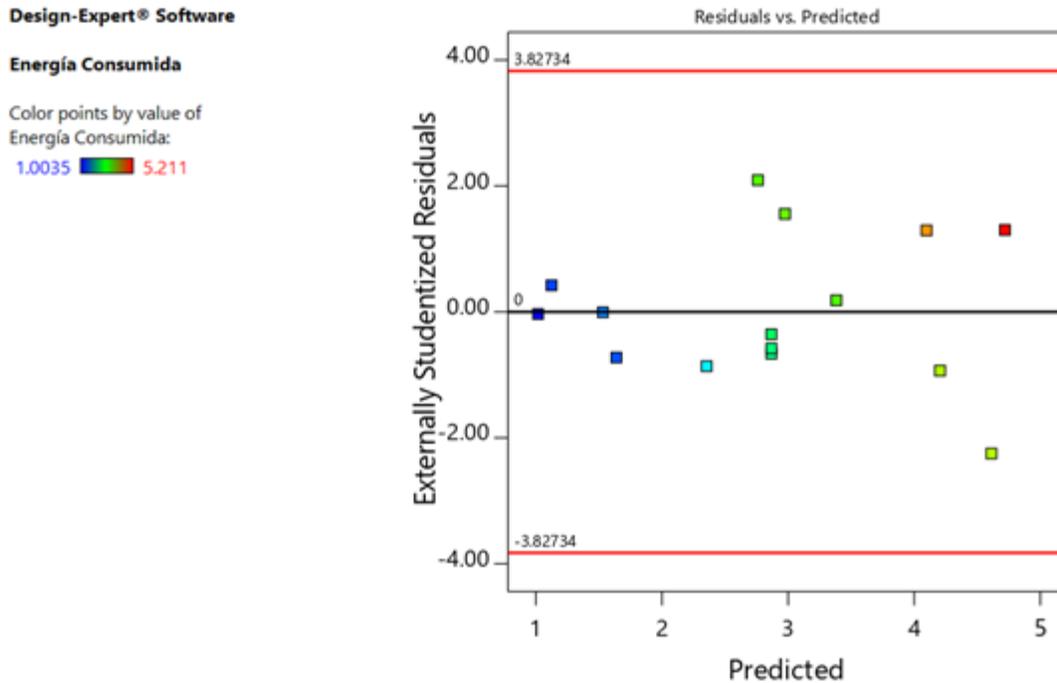


Figura 35

Los residuales externamente estudentizados vs los valores predichos en la energía consumida



5.2.3. Análisis de la varianza (ANOVA)

Para llevar a cabo el análisis estadístico, se aplicó el enfoque de análisis paso a paso, lo que permitió desglosar el proceso en etapas distintas y obtener resultados detallados. Este método proporcionó una estructura sistemática que facilitó la interpretación de los datos y la identificación de patrones significativos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a través de este enfoque de análisis paso a paso:

Tabla 12.**Análisis ANOVA modelo lineal para la Turbidez**

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	F-value	p-value
Model	72.55	6	12.09	13.23	0.00
A-Concentración FeSO ₄	1.44	1	1.44	1.57	0.25
B-Tiempo	8.24	1	8.24	9.02	0.02
C-Voltaje	39.83	1	39.83	43.58	0.00
AB	1.34	1	1.34	1.46	0.26
AC	5.99	1	5.99	6.56	0.03
BC	15.71	1	15.71	17.19	0.00
Residual	7.31	8	0.91		
Lack of Fit	3.63	6	0.61	0.33	0.88
Pure Error	3.68	2	1.84		
Cor Total	79.86	14			

El software generó un valor F para el modelo de 13.2286, con un valor de p menor a 0.05. Este resultado revela que el modelo tiene una significancia estadística importante en la explicación del proceso analizado. Este hallazgo subraya la utilidad del modelo en la comprensión y predicción de los fenómenos estudiados, proporcionando una base sólida para las conclusiones derivadas del análisis.

Tabla 13**Análisis R^2 , R^2_{pred} y R^2_{adj}**

R^2	R^2 ajustado	R^2 predicho	Precisión adecuada	Desv. Estand.	Media	C.V. %
0.9084	0.8398	13.9444	0.7322	0.9560	5.59	17.09

Se nota que el valor de R^2_{pred} , que asciende a 13.9444, está en concordancia razonable con el valor de R^2_{adj} , que es de 0.8398. Este hallazgo sugiere que el modelo tiene un ajuste global adecuado, lo que significa que explica aproximadamente el 98% de la variabilidad en el proceso estudiado. El valor de "Precisión Adecuada" evalúa la relación entre la señal y el ruido en el modelo. Se considera deseable un valor mayor a 4 para esta relación. En este caso, se observa que la razón es de 0.7322, indicando una señal adecuada en el modelo. Basándonos en estos resultados, se concluye que el modelo es apropiado para su utilización en el modelado del espacio de diseño, proporcionando una herramienta confiable para la comprensión y predicción del proceso estudiado. La ecuación del modelo de ajuste para el %remoción de turbidez, está dado por:

$$\begin{aligned} \text{Turbidez} = & 5.5949 + 0.4238 \cdot \text{Concentración de FeSO}_4 \\ & - 1.0150 \cdot \text{Tiempo} - 2.2313 \cdot \text{Voltaje} - 0.5783 \cdot \text{Concentración de} \\ & \text{FeSO}_4 \cdot \text{Tiempo} + 1.2242 \cdot \text{Concentración de FeSO}_4 \cdot \text{Voltaje} \\ & + 1.9817 \cdot \text{Tiempo} \cdot \text{Voltaje} \end{aligned}$$

Tabla 14.

Análisis ANOVA modelo lineal para el pH

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	F-value	p-value
Modelo	6.069	6	1.012	5.557	0.015
A-Concentración FeSO ₄	0.397	1	0.397	2.180	0.178
B-Tiempo	0.871	1	0.871	4.784	0.060
C-Voltaje	0.118	1	0.118	0.648	0.444
AB	1.712	1	1.712	9.404	0.015
AC	1.175	1	1.175	6.458	0.035
BC	1.796	1	1.796	9.869	0.014

Residual	1.456	8	0.182		
Lack of Fit	1.033	6	0.172	0.814	0.643
Pure Error	0.423	2	0.212		
Cor Total	7.525	14			

El valor F del modelo generado por el software es de 5.5570, con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Este resultado sugiere que el modelo es estadísticamente significativo para explicar el proceso en cuestión. Esto implica que las variables incluidas en el modelo tienen un impacto significativo en el resultado del proceso estudiado. La significancia estadística del modelo indica que las relaciones identificadas entre las variables predictoras y la variable de respuesta no son resultado del azar, sino que realmente representan una influencia sobre el proceso en consideración. Este hallazgo proporciona una base sólida para confiar en la utilidad del modelo para comprender y predecir el fenómeno estudiado.

Tabla 15

Análisis R^2 , R^2_{pred} y R^2_{adj}

R^2	R^2 ajustado	R^2 predicho	Precisión adecuada	Desv. Estand.	Media	C.V. %
0.8065	0.6614	7.1813	0.2660	0.4266	6.0679	7.0310

El análisis revela que el valor de R^2_{pred} , que es de 7.1813, muestra una considerable coherencia con el valor de R^2_{adj} , que es de 0.6614. Además, que el ajuste global del modelo es satisfactorio, lo que sugiere que el modelo es capaz de explicar hasta el 96% de la variabilidad del proceso estudiado. El valor de "Precisión Adecuada", que evalúa la relación entre la señal y el ruido en el modelo, es de 0.2660, lo que indica una señal adecuada en comparación

con el ruido. Estos resultados sugieren que el modelo tiene una buena capacidad para representar y predecir el comportamiento del sistema estudiado en el espacio de diseño. En conclusión, el análisis respalda la utilidad del modelo para propósitos de modelamiento en el contexto del diseño experimental.

La ecuación del modelo de ajuste para el pH, está dado por:

$$\begin{aligned} \text{pH} = & 6.07 - 0.2227 * \text{Concentración de FeSO}_4 + 0.3299 * \text{Tiempo} \\ & - 0.1214 * \text{Voltaje} - 0.6542 * \text{Concentración de FeSO}_4 * \text{Tiempo} - \\ & 0.5421 * \text{Concentración de FeSO}_4 * \text{Voltaje} \\ & - 0.6702 * \text{Tiempo} * \text{Voltaje} \end{aligned}$$

Tabla 16.

Análisis ANOVA modelo lineal para el Conductividad

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	F-value	p-value
Modelo	21970.830	9.000	2441.203	5.446	0.038
A-Concentración FeSO ₄	3608.081	1.000	3608.081	8.049	0.036
B-Tiempo	3933.254	1.000	3933.254	8.775	0.031
C-Voltaje	2996.309	1.000	2996.309	6.685	0.049
AB	3534.065	1.000	3534.065	7.884	0.038
AC	756.250	1.000	756.250	1.687	0.251
BC	408.471	1.000	408.471	0.911	0.384
AÂ ²	2977.858	1.000	2977.858	6.643	0.050
BÂ ²	2584.385	1.000	2584.385	5.766	0.062
CÂ ²	687.859	1.000	687.859	1.535	0.270
Residual	2241.225	5.000	448.245		
Lack of Fit	2169.003	3.000	723.001	20.022	0.048
Pure Error	72.222	2.000	36.111		
Cor Total	24212.055	14.000			

El valor F del modelo obtenido por el software es 5.45 con un valor de $p < 0.05$, lo cual indica que el modelo es significativo para explicar el proceso.

Tabla 17

Análisis R^2 , R^2_{pred} y R^2_{adj}

R^2	R^2 ajustado	R^2 predicho	Precisión adecuada	Desv. Estand.	Media	C.V. %
0.9074	0.7408	9.3035	-0.4400	21.1718	285.5767	7.4137

Se observa que el valor de R^2_{pred} , que es de 9.3035, muestra una razonable coherencia con el valor de R^2_{adj} , que es de 0.74. Además, que el ajuste global del modelo es satisfactorio, lo que sugiere que el modelo es capaz de explicar hasta el 96% de la variabilidad del proceso estudiado. El valor de "Precisión Adecuada", que evalúa la relación entre la señal y el ruido en el modelo, es de -0.44, lo que indica una señal adecuada en comparación con el ruido. Estos resultados sugieren que el modelo tiene una buena capacidad para representar y predecir el comportamiento del sistema estudiado en el espacio de diseño. En conclusión, el análisis respalda la utilidad del modelo para propósitos de modelamiento en el contexto del diseño experimental.

La ecuación del modelo de ajuste para la conductividad, está dado por:

$$\begin{aligned} \text{Conductividad} = & 279.333 - 21.2370 * \text{Concentración de FeSO}_4 + \\ & 22.1733 * \text{Tiempo} - 19.3530 * \text{Voltaje} - 29.7240 * \text{Concentración} \\ & \text{de FeSO}_4 * \text{Tiempo} - 13.7500 * \text{Concentración de FeSO}_4 \\ & * \text{Voltaje} - 10.1053 * \text{Tiempo} * \text{Voltaje} - 28.3990 * \text{Concentración} \\ & \text{de FeSO}_4 * (\text{Concentración de FeSO}_4)^2 + \\ & 26.4563 * \text{Tiempo} * (\text{Concentración de FeSO}_4)^2 \\ & + 13.6490 * \text{Voltaje} * (\text{Concentración de FeSO}_4)^2 \end{aligned}$$

Tabla 18**Análisis ANOVA modelo lineal para la energía consumida**

Source	Sum of	df	Mean	F-value	p-value
Model	20.09	3	6.70	30.16	0.000
A-Concentración FeSO ₄	0.33	1	0.33	1.49	0.247
B-Tiempo	18.98	1	18.98	85.50	0.000
C-Voltaje	0.77	1	0.77	3.48	0.089
Residual	2.44	11	0.22		
Lack of Fit	2.43	9	0.27	49.80	0.020
Pure Error	0.01	2	0.01		
Cor Total	22.53	14			

El valor F del modelo obtenido por el software es 30.16 con un valor de $p < 0.05$, lo cual indica que el modelo es significativo para explicar el proceso.

Tabla 19**Análisis R², R²pred y R²adj**

R ²	R ² ajustado	R ² predicho	Precisión adecuada	Desv. Estand.	Media	C.V. %
0.8916	0.8620	15.2155	0.7766	0.4712	2.87	16.43

Se observa que el valor de R^2_{pred} , que es de 15.2155, muestra una razonable coherencia con el valor de R^2_{adj} , que es de 0.8620. Además, el valor de "Precisión Adecuada", que evalúa la relación entre la señal y el ruido en el modelo, es de 0.7766, lo que indica una señal adecuada en comparación con el ruido. Estos resultados sugieren que el modelo tiene una buena capacidad para representar y predecir el comportamiento del sistema estudiado en el espacio de diseño. En conclusión, el análisis respalda la utilidad del modelo para propósitos de modelamiento en el contexto del diseño experimental.

5.3. Otro tipo de resultados estadísticos, de acuerdo a la naturaleza del problema y la Hipótesis

Este apartado no se está desarrollando completamente debido al nivel de investigación actual. Aunque los resultados son prometedores y proporcionan una base sólida para comprender la eficacia del proceso de tratamiento de agua, es importante reconocer que aún existen áreas que requieren una exploración más profunda y detallada. Para empezar, sería beneficioso realizar un análisis más exhaustivo de los efectos de los diferentes parámetros de operación, como la dosis de reactivo, el tiempo de reacción, la velocidad de agitación, entre otros, en la eficiencia del proceso. Esto podría ayudar a identificar con mayor precisión los rangos óptimos de estos parámetros y permitir una optimización más precisa del sistema de tratamiento. Además, se necesita una evaluación más detallada del rendimiento del sistema en condiciones variables y en escenarios más cercanos a la realidad. Esto implica estudiar la efectividad del tratamiento en aguas con diferentes niveles y tipos de contaminantes, así como en condiciones ambientales diversas.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Hipotesis general

El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye en la remoción de contaminantes en aguas eutrofizadas de la laguna Patarcocha, Pasco

Hipótesis específica 1

H₀: El voltaje del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles no influye sobre la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.

H₁: El voltaje del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye sobre la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 14, se observa que el voltaje exhibe una significancia estadística con un nivel de $p < 0.05$ en relación con el indicador de turbidez. En consecuencia, ***se procede a rechazar la Hipótesis Nula (H₀) y a aceptar la hipótesis alternativa.*** Esto sugiere que el voltaje posee un efecto significativo como componente operativo del electrocoagulador, con un nivel de significancia de $p < 0.05$.

Hipótesis específica 2

H₀: El tiempo de operación del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles no influye sobre la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.

H₁: El tiempo de operación del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye sobre la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 14, se observa que el tiempo exhibe una significancia estadística con un nivel de $p < 0.05$ en relación con el indicador de turbidez. En consecuencia, ***se procede a rechazar la Hipótesis Nula (H₀) y a aceptar la hipótesis alternativa.*** Esto sugiere que el tiempo posee un efecto significativo como componente operativo del electrocoagulador, con un nivel de significancia de $p < 0.05$.

Hipótesis específica 3

H₀: La concentración de sulfato de hierro del sistema de electrocoagulación no influye sobre la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.

H₁: La concentración de sulfato de hierro del sistema de electrocoagulación influye sobre la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.

Según los resultados presentados en las Tablas 14 y 16, se evidencia que la concentración de Fe_2SO_4 no presenta una significancia estadística, ya que su valor de p es mayor que 0.05, en relación con los indicadores de turbidez y pH. Por lo tanto, ***se procede a aceptar la Hipótesis Nula (H0) y rechazar la Hipótesis Alternativa (H1)***. Estos hallazgos sugieren que, en el contexto analizado, la concentración de Fe_2SO_4 no ejerce un efecto significativo sobre la turbidez ni el pH del sistema estudiado. Es importante considerar estos resultados al interpretar y diseñar futuros experimentos, así como en la implementación práctica de procesos que involucren la utilización de Fe_2SO_4 .

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares.

Este estudio muestra un aumento notable en la concentración de sólidos suspendidos desde las primeras dos muestras hasta las dos últimas. Las concentraciones en las muestras 1 (46 mg/L) y 2 (44 mg/L) son significativamente más altas que la muestra 1 (40 mg/L), lo que sugiere una posible fuente de contaminación o un cambio en las condiciones del agua durante el muestreo. De igual manera, la concentración de amoníaco incrementa de forma considerable en las muestras 1 (19.6 mg/L), y 2 (19.5 mg/L), comparadas con las muestras 3 (18.9 mg/L), y 4 (18.7 mg/L), lo que podría atribuirse a vertidos de aguas residuales o a actividades agrícolas. La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) indica la cantidad de materia orgánica en el agua que puede ser descompuesta por microorganismos, siendo la muestra 2 (99.4 mg/L) la de mayor incremento en comparación con la muestra 1 (7.4 mg/L). Sin embargo Poma y Quispe (2016) reportó como resultados porcentajes de remoción de los indicadores de los contaminantes de las aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación son 85,9% para DBO, 75,3% para DQO, 93,8 % para aceites y grasas, 89,5% para conductividad eléctrica, 79,6% para turbiedad, 95,3% para sólidos totales,

91,0% para sólidos suspendidos, 91,3% para sólidos disueltos, 70,3% para dureza total, 91,3% para dureza cálcica, 91,9% para cloruros, 100,0% para coliformes totales y 98,9% para escherichia coli.

Los hallazgos de este estudio son prometedores y destacan la efectividad del proceso de tratamiento evaluado en la reducción de contaminantes del agua. Al identificar el rango óptimo de dosis de hierro para un intervalo de pH de 5 a 6 unidades, se proporciona información valiosa que puede guiar la optimización de los parámetros de operación en futuros diseños de sistemas de tratamiento de agua. Es particularmente alentador el porcentaje máximo de eliminación de turbidez del 95.74% y la eficacia máxima de reducción de la conductividad del 84.76%, lo que demuestra la capacidad del tratamiento para eliminar eficazmente los contaminantes presentes en el agua. Además, el hecho de que se haya logrado un pH promedio de 6.07 indica un adecuado control del proceso, ya que se mantuvo dentro de un rango óptimo para la efectividad de la coagulación. Es importante destacar el bajo consumo mínimo de energía registrado, de tan solo 1.00 kW/s (Tabla 10) , lo que sugiere una eficiencia energética del proceso. Esta eficiencia energética es crucial para garantizar la viabilidad y sostenibilidad a largo plazo del sistema de tratamiento de agua, ya que reduce los costos operativos y la huella ambiental asociada con el proceso.

Por otro lado, según lo informado en otros estudios, como el de Wang et al. (2023), se encontró que la tasa de eliminación de DQO aumentaba casi de manera lineal con la corriente de salida y el caudal de ERS cuando se utilizaba un ánodo de Ti/Ti_4O_7 . Sin embargo, condiciones operativas excesivas resultaron en un aumento lento o incluso en una disminución de η_{DQO} cuando se empleaban ánodos de Ti/IrO_2-RuO_2 o Ti/PbO_2 . Se observaron hallazgos similares en esta investigación al utilizar ánodos de aluminio. Por otro lado, la

perspectiva sobre cómo el voltaje (V) y la concentración de Fe_2SO_4 (mg/L) impactan en la remoción de la turbidez del agua tratada. Se observa que la eliminación de la turbidez tiende a disminuir en un rango de voltaje más alto, particularmente entre 25 y 30 V (Figura 14). Esto sugiere que, a medida que se incrementa el voltaje dentro de este rango, la eficacia en la remoción de la turbidez puede verse comprometida. A su vez, se aprecia que concentraciones más bajas de Fe_2SO_4 favorecen la eliminación de la turbidez, lo que indica que dosis más bajas de este reactivo pueden ser efectivas en el proceso de tratamiento. Yang et al.(2022) también informaron sobre la eliminación de fosfato en efluentes secundarios de aguas residuales domésticas, logrando una eficiencia de remoción del $98\% \pm 2\%$, donde se eliminaron eficientemente 1.3 mg/L de fosfato tanto en el proceso Fe-EC con baja concentración de OD como en el de alta concentración. Así también, Parmentier et al. (2020) observaron bajos consumos energéticos, registrando 2,0 kWh/kg para el hierro y 1,1 kWh/kg con corrientes bajas (0,8 A para hierro y 0,3 A para aluminio). Este hallazgo sugiere la eficiencia energética de los procesos de electrocoagulación, particularmente a corrientes más bajas, lo que puede ser clave para la implementación económica y sostenible de estas tecnologías en el tratamiento de aguas residuales.

Al analizar los efectos del tiempo y la concentración de Fe_2SO_4 en el pH, se observan patrones interesantes. Se evidencia que el tiempo tiene un efecto inverso en el aumento del pH cuando se utilizan concentraciones bajas de Fe_2SO_4 (500 mg/L). En contraste, al emplear concentraciones más altas de Fe_2SO_4 y tiempos más cortos (30 segundos), el pH tiende a ser ligeramente ácido, posiblemente debido a una rápida reacción de los agentes coagulantes. Por otro lado, para tiempos más prolongados (90 segundos), se observa una disminución más notable del pH, lo que sugiere una mayor influencia de la

formación de especies ácidas o ácidos débiles en el sistema de tratamiento. Estos hallazgos subrayan la complejidad de la interacción entre el tiempo de tratamiento, la concentración de reactivo y el pH en el proceso de electrocoagulación, y resaltan la necesidad de un cuidadoso control de estos parámetros para lograr un tratamiento óptimo del agua. Así mismo, Inan & Alaydin (2014) observaron que el aumento del pH mejoró las eficiencias de eliminación de fosfato en proporciones molares de nutrientes específicas. Se encontró que la eficiencia de eliminación de fosfato fue de aproximadamente 98% a un pH de 8 para una relación molar de hierro/nutriente de 1:1. En contraste, la eliminación de nitrógeno fue significativamente menor, alcanzando solo un 21% a pH 8 para una relación molar de hierro/urea de 4:1. **Respecto a la eliminación de carbono orgánico total (TOC), se logró una eficiencia del 26% en el proceso.** Estos resultados destacan la influencia del pH y la relación molar de nutrientes en la eficacia de la electrocoagulación para la eliminación de diferentes contaminantes, lo que sugiere la importancia de ajustar estos parámetros para optimizar el rendimiento del proceso en aplicaciones específicas de tratamiento de aguas residuales.

Sin embargo Diego y Mas (2019) observaron reducciones significativas del 66.61% para la DQO y del 79.5% para el Cr^{+3} , lo que destaca la eficacia del proceso de electrocoagulación en la remoción de estos contaminantes. En términos de consumo energético, se registraron valores de 36.58 kWh/m³ cuando se combinó la electrocoagulación (EC) con la energía fotovoltaica (PFV), y de 43.93 kWh/m³ solo con la EC. Es importante destacar que estos resultados sugieren una mejora en la eficiencia energética al integrar la energía fotovoltaica al proceso de electrocoagulación. Específicamente, a un pH de 8 y una densidad de corriente de 28.51 mA/cm², se logró una notable reducción del 71.48% para la DQO y del 99.17% para el Cr^{+3} .

En nuestro estudio, al mantener un voltaje constante de 20 V y un tiempo intermedio de 60 segundos, se observó una reducción en la conductividad cuando se empleó una concentración elevada de Fe_2SO_4 (1000 mg/L). Además, al considerar la interacción entre un tiempo corto (30 segundos) y una concentración baja de Fe_2SO_4 (500 mg/L), se obtuvieron valores aún menores de conductividad. Esto sugiere que aumentar la cantidad de Fe_2SO_4 puede ser una medida efectiva para mejorar la disminución gradual de la conductividad, manteniendo constante el voltaje (20 V). Comparativamente, Pacheco (2019) investigó el uso de electrodos de hierro y aluminio espaciados a 1.5 cm de distancia entre sí. Se llevaron a cabo experimentos con tres niveles de voltaje: 2, 4 y 6 voltios, para analizar cómo la intensidad eléctrica afecta la generación de coagulantes y la eficiencia global en la remoción de colorantes. Cada prueba tuvo una duración de 30 minutos. Los resultados revelaron una alta remoción de colorantes, con eficiencias de remoción entre el 93.5% y el 97.5% en un pH alcalino (PH_{10}), y entre el 18% y el 86.5% en un pH ácido (PH_3). Es importante destacar que también se confirmó que la energía proporcionada por el panel solar fue adecuada para el sistema de electrocoagulación, asegurando su funcionamiento eficiente. Mientras que Monge y Arroyo (2021) reportaron diferentes variables operativas, incluyendo el flujo de 100 mL/s y 150 mL/s, el potencial eléctrico de 4V y 7.4V, y el volumen de 1000 mL y 3000 mL. Los resultados mostraron que los parámetros más adecuados fueron un flujo de 150 mL/s, un potencial eléctrico de 7.4V y un volumen de 3000 mL. Estas condiciones condujeron a una mayor remoción de la dureza total, con un porcentaje de reducción del 24.61%. En particular, la dureza total promedio se redujo significativamente, pasando de 534.355 a 427.70 (mgCaCo₃). Estos hallazgos resaltan la importancia de optimizar las variables operativas para mejorar la eficiencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de contaminantes del agua.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

El autor del presente trabajo de investigación declara que cumple fielmente con el código de ética de investigación de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por RDU N° 210-2017-CU y el Código Nacional de la Integridad Científica del Concytec. Además, posee la Certificación de Conducta Responsable en Investigación (CRI) emitida por el CONCYTEC.

VII. CONCLUSIONES

- Además de la influencia destacada del voltaje en el proceso de remoción de contaminantes en las aguas eutrofizadas mediante electrocoagulación con electrodos móviles, es crucial considerar la relación de reducción de Fe/agua eutrofizada, que se ha encontrado ser igual o menor a 1. Esta relación sugiere que la cantidad de hierro utilizado en el proceso de electrocoagulación es suficiente para tratar eficazmente el volumen de agua eutrofizada. Este hallazgo refuerza la viabilidad y eficiencia de utilizar la electrocoagulación con electrodos móviles como método para tratar aguas eutrofizadas, ya que se logra una relación de reducción equilibrada que garantiza la remoción adecuada de contaminantes sin exceder la cantidad necesaria de reactivos químicos.
- Los resultados obtenidos destacan que el tiempo de operación del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles ejerce una influencia significativa en la remoción de contaminantes presentes en las aguas eutrofizadas. Esta observación resalta la importancia de considerar la duración del proceso de tratamiento para garantizar una remoción efectiva de los contaminantes. Los datos recabados sugieren que períodos de operación más prolongados pueden conducir a una mayor eficacia en la eliminación de impurezas, lo que indica la necesidad de optimizar el tiempo de tratamiento para maximizar los resultados deseados. Esta relación entre el tiempo de operación y la eficiencia de remoción de contaminantes subraya la importancia de un control preciso y una gestión cuidadosa de los parámetros operativos en los sistemas de electrocoagulación.
- El estudio revela que la dosificación de Fe/agua eutrofizada emerge como un factor determinante en la reducción de contaminantes presentes en el agua eutrofizada mediante el proceso de electrocoagulación. Esta observación resalta la importancia de una dosificación precisa de hierro en

relación con el volumen y las características del agua tratada para lograr una remoción efectiva de los contaminantes. La influencia significativa de la dosificación de Fe/agua eutrofizada subraya la necesidad de un diseño cuidadoso y una optimización precisa de los parámetros de tratamiento, que incluyen la concentración de hierro, para maximizar la eficiencia del proceso de electrocoagulación. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para el desarrollo de estrategias de tratamiento más efectivas y eficientes para abordar la problemática de la eutrofización y la contaminación del agua en entornos ecosistémicos vulnerables.

VIII. RECOMENDACIONES

- Investigar el comportamiento de la polaridad de los electrodos cilíndricos, así como los posibles campos que se forman.
- Implementar el tratamiento electro-sinérgico a un sistema continuo.
- Analizar la calidad del agua tratada para todos los parámetros físico-químicos y metales pesados.
- Realizar análisis SEM, DRX y otros, para determinar la composición elemental y estructuras morfológicas que se forman en los lodos y espumas.
- Realizar más experimentos con otros materiales como hierro, grafito, titanio, etc., a fin de realizar comparaciones.
- Implementar un limpiador de espuma en la superficie de la zona flotante, derivándolo a una cubeta para su posterior disposición.
- Emplear energía de fuentes renovables como la solar o eólica, implementando un panel fotovoltaico o generador eólico

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABDEL-KADER, A.M., 2013. Studying the efficiency of grey water treatment by using rotating biological contactors system. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 25, no. 2, ISSN 1018-3639.
- ANA, 2016. R.J. N° 010-2016-ANA .- «Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales». . Perú, Lima:
- ANA, 2020. Glosario de terminos utilizados en la Ley de Recursos Hidricos N° 29338 y en su reglamento (D.S N° 001 - 2010 - AG). ,
- APHA, 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23 Edition. S.l.: s.n.
- ARANGO RUIZ, A. y GARCÉS GIRALDO, L.F., 2007. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, vol. 43, no. 147, ISSN 0120-341X.
- AZARIAN, G.H., MESDAGHINIA, A.R., VAEZI, F., NABIZADEH, R. y NEMATOLLAHI, D., 2007. Algae removal by electro-coagulation process, application for treatment of the effluent from an industrial wastewater treatment plant. *Iranian Journal of Public Health*, vol. 36, no. 4, ISSN 2251-6093.
- BABBIE, E., 2000. *Fundamentos de la investigación social*. ,
- BECOUCHE-LAREURE, C., DEMBÉLÉ, A., COQUERY, M., CREN-OLIVÉ, C. y BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L., 2019. Assessment of 34 dissolved and particulate organic and metallic micropollutants discharged at the outlet of two contrasted urban catchments. *Science of The Total Environment*, vol. 651, ISSN 00489697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.10.042.
- BEHAR, D., 2008. *Introducción a la metodología de la investigación*. sf: Edición: A. 2008. S.l.: Rubeira.
- BOMAN, B.J., WILSON, P.C. y ONTERMAA, E.A., 2002. *Understanding water*

- quality parameters for citrus irrigation and drainage systems. *Univ. of Florida IFAS Extension, Circ*, vol. 1406,
- BRASINGTON, J. y RICHARDS, K., 2000. Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills. *Hydrological Processes*, vol. 14, no. 14, ISSN 08856087. DOI 10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2559::AID-HYP114>3.0.CO;2-E.
- BRILLAS, E. y MARTÍNEZ-HUITLE, C.A., 2015. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review. *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 166, ISSN 0926-3373.
- BURKHOLDER, J.M. y GLIBERT, P.M., 2022. Eutrophication and oligotrophication. ,
- CAMARGO MONTES, C., 2015. *Recuperación de fósforo del lactosuero ácido residual mediante el proceso de electrocoagulación a nivel de laboratorio Distrito de Yanacancha–Junín*. S.l.: Universidad Alas Peruanas.
- CAÑIZARES-VILLANUEVA, R.O., FERRERA-CERRATO, R., ROJAS-AVELIZAPA, N.G., POGGI-VARALDO, H.M. y ALARCÓN, A., 2006. Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista latinoamericana de Microbiología*, vol. 48, no. 2,
- CASTELLANOS-ESTUPINAN, M.A., SANCHEZ-GALVIS, E.M., GARCIA-MARTINEZ, J.B., BARAJAS-FERREIRA, C., ZUORRO, A. y BARAJAS-SOLANO, A.F., 2018. Design of an electroflotation system for the concentration and harvesting of freshwater microalgae. *Chemical Engineering Transactions*, vol. 64, ISSN 2283-9216.
- CHEN, G., 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and purification Technology*, vol. 38, no. 1, ISSN 1383-5866.
- CHEN, L., ZHAO, J., ZHANG, Z., SHEN, Z., DONG, W., MA, R., CHEN, J.,

- NIU, L., CHEN, S., WU, D., LIU, J. y ZHOU, A., 2022. Lake eutrophication in northeast China induced by the recession of the East Asian summer monsoon. *Quaternary Science Reviews*, vol. 281, ISSN 0277-3791. DOI <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107448>.
- CONDORCHEM, 2021. La electrocoagulación, un tratamiento económico y eficaz para las aguas residuales. ,
- CORONEL HUAMÁN, K.S. y VILA VERA, G.E., 2013. *Remoción de contaminantes de las agua residuales urbanas del colector Parra del Riego por el método de electrocuagulación mediante paneles fotovoltaicos, a nivel de laboratorio*. S.l.: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- CRESCENTINI, M., BENNATI, M. y TARTAGNI, M., 2011. Integrated and autonomous conductivity-temperature-depth (CTD) sensors for environmental monitoring. *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, ISSN 15483746. DOI 10.1109/MWSCAS.2011.6026396.
- CRONQUIST, A., 1993. *Introducción a la botánica. 2da*. S.l.: s.n.
- CUBA JIMÉNEZ, I.A. y CHAMBI CANAHUIRE, F.G., 2018. Remoción de iones cromo, níquel y zinc de efluentes de la industria galvánica usando técnica de electrocoagulación. ,
- CUSICHE PÉREZ, L.F. y MIRANDA ZAMBRANO, G.A., 2019. Contaminación por aguas residuales e indicadores de calidad en la reserva nacional 'Lago Junín', Perú. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 10, no. 6, ISSN 2007-0934.
- DÁVILA ALCÁNTARA, Y.G., 2013. *Remoción de coliformes fecales a través de microorganismos eficaces (em) en el agua de la laguna patarcocha del distrito de Chaupimarca, Cerro De Pasco-Pasco 2013*. S.l.: Universidad César Vallejo.
- DIAZ MEDINA, A.C. y SOTOMAYOR MAGUIÑA, L.F., 2013. *Evaluación de la*

- eutrofización de la laguna Conococha–Ancash*. S.l.: Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo.
- DIEGO PÉREZ, A.S. y MAS MARTÍNEZ, J.A., 2019. *Influencia de la densidad de corriente y ph, para evaluar la remoción del Cr+ 3 y DQO en efluente de etapa de curtido, mediante electrocoagulación fotovoltaica*. S.l.: Universidad Nacional de Trujillo.
- ECKENFELDER, W.W. y CECIL, L.K., 2013. *Applications of New Concepts of Physical-Chemical Wastewater Treatment: Vanderbilt University, Nashville, Tennessee September 18-22, 1972*. S.l.: Elsevier. vol. 1. ISBN 1483187071.
- EL PERUANO, 2014. *Ley de mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos*. 2014. S.l.: s.n.
- ENGINEERS, S.C.S., 1978. *Contaminants associated with direct and indirect reuse of municipal wastewater*. S.l.: Health Effects Research Laboratory, Office of Research and Development, US
- EQUIPO EDITORIAL, E., 2023. Hierro. ,
- FRANCO, D., LEE, J., ARBELAEZ, S., COHEN, N. y KIM, J.-Y., 2017. Removal of phosphate from surface and wastewater via electrocoagulation. *Ecological engineering*, vol. 108, ISSN 0925-8574.
- GAO, S., YANG, J., TIAN, J., MA, F., TU, G. y DU, M., 2010. Electrocoagulation–flotation process for algae removal. *Journal of hazardous materials*, vol. 177, no. 1-3, ISSN 0304-3894.
- GARCIA-SEGURA, S., EIBAND, M.M.S.G., DE MELO, J.V. y MARTÍNEZ-HUITLE, C.A., 2017. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 801, no. July, ISSN 15726657. DOI 10.1016/j.jelechem.2017.07.047.

- GHERNAOUT, D. y ELBOUGHDIRI, N., 2020. Electrocoagulation process in the context of disinfection mechanism. *Open Access Library Journal*, vol. 7, no. 2,
- GIGA, M., 2023. HIERRO - Definición - Significado. ,
- GOUVEIA, L., 2011. *Microalgae as a Feedstock for Biofuels*. S.l.: Springer. ISBN 3642179967.
- GUALDRÓN DURÁN, L.E., 2016. *Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos*. S.l.: Universidad Libre.
- GUERE CHUQUILLANQUI, J.R., 2017. *Recuperación material y legal de la laguna de Patarcocha, incide en la contaminación ambiental del distrito de Chaupimarca, Pasco 2016*. S.l.: UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO.
- HAKIZIMANA, J.N., GOURICH, B., CHAFI, M., STIRIBA, Y., VIAL, C., DROGUI, P. y NAJA, J., 2017. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, vol. 404, ISSN 0011-9164.
- HAWARI, A.A., YADAV, S., SALEEM, H., IBRAR, I., NAJI, O., ALANEZI, A.A., ZAIDI, S.J., ALTAEE, A. y ZHOU, J., 2020. Recent developments in forward osmosis membranes using carbon-based nanomaterials. *Desalination*, vol. 482, ISSN 00119164. DOI 10.1016/j.desal.2020.114375.
- HAWKINS, P.R. y GRIFFITHS, D.J., 1993. Artificial destratification of a small tropical reservoir: effects upon the phytoplankton. *Hydrobiologia*, vol. 254, ISSN 0018-8158.
- HOSSAIN, M., MAHMUD, I., PARVEZ, S. y CHO, H.M., 2013. Impact of current density, operating time and pH of textile wastewater treatment by electrocoagulation process. *Environmental Engineering Research*, vol. 18, no. 3, ISSN 1226-1025.

- İLİLERİ, B., AYYILDIZ, Ö., İREM, D. y YALÇIN, M., 2017. Deri Atıksuyunun Sono-Elektrokimyasal Arıtımı. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 3, no. 1, ISSN 2459-1580.
- İNAN, H. y ALAYDIN, E., 2014. Phosphate and nitrogen removal by iron produced in electrocoagulation reactor. *Desalination and Water Treatment*, vol. 52, no. 7-9, ISSN 1944-3994. DOI 10.1080/19443994.2013.787950.
- INDUSTRIAPEDIA, 2020. Guía Definitiva:¿Qué es un Electrodo y cómo Funciona? ,
- KAISER, E.-A., KOHRS, K., KÜCKE, M., SCHNUG, E., HEINEMEYER, O. y MUNCH, J.C., 1998. Nitrous oxide release from arable soil: Importance of N-fertilization, crops and temporal variation. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 30, no. 12, ISSN 00380717. DOI 10.1016/S0038-0717(98)00036-4.
- KERLINGER, F. y LEE, M., 1991. Investigación del comportamiento humano. *Técnicas y metodología. 2ª Edición. Nueva Editorial Interamericana, SA México DF,*
- KHALED, B., WIDED, B., BÉCHIR, H., ELIMAME, E., MOUNA, L. y ZIED, T., 2019. Investigation of electrocoagulation reactor design parameters effect on the removal of cadmium from synthetic and phosphate industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 12, no. 8, ISSN 1878-5352. DOI <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.12.012>.
- KHAN, S.A., HUSSAIN, M.Z., PRASAD, S. y BANERJEE, U.C., 2009. Prospects of biodiesel production from microalgae in India. *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 13, no. 9, ISSN 1364-0321.
- KHATIB, W.A., AYARI, A., YASIR, A.T., TALHAMI, M., DAS, P., QUADIR, M.A. y HAWARI, A.H., 2021. Enhancing the electrocoagulation process for harvesting marine microalgae (*Tetraselmis* sp.) using interdigitated electrodes. *Journal of Environmental Management*, vol. 292, ISSN 0301-

4797.

- KIERSCH, B., MÜHLECK, R. y GUNKEL, G., 2004. Las macrófitas de algunos lagos alto-andinos del Ecuador y su bajo potencial como bioindicadores de eutrofización. *Revista de biología tropical*, vol. 52, no. 4, ISSN 0034-7744.
- KOBYA, M., CAN, O.T. y BAYRAMOGLU, M., 2003. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of hazardous materials*, vol. 100, no. 1-3, ISSN 0304-3894.
- KRENKEL, P., 2012. *Water quality management*. S.l.: Elsevier. ISBN 0323143490.
- LI, D. y LIU, S., 2019. Detection of River Water Quality. *Water Quality Monitoring and Management*. S.l.: Academic Press, pp. 211-220. ISBN 978-0-12-811330-1.
- LI, X., ZHAO, C. y ZHANG, M., 2019. Biochar for anionic contaminants removal from water. *Biochar from biomass and waste*. S.l.: Elsevier, pp. 143-160.
- LI, Y., GONG, X., ZHAO, Z., SHEN, Q. y ZHANG, L., 2022. Distribution and release of volatile organic sulfur compounds in Yangcheng Lake. *Water*, vol. 14, no. 8, ISSN 2073-4441.
- LIU, C., SHAO, S., ZHANG, L., DU, Y., CHEN, K., FAN, C. y YU, Y., 2019. Sulfur development in the water-sediment system of the algae accumulation embay area in Lake Taihu. *Water*, vol. 11, no. 9, ISSN 2073-4441.
- LIU, J., ZHANG, Q., CHEN, M., DAI, J., GU, W., WEN, S. y DU, Y., 2023. Composition of organic matter-iron-phosphorus associations in sediments of algae- and macrophyte-dominated zones in Lake Taihu. *Chemical Geology*, vol. 622, ISSN 0009-2541. DOI <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121375>.

- LOPEZ, L. y BEATRIZ, M., 2020. Identificación y valoración de impacto ambiental de la contaminación por aguas servidas a la laguna Patarcocha, Chaupimarca–Pasco, 2019. ,
- LUCAKOVA, S., BRANYIKOVA, I., KOVACIKOVA, S., PIVOKONSKY, M., FILIPENSKA, M., BRANYIK, T. y RUZICKA, M.C., 2021. Electrocoagulation reduces harvesting costs for microalgae. *Bioresource Technology*, vol. 323, ISSN 0960-8524. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124606>.
- MADER, S.S., CURTIS, H., BARNES, S., SOLOMON, E.P., BERG, R.G., MARTIN, D.W. y VILLEE, C., 2004. *Biología*. S.l.: s.n. vol. 7. ISBN 9701063767.
- MAMELKINA, M.A., COTILLAS, S., LACASA, E., SÁEZ, C., TUUNILA, R., SILLANPÄÄ, M., HÄKKINEN, A. y RODRIGO, M.A., 2017. Removal of sulfate from mining waters by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, vol. 182, ISSN 1383-5866.
- MILLA FIGUEROA, A.C., 2019. Equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de aguas de pozo. ,
- MOLINA PRIETO, L.F. y VILLEGAS RODRÍGUEZ, E., 2015. Ciudades sensibles al agua: paradigma contemporáneo para gestionar aguas urbanas. *Revista de Tecnología (Archivo)*, vol. 14, no. 1, ISSN 1692-1399.
- MONCHAMP, M.-E., SPAAK, P., DOMAIZON, I., DUBOIS, N., BOUFFARD, D. y POMATI, F., 2018. Homogenization of lake cyanobacterial communities over a century of climate change and eutrophication. *Nature ecology & evolution*, vol. 2, no. 2, ISSN 2397-334X.
- MONGE POMA, D. y ARROYO BLANCO, C.C., 2021. Evaluación de parámetros de operación de un equipo de electrocoagulación para la reducción de la dureza total a partir de agua residual proveniente de ósmosis inversa. ,

- MORALES FIGUEROA, A., 2021. Tratamiento de agua pluvial por el proceso de electrocoagulación con electrodo de aluminio. ,
- MOUSSA, D.T., EL-NAAS, M.H., NASSER, M. y AL-MARRI, M.J., 2017. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*, vol. 186, ISSN 0301-4797. DOI 10.1016/J.JENVMAN.2016.10.032.
- ÑAUPAS, H., MEHÍA, E., NOVOA, E. y VILLAGÓMEZ, A., 2014. *Metodología de la investigación Cuantitativa-cualitativa y redacción de la Tesis* [en línea]. 4 Edición. Bogotá: s.n. ISBN 978-958-762-188-4. Disponible en: http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/MetodologiaInvestigacionNaupas.pdf.
- NIDHEESH, P. V, ZHOU, M. y OTURAN, M.A., 2018. An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes. *Chemosphere*, vol. 197, ISSN 0045-6535.
- NORDBERG, G. y NORDBERG, G., 2017. *Metales: Propiedades químicas y toxicidad productos químicos* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos>.
- NOVOTNY, V.K.P. y KRENKEL, P.A., 1980. *Water Quality Management*. 1980. S.l.: Academic PreSS.
- PACHECO HEREDIA, N.L., 2019. Remoción de colorantes en soluciones acuosas sintéticas por electrocoagulación aplicando energía generada por un panel solar. ,
- PANDURO PANDURO, A.L. y ROJAS VELA, J., 2021. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES QUIMICOS EN AGUAS SERVIDAS DOMÉSTICAS USANDO MACRÓFITAS ACUÁTICAS. ,
- PANG, M., SONG, W., ZHANG, P., SHAO, Y., LI, L., PANG, Y., WANG, J. y XU, Q., 2018. Research into the eutrophication of an artificial playground lake near the Yangtze River. *Sustainability*, vol. 10, no. 3,

- PARMENTIER, D., MANHAEGHE, D., BACCINI, L., VAN MEIRHAEGHE, R., ROUSSEAU, D.P.L. y VAN HULLE, S., 2020. A new reactor design for harvesting algae through electrocoagulation-flotation in a continuous mode. *Algal Research*, vol. 47, ISSN 2211-9264. DOI <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101828>.
- PELCZAR, M.J., CHAN, E.C.S., PELCZAR, M.F. y RUMEU, C.H., 1984. *Elementos de microbiología*. S.I.: McGraw-Hill. ISBN 9684515405.
- POMA JAVIER, J.R. y QUISPE SANCA, P.A., 2016. *Remocion de contaminantes de aguas residuales urbanas por el metodo de electrocoagulacion*. S.I.: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- PRIMOST, J.E., PELUSO, M.L., SASAL, M.C. y BONETTO, C.A., 2022. Humedales en acción: Su función en la remoción de contaminantes. , ISSN 0368-0819.
- RAE, 1994. Diccionario panhispánico de dudas. *RAE*,
- RAE, 2022. Remocion. ,
- RÄUCHLE, F. y TANG, I.D., 1989. Pasivación y pasividad. *Revista de Química*, vol. 3, no. 1, ISSN 2518-2803.
- RENGIFO, I. y NEOLITA, E., 2016. *Modelo dinámico de sistemas para determinar la calidad de agua en la Laguna Patarcocha por vertimiento de aguas residuales de los Asentamiento Humanos aledaños, Pasco, 2016*. S.I.: Universidad Cesar Vallejo.
- RICCIO YAURI, L.F., 2015. *Remocion de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector Agua de las Virgenes por electrocoagulacion, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energetica un panel fotovoltaico*. S.I.: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- ROJO CRUZ, M., 2006. *Remoción de algas presentes en aguas naturales mediante el proceso de flotación*. S.I.: Universidad nacional autónoma de

méxico.

ROSALES FLORES, A. y OLMOS-MARTÍNEZ, E., 2020. *Servicios ecosistémicos en la Laguna de Coyuca, Guerrero, México una perspectiva del turismo*. S.I.: s.n.

SHESTAKOVA, M. y SILLANPÄÄ, M., 2017. Electrode materials used for electrochemical oxidation of organic compounds in wastewater. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 16, ISSN 1569-1705.

SUPRIYA, V., JOSHUA, M.S., KIRAN, B.R., GUDURU, N., POIBA, V.R. y VANGALAPATI, M., 2023. Investigation of experimental parameters and It's optimization on iron plate electrodes for the removal of phosphates by electrocoagulation process using Box–Behnken design. *Materials Today: Proceedings*, ISSN 2214-7853.

TAHREEN, A., JAMI, M.S. y ALI, F., 2020. Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. *Journal of Water Process Engineering*, vol. 37, ISSN 2214-7144.

TAY, C.J., MOHD, M.H., TEH, S.Y. y KOH, H.L., 2022. Internal phosphorus recycling promotes rich and complex dynamics in an algae-phosphorus model: Implications for eutrophication management. *Journal of Theoretical Biology*, vol. 532, ISSN 0022-5193. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2021.110913>.

TERZI, E. y VEREP, B., 2012. Effects of water hardness and temperature on the acute toxicity of mercuric chloride on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Toxicology and Industrial Health*, vol. 28, no. 6, ISSN 0748-2337. DOI 10.1177/0748233711416943.

TOSTADO-MADRID, T., BENÍTEZ-RUIZ, I., PINZÓN-NAVARRO, A., BAUTISTA-SILVA, M. y RAMÍREZ-MAYANS, J.A., 2015. Actualidades de las características del hierro y su uso en pediatría. *Acta pediátrica de México*, vol. 36, no. 3,

- TUMSRI, K. y CHAVALPARIT, O., 2011. Optimizing electrocoagulation-electroflotation process for algae removal. *2nd International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE*. S.l.: s.n., vol. 6.
- WANG, Q., LIAO, Z., YAO, D., YANG, Z., WU, Y. y TANG, C., 2021. Phosphorus immobilization in water and sediment using iron-based materials: A review. *Science of The Total Environment*, vol. 767, ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/J.SCITOTENV.2020.144246.
- YANG, Y., LI, Y., MAO, R., SHI, Y., LIN, S., QIAO, M. y ZHAO, X., 2022. Removal of phosphate in secondary effluent from municipal wastewater treatment plant by iron and aluminum electrocoagulation: Efficiency and mechanism. *Separation and Purification Technology*, vol. 286, ISSN 1383-5866. DOI <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120439>.
- ZARZA, L.F., 2023. ¿Qué es la eutrofización? ,
- ZHENG, X., DU, J., SCHMIDT, A.H., QIAO, X., POWER, A., GROSVENOR, M.J. y TANG, Y., 2022. Response of lake water nutrient condition to anthropogenic activities from 1871 to 2013 in the Jiuzhaigou World Natural Heritage Site, China. *Journal of Paleolimnology*, vol. 68, no. 4, ISSN 0921-2728.
- ZORZAL-ALMEIDA, S., SALIM, A., ANDRADE, M.R.M., DE NOVAES NASCIMENTO, M., BINI, L.M. y BICUDO, D.C., 2018. Effects of land use and spatial processes in water and surface sediment of tropical reservoirs at local and regional scales. *Science of the total environment*, vol. 644, ISSN 0048-9697.

ANEXOS

ANEXO 1. Matriz de consistencia

Tabla 20

Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	INDICE	MÉTODO	TÉCNICA
¿En qué medida el sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye en la remoción de contaminantes en aguas eutrofizadas de la laguna Patarcocha, Pasco?	Determinar la influencia del sistema electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de contaminantes en aguas eutrofizadas de la laguna Patarcocha, Pasco	El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye en la remoción de contaminantes en aguas eutrofizadas de la laguna Patarcocha, Pasco	Independiente (X1): Sistema de electrocoagulación con electrodos móviles	Según Eckenfelder y Cecil (2013) la electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificador.	Electrocoagulación con electrodos móviles (VI) se evaluará mediante los parámetros de operación (D) como el voltaje, tiempo de operación y la concentración de sulfato de hierro (I).	Parámetros de operación	Voltaje	10, 20 A/m ²	Hipotético - Deductivo	Observación experimental
							Tiempo de operación	10, 15 min		
							Concentración de sulfato de hierro	1, 2 g/L		
PROBLEMA ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS	VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSION	INDICADORES	NDICE	POBLACIÓN Y MUESTRA	
¿En qué medida la densidad de corriente del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye	Determinar la influencia del voltaje del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de	El voltaje del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye sobre la remoción de los	Dependiente (Y1): Remoción de contaminantes	La remoción de contaminantes es el proceso de tratamiento que pasa el agua para eliminar cualquier tipo de contaminante	La remoción de contaminantes se medirá en función de su eficiencia de remoción en las características fisicoquímicas y biológicas.	Remoción de contaminantes físico-químicas	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	Población : Las aguas eutrofizadas de la Laguna Patarcocha.	
							Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)	mg/L		

<p>en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas?</p> <p>¿En qué medida el tiempo de operación del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas?</p> <p>¿En qué medida la concentración de sulfato de hierro del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas?</p>	<p>los contaminantes en las aguas eutrofizadas.</p> <p>Determinar la influencia del tiempo de operación del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.</p> <p>Determinar la influencia de la concentración de sulfato de hierro del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.</p>	<p>contaminantes en las aguas eutrofizadas.</p> <p>El tiempo de operación del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye sobre la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.</p> <p>La concentración de sulfato de hierro del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles influye a la remoción de los contaminantes en las aguas eutrofizadas.</p>	<p>Panduro y Rojas (2021).</p>		<p>Remoción de contaminantes biológicos</p>	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="1407 261 1596 375">Nitrato</td> <td data-bbox="1596 261 1745 375">mg/L</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1407 375 1596 472">Amonio</td> <td data-bbox="1596 375 1745 472">mg/L</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1407 472 1596 561">Fósforo Total</td> <td data-bbox="1596 472 1745 561">mg/L</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1407 561 1596 1138">Organismos fitoplactónicos</td> <td data-bbox="1596 561 1745 1138">Unidades</td> </tr> </table>	Nitrato	mg/L	Amonio	mg/L	Fósforo Total	mg/L	Organismos fitoplactónicos	Unidades	<p>Muestra: 20 litros de agua eutrofizadas</p>	
Nitrato	mg/L															
Amonio	mg/L															
Fósforo Total	mg/L															
Organismos fitoplactónicos	Unidades															

ANEXO 2. Instrumentos de recolección de información

CADENA DE CUSTODIA PARA MUESTREO DE AGUA

Responsable de la toma de muestra y entrega para su traslado <u>JESSICA NAVARRETE / YSMAEL TIMANA / GIANCARLO RAMIREZ</u>		Fecha de traslado <u>16 / 04 / 24</u>	
Responsable del traslado de la muestra <u>GIANCARLO RAMIREZ / YSMAEL TIMANA / JESSICA NAVARRETE</u>			
TOMA	TRASLADO		
Nombre: <u>JESSICA NAVARRETE</u> Fecha: <u>16-04-24</u> Hora: <u>10:45 A.M.</u>	Nombre: <u>Giancarlo Ramirez</u> Fecha: <u>16.04.24</u> Hora: <u>09:15 P.M.</u>	Firma: 	Firma: 

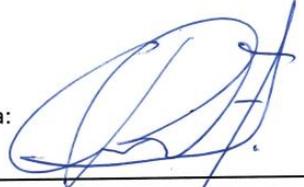
Responsable entrega de las muestras: <u>Giancarlo Ramirez</u>		Fecha de traslado <u>18 / 04 / 24</u>	
Responsable de la recepción de las muestras: <u>ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L.</u>			
ENTREGA	RECEPCIÓN		
Fecha: <u>18/04/24</u> Hora: <u>11:47 A.M.</u>	Institución: <u>18/04/24 ALAB</u> Fecha: <u>18/04/24</u>	Firma: 	Firma: 

ITEM	CÓDIGO ESTACIÓN	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	FECHA Y HORA DE MUESTREO	COORDENADAS UTM	PRESERVANTE	TIPO DE RECIPIENTE	PARAMETROS A ANALIZAR
1	CA-01	AGUA NATURAL SUPERFICIAL LAGUNA	16-04-24 10:45	E: 0363216.46 N: 8818421.94	-	PLASTICO	AMONIACO, FOSFORO TOTAL, DBO, SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES
2	CA-02	AGUA NATURAL SUPERFICIAL LAGUNA	16-04-24 12:18	E: 0362960.38 N: 88185414	-	PLASTICO	AMONIACO, FOSFORO TOTAL, DBO, SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES
3	CA-03	AGUA NATURAL SUPERFICIAL LAGUNA	16-04-24 13:17	E: 0363170.56 N: 8818622.8	-	PLASTICO	AMONIACO, FOSFORO TOTAL, DBO, SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES
4	CA-04	AGUA NATURA SUPERFICIAL LAGUNA	16-04-24 14:07	E: 0363096.51 N: 8818242.77	-	PLASTICO	AMONIACO, FOSFORO TOTAL, DBO
5							
6							

OBSERVACIONES: _____

CADENA DE CUSTODIA PARA MUESTREO DE AGUA

Responsable de la toma de muestra y entrega para su traslado <u>YSMAEL TINANA / JESSICA NAVARRETE / GIANCARLO RAMIREZ</u>		Fecha de traslado <u>16/05/24</u>
Responsable del traslado de la muestra <u>GIANCARLO RAMIREZ / JESSICA NAVARRETE / YSMAEL TINANA</u>		
TOMA	TRASLADO	
Nombre: <u>YSMAEL TINANA</u> Fecha: <u>16.05.24</u> Hora: <u>17:26</u>	Nombre: <u>GIANCARLO RAMIREZ</u> Fecha: <u>16.05.24</u> Hora: <u>9:00AM</u>	Firma: 
Firma: 		

Responsable entrega de las muestras: <u>GIANCARLO RAMIREZ</u>		Fecha de traslado <u>16/05/24</u>
Responsable de la recepción de las muestras: <u>SLAB</u>		
ENTREGA	RECEPCIÓN	
Fecha: <u>16/05/24</u> Hora: <u>13:05</u>	Institución: <u>SLAB</u> Fecha: <u>16/05/24</u>	Firma: 
Firma: 		

ITEM	CÓDIGO ESTACIÓN	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	FECHA Y HORA DE MUESTREO	COORDENADAS UTM	PRESERVANTE	TIPO DE RECIPIENTE	PARAMETROS A ANALIZAR
1	<u>OP-01</u>	<u>AGUA NATURAL</u>	<u>15-05-24</u> <u>17:26</u>	<u>E: 269492</u> <u>N: 8665736</u>	<u>-</u>	<u>PLASTICO</u>	<u>AMONIO, DBO, FOSFORO TOTAL, DQO</u> <u>NITRATO</u>
2							
3							
4							
5							
6							

OBSERVACIONES: _____

ANEXO 3. Validación por expertos

INFORME DE JUICIO DE EXPERTO DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I.- DATOS GENERALES

APELLIDOS Y NOMBRES DEL VALILADOR: Huapaya Pardavé Richard Joao

NIVEL DE GRADO: Maestro

ESPECIALIDAD: Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales

INSTITUCIÓN DONDE LABORA: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN: EQUIPO DE ANALISIS Y REPORTE DEL EFECTO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS MÓVILES PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS EUTROFIZADAS DE LA LAGUNA PATARCOCHA, PASCO, 2024.

AUTOR (ES): JESSICA ALESSANDRA NAVARRETE ASIAN; YSMAEL NARCISO TIMANÁ CASTILLO, GIANCARLO LUIS RAMIREZ INOÑAN.]

II.- ASPECTOS DE VALIDACIÓN:

Luego de verificar la información, puedo formular las siguientes apreciaciones.

INDICADORES	Criterios	Valores			
		1	2	3	4
Claridad	Esta formulada con lenguaje apropiado				X
Objetividad	Esta expresado con conductas observables				X
Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología				X
Organización	Existe una organización lógica entre variable e indicadores				X
Suficiencia	Comprende los aspectos de calidad y cantidad				X
Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional				X
Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivo e hipótesis				X
Coherencia	De indicadores y dimensiones				X
Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación				X
1=Deficiente (0% - 25%) 2= Regular (26% - 50%) 3= Bueno (51% - 75%) 4= Muy bueno (76% -100%)					
Aspecto de valorización					
El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación <input checked="" type="checkbox"/>		El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación <input type="checkbox"/>			
Promedio de valorización = 100%					
Observaciones = Ninguna					


 FIRMA
 DNI: 44127158
 CIP: 116212

08 de marzo del 2024

1

INFORME DE JUICIO DE EXPERTO DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I.- DATOS GENERALES

APELLIDOS Y NOMBRES DEL VALILADOR: CÉSAR AUGUSTO RODRÍGUEZ ABURTO

NIVEL DE GRADO: DOCTORADO

ESPECIALIDAD: MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

INSTITUCIÓN DONDE LABORA: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN: EQUIPO DE ANALISIS Y REPORTE DEL EFECTO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS MÓVILES PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS EUTROFIZADAS DE LA LAGUNA PATARCOCHA, PASCO, 2024.

AUTOR (ES): JESSICA ALESSANDRA NAVARRETE ASIAN; YSMAEL NARCISO TIMANÁ CASTILLO, GIANCARLO LUIS RAMIREZ INOÑAN.

II.- ASPECTOS DE VALIDACIÓN:

Luego de verificar la información, puedo formular las siguientes apreciaciones.

INDICADORES	Criterios	Valores			
		1	2	3	4
Claridad	Esta formulada con lenguaje apropiado				x
Objetividad	Esta expresado con conductas observables				x
Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología				x
Organización	Existe una organización lógica entre variable e indicadores				x
Suficiencia	Comprende los aspectos de calidad y cantidad				x
Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional				x
Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivo e hipótesis				x
Coherencia	De indicadores y dimensiones				x
Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación				x
1=Deficiente (0% - 25%) 2= Regular (26% - 50%) 3= Bueno (51% - 75%) 4= Muy bueno (76% -100%)					
Aspecto de valorización					
El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación		<input checked="" type="checkbox"/>	El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación		<input type="checkbox"/>
Promedio de valorización = 90%					
Observaciones = Ninguna					

DNI: 25706278
CIP: 27533

INFORME DE JUICIO DE EXPERTO DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

I.- DATOS GENERALES

APELLIDOS Y NOMBRES DEL VALIDADOR: JORGE MONTAÑO PISFIL

NIVEL DE GRADO: DOCTOR

ESPECIALIDAD: GESTION AMBIENTAL

INSTITUCIÓN DONDE LABORA: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN: EQUIPO DE ANALISIS Y REPORTE DEL EFECTO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS MÓVILES PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS EUTROFIZADAS DE LA LAGUNA PATARCOCHA, PASCO, 2024.]

AUTOR (ES): JESSICA ALESSANDRA NAVARRETE ASIAN; YSMAEL NARCISO TIMANÁ CASTILLO, GIANCARLO LUIS RAMIREZ INOÑAN.

II.- ASPECTOS DE VALIDACIÓN:

Luego de verificar la información, puedo formular las siguientes apreciaciones.

INDICADORES	Criterios	Valores			
		1	2	3	4
Claridad	Esta formulada con lenguaje apropiado				X
Objetividad	Esta expresado con conductas observables				X
Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología				X
Organización	Existe una organización lógica entre variable e indicadores				X
Suficiencia	Comprende los aspectos de calidad y cantidad				X
Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos de la inteligencia emocional				X
Consistencia	Consistencia entre la formulación de problema, objetivo e hipótesis			X	
Coherencia	De indicadores y dimensiones				X
Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación				X
1=Deficiente (0% - 25%) 2= Regular (26% - 50%) 3= Bueno (51% - 75%) 4= Muy bueno (76% -100%)					
Aspecto de valorización					
El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación <input checked="" type="checkbox"/>		El instrumento NO cumple con los requisitos para su aplicación <input type="checkbox"/>			
Promedio de valorización = 85%					
Observaciones = Ninguna					



FIRMA
 DNI: 5554009
 CIP: 61514

08 de marzo del 2024

ANEXO 4. Informes de ensayos

Caracterización de la laguna Patarcocha



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-9781

N° Id.: 0000109444

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

1.- RAZON SOCIAL	: GIANCARLOS LUIS RAMIREZ IÑOÑAN
2.- DIRECCIÓN	: AV. ARICA 410 BREÑA-LIMA
3.- PROYECTO	: MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA EN LA LAGUNA PATARCOCHA
4.- PROCEDENCIA	: LAGUNA PATARCOCHA, DISTRITO CHAUPIMARCA - PASCO
5.- SOLICITANTE	: ORIHUELA CONTRERAS JOSE AUGUSTO
6.- PRODUCTO	: Agua Natural

II.- DATOS DEL SERVICIO

1.- ORDEN DE SERVICIO N°	: 0000001952-2024-0000
2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2024-04-29

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

1.- MUESTREO POR	: MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA
2.- NÚMERO DE MUESTRAS	: 4
3.- FECHA DE RECEPCIÓN	: 2024-04-18
4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN	: En buen estado de conservación y preservación
5.- PERÍODO DE ENSAYO	: 2024-04-18 al 2024-04-29

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia.

Pág.1 de 3

SEDE PRINCIPAL

Ay. Grande Chacra N° 1877,
Belavista - Callao
Tel.: (+01) 717 5907
Cel.: 977 515 129

SEDE ZARUMILLA

Provingadín Zarumilla Mz. D2
Ll. D. Dolivista - Callao
Tel.: (+01) 713 0636
Cel.: 937 111 379

SEDE AREQUIPA

COOP SIDISUR Mz. E Ll. 9,
Arequipa
Tel.: (+054) 616 943
Cel.: 952 361 941

SEDE PIURA

Urb. Miraflores Mz. G Ll. 17,
Castillo - Piura
Tel.: (+073) 542 335
Cel.: 952 617 762

SEDE TRUJILLO

Urb. Sol de Trujillo Mz. A Ll. 29,
Abto. Salsacmay - Trujillo
Tel.: (+01) 715 0636
Cel.: 961 768 828

www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-9781

N° Id.: 0000109444

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	LUGAR DE ANÁLISIS
Amoníaco	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-NH3 D, 24th Ed. 2023.	Nitrogen (Ammonia). Ammonia-Selective Electrode Method	INACAL LE - 096 CHALACA
Fósforo Total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-P B(Item 5) y E, 24th Ed. 2023.	Phosphorus. Ascorbic Acid Method	INACAL LE - 096 CHALACA

SMEWW : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
APHA : American Public Health Association

INFORME NO OFICIAL

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-9781

N° Id.: 0000109444

V.- RESULTADOS

ITEM	1	2	3	4			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-24-25709	M-24-25710	M-24-25711	M-24-25712			
CÓDIGO CLIENTE ⁽¹⁾	CA-01	CA-02	CA-03	CA-04			
COORDENADAS - UTM WGS 84 ⁽¹⁾	E:363216.46 N:8818421.94	E:362960.38 N:8818541.4	E:363170.56 N:8818622.8	E:363096.51 N:8818242.77			
PRODUCTO ⁽¹⁾	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural			
SUB PRODUCTO ⁽¹⁾	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)			
FECHA y HORA DE MUESTREO ⁽¹⁾	14-04-2024 11:45	14-04-2024 13:10	14-04-2024 14:25	14-04-2024 15:10			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Amoníaco (*)	mg/L	0,006	0,012	19,600	19,521	18,977	18,748
Fósforo Total (*)	mg/L	0,004	0,010	2,893	2,844	2,853	2,575

⁽¹⁾ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA
L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.
L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

⁽¹⁾Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-9782

N° Id.: 000109445

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

1.- RAZON SOCIAL	: GIANCARLOS LUIS RAMIREZ IÑOÑAN
2.- DIRECCIÓN	: AV. ARICA 410 BREÑA-LIMA
3.- PROYECTO	: MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA EN LA LAGUNA PATARCOCHA
4.- PROCEDENCIA	: LAGUNA PATARCOCHA, DISTRITO CHAUPIMARCA - PASCO
5.- SOLICITANTE	: ORIHUELA CONTRERAS JOSE AUGUSTO
6.- PRODUCTO	: Agua Natural

II.- DATOS DEL SERVICIO

1.- ORDEN DE SERVICIO N°	: 0000001952-2024-0000
2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2024-04-29

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

1.- MUESTREADO POR	: MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA
2.- NÚMERO DE MUESTRAS	: 4
3.- FECHA DE RECEPCIÓN	: 2024-04-18
4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN	: En buen estado de conservación y preservación
5.- PERÍODO DE ENSAYO	: 2024-04-18 al 2024-04-29

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia.

Pág.1 de 3

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chelaca N° 1677,
Belavista - Callao
Tel.: (+01) 717 5902
Cel.: 977 515 129

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zaramilla Mz. D2
L1-3, Belavista - Callao
Tel.: (+01) 713 0030
Cel.: 937 111 379

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. E L1 9,
Arequipa
Tel.: (+054) 810 843
Cel.: 952 301 941

SEDE PIURA
Urb. Miraflores Mz. G L1 17,
Castillo - Piura
Tel.: (+073) 542 335
Cel.: 952 617 762

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A L1 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Tel.: (+011) 713 0636
Cel.: 901 766 826



INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-9782

N° Id.: 0000109445

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	LUGAR DE ANÁLISIS
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. 2023.	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test	INACAL LE - 096 CHALACA

SMEWW : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

APHA : American Public Health Association

INFORME NO OFICIAL

Pág.2 de 3

SEDE PRINCIPAL

 Av. Guardia Chacra N° 1877,
 Bellavista - Callao
 Tel. : (+01) 717 5902
 Cel. : 977 515 129

SEDE ZARUMILLA

 Prolongación Zaramilla Mz. D2
 U. 3, Bellavista - Callao
 Tel. : (+01) 713 0039
 Cel. : 977 515 129

SEDE AREQUIPA

 COOP SIDSUR Mz. E.L.L. 9,
 Arequipa
 Tel. : (+054) 019 843
 Cel. : 957 361 841

SEDE PIURA

 Urb. Mercedes Mz. G.L.L. 17,
 Castilla - Piura
 Tel. : (+073) 542 335
 Cel. : 952 617 762

SEDE TRUJILLO

 Urb. Sol del Trujillo Mz. A.L.L. 29,
 Alto Salsacay - Trujillo
 Tel. : (+011) 713 0936
 Cel. : 961 766 826

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-9782

N° Id.: 0000109445

V.- RESULTADOS

ITEM	1	2	3	4			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-24-25717	M-24-25718	M-24-25719	M-24-25720			
CÓDIGO CLIENTE ⁽¹⁾	CA-01	CA-02	CA-03	CA-04			
COORDENADAS - UTM WGS 84 ⁽²⁾	E:0363216.46 N:8818421.94	E:0362960.38 N:8818541.4	E:0363170.56 N:8818622.8	E:0363096.51 N:8818242.77			
PRODUCTO ⁽³⁾	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural			
SUB PRODUCTO ⁽⁴⁾	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)			
FECHA y HORA DE MUESTREO ⁽⁵⁾	16-04-2024 10:45	16-04-2024 12:18	16-04-2024 13:17	16-04-2024 14:07			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	7,4	99,4	8,0	89,3

⁽¹⁾ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA
L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.
L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

⁽²⁾ Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra o como se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Pág.3 de 3

SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chacra N° 1877,
Delsvieta - Callao
Tel.: (+01) 717 5932
Cel.: 977 515 129

SEDE ZARUMILLA

Prolongación Zarumilla Mz. D2
U. B. Delsvieta - Callao
Tel.: (+01) 713 0039
Cel.: 937 111 379

SEDE AREQUIPA

COOP SIDSUR Mz. E.L.L. 9,
Arequipa
Tel.: (+054) 019 843
Cel.: 952 381 941

SEDE PIURA

Urb. Misioneros Mz. G.L.L. 17,
Cayula - Piura
Tel.: (+073) 542 335
Cel.: 952 617 762

SEDE TRUJILLO

Urb. Sol del Trujillo Mz. A.L.L. 29,
Alto Salasayra - Trujillo
Tel.: (+011) 713 0636
Cel.: 961 768 038

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-10230

N° Id.: 0000109893

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

1.- RAZON SOCIAL : GIANCARLOS LUIS RAMIREZ IÑOÑAN
2.- DIRECCIÓN : AV. ARICA 410 BREÑA-LIMA
3.- PROYECTO : MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA EN LA LAGUNA PATARCOCHA REGION PASCO
4.- PROCEDENCIA : LAGUNA PATARCOCHA, DISTRITO CHAUPIMARCA - PASCO
5.- SOLICITANTE : ORIHUELA CONTRERAS JOSE AUGUSTO
6.- PRODUCTO : Agua Natural

II.- DATOS DEL SERVICIO

1.- ORDEN DE SERVICIO N° : 000002062-2024-0000
2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME : 2024-05-06

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

1.- MUESTREADO POR : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA
2.- NÚMERO DE MUESTRAS : 3
3.- FECHA DE RECEPCIÓN : 2024-04-22
4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN : En buen estado de conservación y preservación
5.- PERÍODO DE ENSAYO : 2024-04-22 al 2024-05-06


Erika Aliaga Ibarra
Jefe de Laboratorio
CIP N° 100391

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el Informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág.1 de 3

SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chacaco N° 1877,
Bellavista - Callao
Tel: (+51) 717 5802
Cel: 977 515 129

SEDE ZARUMILLA

Prolongación Zamula Mz. D2
U. 3, Bellavista - Callao
Tel: (+51) 712 0036
Cel: 937 111 979

SEDE AREQUIPA

COOP SIDSUR Mz. E.L. 9,
Arequipa
Tel: (+054) 819 843
Cel: 952 381 941

SEDE PIURA

Urb. Miraflores Mz. G.L. 17,
Carpía - Piura
Tel: (+073) 542 335
Cel: 952 617 762

SEDE TRUJILLO

Urb. Sol de Trujillo Mz. A.L. 26,
Abn Salasmary - Trujillo
Tel: (+01) 713 9036
Cel: 961 766 828

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-10230

N° Id.: 0000109893

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	LUGAR DE ANÁLISIS
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023.	Sólids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C	INACAL LE - 096 CHALACA

SMEWW : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

APHA : American Public Health Association

Pág.2 de 3

 ● SEDE PRINCIPAL
 Av. Guardia Chacra N° 1877,
 Beltrán - Callao
 Telf.: (401) 717 5932
 Cel.: 977 515 129

 ● SEDE ZARUMILLA
 Promoción Zorullo Mz. 02
 U. 3, Beltrán - Callao
 Telf.: (401) 719 0036
 Cel.: 997 111 379

 ● SEDE AREQUIPA
 COOP SIDORU Mz. F.L. 0,
 Arequipa
 Telf.: (4054) 818 843
 Cel.: 952 361 941

 ● SEDE PIURA
 Urb. Miraflores Mz. C.L. 17,
 Castilla - Piura
 Telf.: (4073) 542 335
 Cel.: 952 617 762

 ● SEDE TRUJILLO
 Urb. Sol de Trujillo Mz. A.L. 26,
 Alto Salasme - Trujillo
 Telf.: (401) 713 0636
 Cel.: 961 766 826

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-10230

N° Id.: 0000109893

V.- RESULTADOS

ITEM	1	2	3			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-24-26757	M-24-26758	M-24-26759			
CÓDIGO CLIENTE ^(*)	CA-01	CA-02	CA-03			
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(*)	E:0363216.46 N:8818421.94	E:0362960.38 N:8818541.4	E:0363170.56 N:8818622.8			
PRODUCTO ^(*)	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural			
SUB PRODUCTO ^(*)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)			
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(*)	21-04-2024 10:45	21-04-2024 12:18	21-04-2024 13:17			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS		
Sólidos Suspendidos Totales (*)	mg/L	2,0	5,0	45,0	44,0	40,0

^(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

^(*)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra o como se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Caracterización del agua tratada



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 211



INFORME DE ENSAYO IE-2024-1052

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : GIANCARLO LUIS RAMIREZ INOÑAN
1.2 RUC o DNI : 45347160
1.3 Dirección : No Precisa

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : AGUA NATURAL
2.2 Muestreado por : CLIENTE (C)
2.3 Número de Muestras : 01
2.4 Fecha de Recepción : 2024-05-16
2.5 Periodo de Ensayo : 2024-05-16 al 2024-05-25
2.6 Fecha de Emisión : 2024-05-25
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : 2024-05-15 / 17:26 pm (C)
2.8 N° de cotización : COT-120780-SL24

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Amonio	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-NH3 D, 24th Ed. 2023 Nitrogen (Ammonia). Ammonia-Selective Electrode Method
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. 2023 Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test
Fósforo Total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-P B,E , 24th Ed. Phosphorus. Sample Preparation. Ascorbic Acid Method
Demanda Química de Oxígeno (C)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed. 2023. Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method
Nitrato (C)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-NO3 ⁻ B, 24th Ed. 2023 Nitrogen (Nitrate). Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method

4. RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA: OP-01

N: 8665736 / E: 269492
FIAR (C)

DIEGO ROMÁN FERNÁNDEZ D'ALEJO
QUÍMICO
C.P.F. 1037

INFORME DE ENSAYO IE-2024-1052

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS VARIADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-1970	Amonio	mg/L N-NH ₃	1.00	<1.00
	Nitrato ^(*)	NO ₃ -N mg/L	0.20	4.06
	Demanda Química de Oxígeno ^(*)	mg /L O ₂	10.00	171.46
	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5.00	67.13
	Fósforo Total	P mg /L	0.01	<0.01

Leyenda

LCM: Límite de Cuantificación de Método

^(*) Información suministrada por el cliente.

^(†) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL-DA.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.
- Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

FIN DE DOCUMENTO

ANEXO 5. Permiso de laboratorios



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES
LABORATORIOS Y TALLERES

CDA-003-2024

CONSTANCIA DE ATENCIÓN

Mediante el presente se hace constar que el/los tesista (s):

Sr(a). Jessica Alessandra Navarrete Asian,

Sr(a). Ysmael Narciso Timana Castillo y

Sr(a). Giancarlo Luis Ramirez Inoñan.

perteneciente a la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales realizaron sus ensayos en el laboratorio-FIARN, cuyo título del proyecto es "EFECTO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS MÓVILES PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS EUTROFIZADAS DE LA LAGUNA PATARCOCHA, PASCO, 2024", el cual se realizó el día 25 de abril del 2024, bajo la asesoría del docente Mg. Alex Willy Pilco Núñez.

Se extiende la constancia a pedido del interesado.

Bellavista, 08 de junio del 2024



Tome Ramos, Carlos Odorico

JEFE DE LABORATORIOS Y TALLERES-FIARN-UNAC

ANEXO 6. Panel fotográfico



















