



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Y FORESTAL



**“TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO
MEDIANTE LA ELECTROCOAGULACIÓN Y EVALUACIÓN DE
LOS LODOS GENERADOS COMO SUPLEMENTO PARA
FERTILIZAR QUINUA”**

Bach. Luis Miguel Turpo Canahuire

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

ASESOR:

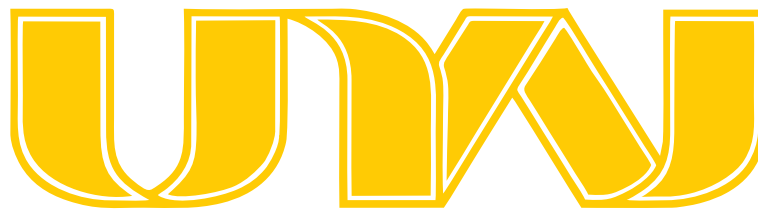
M. Sc. Hugo Apaza Aquino



JULIACA, PERÚ
2024



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Y FORESTAL



**“TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO
MEDIANTE LA ELECTROCOAGULACIÓN Y EVALUACIÓN DE
LOS LODOS GENERADOS COMO SUPLEMENTO PARA
FERTILIZAR QUINUA”**

Bach. Luis Miguel Turpo Canahuire

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

ASESOR:

M. Sc. Hugo Apaza Aquino



JULIACA, PERÚ
2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Y FORESTAL



**“TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO
MEDIANTE LA ELECTROCOAGULACIÓN Y EVALUACIÓN DE
LOS LODOS GENERADOS COMO SUPLEMENTO PARA
FERTILIZAR QUINUA”**

Bach. Luis Miguel Turpo Canahuire

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Asesor: M. Sc. Hugo Apaza Aquino

Juliaca, 2024

Turpo, L. (2024) *Tratamiento de agua para consumo humano mediante la electrocoagulación y evaluación de los lodos generados como suplemento para fertilizar quinua*, (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca

AUTOR: Luis Miguel Turpo Canahuire

TÍTULO: Tratamiento de agua para consumo humano mediante la electrocoagulación y evaluación de los lodos generados como suplemento para fertilizar quinua

PUBLICACIÓN: Juliaca, 2024

DESCRIPCIÓN: Cantidad de páginas (142)

NOTA: Tesis (**Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal**) – Universidad Nacional de Juliaca.

CÓDIGO: 01-000044-01/T95

NOTA: Incluye bibliografía.

ASESOR: M. Sc. Hugo Apaza Aquino

PALABRAS CLAVE: Electrocoagulación, demanda bioquímica de oxígeno, lodos generados, quinua.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL
“TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO MEDIANTE LA
ELECTROCOAGULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS LODOS
GENERADOS COMO SUPLEMENTO PARA FERTILIZAR QUINUA”
TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Presentado por:

Bach. Luis Miguel Turpo Canahuire

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

M. Sc. Eliana Mullisaca Contreras

PRESIDENTE DE JURADO



M. Sc. Ebed David Paredes Rodríguez

JURADO (secretario)



2° MIEMBRO

M. Sc. Milton Quispe Tisnado

JURADO (vocal)



3° MIEMBRO



M. Sc. Hugo Apaza Aquino

ASESOR DE TESIS

Luis Miguel Turpo Canahuire

TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO MEDIANTE LA ELECTROCOAGULACIÓN Y EVALUACIÓN DE L...

Universidad Nacional de Juliaca

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:410491535

142 Páginas

Fecha de entrega

29 nov 2024, 10:28 a.m. GMT-5

27,834 Palabras

Fecha de descarga

29 nov 2024, 10:33 a.m. GMT-5

156,043 Caracteres

Nombre de archivo

TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO MEDIANTE LA ELECTROCOAGULACIÓN Y EVA....pdf

Tamaño de archivo

5.3 MB

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 6% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

El trabajo de investigación está dedicado a mis padres, por el apoyo que siempre me brindan, a mi madre Giovanna y mi padre Reynaldo, por toda su paciencia, amor, trabajo y sacrificio para que yo pudiera salir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, por el apoyo que me dan para cumplir mis objetivos.

Gracias al Magister Hugo Apaza Aquino en calidad de asesor por el apoyo que me brindó en todo el proceso.

A la M. Sc. Eliana Mullisaca Contreras, al M. Sc. Ebed Paredes Rodríguez y al M. Sc. Milton Quispe Tisnado, que me han ayudado gracias a sus correcciones y sugerencias fui capaz de finalizar el trabajo de investigación.

A los encargados de laboratorio de la sede Ayabacas, Lic. Joel Zapana, Ing. Maribel Jara y la Ing. Lisbeth Coaquira, por su apoyo brindado.

Finalmente agradezco rotundamente a Lisset y Silvia, quienes fueron de mucha ayuda durante todo el proceso.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.1. El problema de investigación.....	5
1.2. La pregunta de investigación.....	6
1.2.1. Problema general.....	6
1.2.2. Problemas específicos.....	6
1.3. Objetivos de la investigación.....	7
1.3.1. Objetivo general.....	7
1.3.2. Objetivos específicos.....	7
1.4. Justificación de la investigación.....	7
1.4.1. Justificación ambiental.....	7
1.4.2. Justificación social.....	7
1.4.3. Justificación económica.....	8
CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA.....	9
2.1. Antecedentes de la investigación.....	9
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	9
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	10
2.1.3. Antecedentes regionales.....	12

2.2.	Marco teórico	12
2.2.1.	Calidad del agua	12
2.2.2.	Factores que alteran la calidad del agua	13
2.2.3.	Agua potable.....	14
2.2.4.	Tecnologías para el tratamiento de agua potable.....	15
2.2.5.	Electrocoagulación	21
2.2.6.	Lodos residuales	27
2.2.7.	Quinoa (<i>Chenopodium quinoa</i>)	29
2.2.8.	Consumo de agua potable en Juliaca.....	30
2.2.9.	Lago Titicaca	31
2.2.10.	Río Coata	31
2.2.11.	Normativa ambiental.....	32
2.2.12.	Análisis factorial estadístico	32
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS		33
3.1.	Ámbito de estudio	33
3.2.	Tipo y diseño de la investigación	34
3.3.	Población y muestra.....	34
3.4.	Variables de investigación	34
3.4.1.	Variables independientes	34
3.4.2.	Variable dependiente	34
3.5.	Hipótesis de investigación	34
3.5.1.	Hipótesis general	34
3.5.2.	Hipótesis específicas.....	34
3.6.	Equipos, materiales y reactivos	35
3.6.1.	Equipos	35
3.6.2.	Materiales	35
3.6.3.	Reactivos	35

3.7.	Métodos	35
3.7.1.	Evaluar las características fisicoquímicas de las aguas del río Coata	35
3.7.2.	Construcción de la celda de electrocoagulación.....	37
3.7.3.	Evaluación de la eficiencia de la electrocoagulación en base a los parámetros de pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento	38
3.7.4.	Eficiencia de la electrocoagulación en el porcentaje de reducción de DBO ₅	38
3.7.5.	Evaluación de los lodos generados como suplemento para fertilizar quinua (<i>Chenopodium quinoa</i>).....	38
3.8.	Análisis estadístico	39
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN		40
4.1.	Evaluación de las características físicoquímicas de las aguas del río Coata.....	40
4.2.	Celda de electrocoagulación	41
4.3.	Eficiencia de la electrocoagulación en el porcentaje de reducción de DBO ₅	43
4.3.1.	Análisis estadístico	45
4.3.2.	Variación de pH, Conductividad y temperatura	54
4.4.	Evaluación de los lodos generados como suplemento para fertilizar quinua (<i>Chenopodium quinoa</i>).....	62
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		68
5.1.	Conclusiones.....	68
5.2.	Recomendaciones	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		70
ANEXOS.....		92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tecnologías de tratamiento avanzando para potabilizar el agua	19
Tabla 2 Ventajas y desventajas de la tecnología de la electrocoagulación	23
Tabla 3 Análisis comparativo de las características químicas habituales de los lodos crudos y los tratados mediante digestión anaerobia	28
Tabla 4 Taxonomía y descripción botánica de la quinua	29
Tabla 5 Estados fenológicos de la quinua.	30
Tabla 6 Parámetros fisicoquímicos y sus metodologías	36
Tabla 7 Resultados del análisis de los parámetros fisicoquímicos de las aguas del río Coata	40
Tabla 8 Nivel de pH y contenido de Aluminio de los lodos del mejor tratamiento de electrocoagulación	63
Tabla 9 Tratamientos de las dosificaciones de los lodos para fertilizar la quinua	64
Tabla 10 Resultados obtenidos en la evaluación de las plantas a los 60 días	65
Tabla 11 ECA para agua, en la categoría 1, subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable	100
Tabla 12 Diseño factorial de 3 factores, con 3 niveles y 3 repeticiones.....	101
Tabla 13 Efectos principales y su análisis de varianza.....	102
Tabla 14 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) a.b1 (efecto simple)	102
Tabla 15 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) a.b2 (efecto simple)	103
Tabla 16 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) a.b3 (efecto simple)	104
Tabla 17 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) a.c1 (efecto simple)	105
Tabla 18 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) a.c2 (efecto simple)	106
Tabla 19 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) a.c3 (efecto simple)	107
Tabla 20 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) b.a1 (efecto simple)	108
Tabla 21 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) b.a2 (efecto simple)	109
Tabla 22 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) b.a3 (efecto simple)	110
Tabla 23 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) b.c1 (efecto simple)	111
Tabla 24 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) b.c2 (efecto simple)	112
Tabla 25 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) b.c3 (efecto simple)	113
Tabla 26 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) c.a1 (efecto simple)	114
Tabla 27 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) c.a2 (efecto simple)	115
Tabla 28 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) c.a3 (efecto simple)	116
Tabla 29 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) c.b1 (efecto simple)	117

Tabla 30 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) c.b2 (efecto simple)	118
Tabla 31 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) c.b3 (efecto simple)	119
Tabla 32 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) A (efecto principal)	120
Tabla 33 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) B (efecto principal)	121
Tabla 34 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) C (efecto principal)	122
Tabla 35 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) A:B (efecto principal)	123
Tabla 36 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) B:C (efecto principal).....	124
Tabla 37 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) A:C (efecto principal)	125
Tabla 38 Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) A:B:C (efecto principal).....	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estabilidad de los coloides presentes en el agua.....	16
Figura 2. Diagrama del proceso de sedimentación por zonas	17
Figura 3. Etapa de la filtración en el tratamiento de aguas.....	17
Figura 4. Proceso de la cloración para la potabilización del agua.....	18
Figura 5. Tipos de membranas y el tipo de contaminante rechazado en cada una.....	21
Figura 6. Proceso experimental de la electrocoagulación	22
Figura 7. Ilustración de la celda de electrocoagulación conectada a la fuente de poder	22
Figura 8. Coagulación de las partículas coloidales.....	25
Figura 9. Procesos que están involucrados en una celda de electrocoagulación.....	26
Figura 10. Principio del proceso de la electrocoagulación.....	27
Figura 11. Ubicación geográfica de la cuenca del río Coata	32
Figura 12. Ubicación del punto de monitoreo	33
Figura 13. Ilustración de la celda de electrocoagulación.....	37
Figura 14. Celda de electrocoagulación en funcionamiento.....	43
Figura 15. Resultados del porcentaje de reducción de DBO_5 en las distintas configuraciones de tratamiento de los factores tiempo, densidad de corriente y pH.....	45
Figura 16. Relación de los factores pH - Densidad de corriente en cuanto al porcentaje de reducción de DBO_5	48
Figura 17. Relación de los factores pH - Tiempo en cuanto al porcentaje de reducción de DBO_5	49
Figura 18. Relación de los factores DC - Tiempo en cuanto al porcentaje de reducción de DBO_5	49
Figura 19. Relación de los factores DC - pH en cuanto al porcentaje de reducción de DBO_5	50
Figura 20. Relación de los factores Tiempo - pH en cuanto al porcentaje de reducción de DBO_5	50
Figura 21. Relación de los factores Tiempo - DC en cuanto al porcentaje de reducción de DBO_5	51
Figura 22. Variación del pH final cuando se trabaja con un pH 6	55
Figura 23. Variación del pH final cuando se trabaja con un pH 7	55
Figura 24. Variación del pH final cuando se trabaja con un pH 8	56
Figura 25. Variación de la conductividad final interactuando con un pH 6.....	57
Figura 26. Variación de la conductividad final interactuando con un pH 7.....	58

Figura 27. Variación de la conductividad final interactuando con un pH 8.....	58
Figura 28. Variación de la temperatura final interactuando con un pH inicial de 6.....	59
Figura 29. Variación de la temperatura final interactuando con un pH inicial de 7.....	60
Figura 30. Variación de la temperatura final interactuando con un pH inicial de 8.....	60
Figura 31. Formación de lodos producto del proceso de electrocoagulación	63
Figura 32. Resultados morfológicos de los distintos tratamientos en la quinua A:T0, B:T1, C:T2 y D:T3	67
Figura 33. Punto de monitoreo para la toma de muestras	92
Figura 34. Toma de muestras en los frascos rotulados para análisis en laboratorio.....	92
Figura 35. Análisis de la turbiedad.....	93
Figura 36. Determinación de sólidos A: Sólidos suspendidos B: Sólidos volátiles y fijos C: Sólidos sedimentables	93
Figura 37. Experimentación del proceso de electrocoagulación A: Colocación de electrodos B: Funcionamiento del proceso C: Medición de la temperatura D: Pinza amperimétrica y multímetro para monitorear la intensidad de corriente.....	94
Figura 38. Flóculos aglomerados en la parte superficial.....	95
Figura 39. Lodos sedimentados.....	95
Figura 40. Determinación de la DBO ₅ de las muestras de agua después del proceso de electrocoagulación A: Muestras de agua B: Frascos Winkler C: Aireación del agua de dilución D: Adición de reactivos E: Frascos Winkler en incubadora a 5 días	96
Figura 41. Evaluación de la fertilización con lodos A: Preparación del sustrato B: Adicionamiento de los lodos C: Plántulas en desarrollo D: Medición de clorofila E: Medición de parámetros morfológicos F: Medición de la materia seca	97
Figura 42. Informe de laboratorio del análisis de DBO ₅ y DQO	98
Figura 43. Informe de laboratorio del análisis de contenido de aluminio de los lodos del mejor tratamiento.....	99

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Toma de muestras	92
Anexo 2. Análisis de muestras en laboratorio	93
Anexo 3. Proceso de electrocoagulación	94
Anexo 4. Formación de lodos.....	95
Anexo 5. Determinación de la DBO ₅	96
Anexo 6. Fertilización de la quinua con los lodos generados del mejor tratamiento	97
Anexo 7. Informe de laboratorio	98
Anexo 8. Estándares de Calidad Ambiental para agua.....	100
Anexo 9. Diseño de experimentos	101
Anexo 10. Análisis estadístico	102

RESUMEN

La contaminación de aguas superficiales es ocasionada por la presencia de residuos sólidos y vertimiento de aguas residuales domésticas, afectando a la población que utiliza sus aguas para consumo. El objetivo de la investigación es evaluar la eficiencia de electrocoagulación para tratar agua para consumo y lodos generados como suplemento para fertilizar quinua. Se realizó la caracterización fisicoquímica de las aguas del río Coata para evaluar las condiciones iniciales; se construyó una celda de electrocoagulación tipo Batch con características para reducir la DBO₅; se evaluó la eficiencia en función del porcentaje de reducción de la DBO₅, con factores pH inicial, densidad de corriente y tiempo de tratamiento; los lodos generados del mejor tratamiento fueron evaluados como fertilizante para la quinua. Los resultados de la caracterización fisicoquímica muestran una concentración de DBO₅ de 198.5 mg/L, DQO de 714.3 mg/L, conductividad de 1322 μ S/cm y pH de 7.47, los cuales la DBO₅ y DQO no se encuentran dentro de la normativa, las características de la celda fueron de 30 cm x 20 cm y 15 cm, se emplearon electrodos hierro y aluminio (electrodo de sacrificio) de 10 cm x 12 cm y 3 mm de espesor, a una separación de 15 mm; en la electrocoagulación mediante los resultados estadísticos se determinó la mejor configuración de pH 7, densidad de corriente 40 A/m² y 40 minutos de tiempo de tratamiento, logrando la reducción de la DBO₅ hasta un 89.32%, en el proceso se evaluó el comportamiento del pH, la conductividad eléctrica y la temperatura; de la evaluación de los lodos generados, el mejor tratamiento fue con una dosificación de 5 gramos, obteniéndose un porcentaje de materia seca del 95.1%, una longitud aérea de 14.9 cm, una longitud radical de 13.5 cm, estimación de clorofila de 137 y número total de hojas de 21.

Palabras clave: Electrocoagulación, demanda bioquímica de oxígeno, lodos generados, quinua.

ABSTRACT

Surface water contamination is caused by the presence of solid waste and domestic wastewater discharge, affecting the population that uses its water for consumption. The objective of the research is to evaluate the efficiency of electrocoagulation to treat drinking water and sludge generated as a supplement to fertilize quinoa. The physicochemical characterization of the waters of the Coata River was carried out to evaluate the initial conditions; a Batch type electrocoagulation cell was built with characteristics to reduce BOD₅; the efficiency was evaluated as a function of the percentage of BOD₅ reduction, with initial pH, current density and treatment time factors; the sludge generated from the best treatment was evaluated as a fertilizer for quinoa. The results of the physicochemical characterization show a BOD₅ concentration of 198.5 mg/L, COD of 714.3 mg/L, conductivity of 1322 μ S/cm and pH of 7. The characteristics of the cell were 30 cm x 20 cm and 15 cm, iron and aluminum electrodes (sacrificial electrode) of 10 cm x 12 cm and 3 mm thick, at a separation of 15 mm were used; in the electrocoagulation by means of statistical results, the best configuration of pH 7, current density 40 A/m² and 40 minutes of treatment time was determined, achieving the reduction of BOD₅ up to 89.32%. 32%, in the process the behavior of pH, electrical conductivity and temperature were evaluated; from the evaluation of the sludge generated, the best treatment was with a dosage of 5 grams, obtaining a dry matter percentage of 95.1%, an aerial length of 14.9 cm, a radical length of 13.5 cm, chlorophyll estimation of 137 and total number of leaves of 21.

Key words: Electrocoagulation, biochemical oxygen demand, sludge generated, quinoa.

INTRODUCCIÓN

El agua es un importante recurso para la sostenibilidad de la vida, y de esta depende la salud de las personas y la posibilidad del desarrollo a nivel económico, cultural y social del país. Las aguas superficiales se encuentran en lagos, embalses, canales y ríos (Pavan et al., 2022), las cuales son susceptibles a los contaminantes producto de las actividades industriales, agrícolas, minería y de zonas urbanas (Ibana-Lopez et al., 2021). La población aledaña al río Coata, utilizan sus aguas para su consumo, y ya que existe contaminación producto del vertimiento de aguas domésticas, la presencia de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos y el mal manejo del agua, afectan la calidad de vida de las personas (Menendez, 2018; Quispe-Mamani et al., 2021), estos contaminantes incrementan la concentración de la DBO₅ el cual es considerado uno de los indicadores en la evaluación de la contaminación del agua y agua potable (Raffo & Ruiz, 2014).

Existen diversas tecnologías para tratar agua con fines de consumo tales como las convencionales que se basa en una secuencia de procesos físico-químicos y biológicos, como la coagulación y floculación química con una acelerada filtración, que tienen la finalidad de eliminar contaminantes presentes en el agua para su uso (González-Cabrera et al., 2022; Sánchez & Quiroga, 2020); o las tecnologías no convencionales donde se encuentran la variedad de tecnologías con membranas, que por un proceso de gran presión se filtran los contaminantes (Mesa et al., 2018). Todas estas tecnologías producen lodos residuales, lo cual origina un problema de manejo y disposición durante su tratamiento, además que la principal problemática en caso del tratamiento convencional es que los lodos presentan un elevado contenido de agua (aproximadamente un 90%) particularmente aquellos producidos por el sulfato de aluminio como coagulante (Sandoval et al., 1999).

Una de las tecnologías que está tomando mayor relevancia en la actualidad es la electrocoagulación, la cual está muy reconocida como una de las tecnologías de mayor remoción de contaminantes tanto químicos como orgánicos (Dolatabadi et al., 2021; Mousazadeh et al., 2021), el proceso de funcionamiento se basa en facilitar la coagulación de las partículas coloidales contaminantes presentes en el agua utilizando la corriente eléctrica por medio de electrodos en una celda electrolítica (Tahreen et al., 2020). Durante el proceso de electrocoagulación se generan lodos residuales, las cuales dependen de los parámetros de la celda, la densidad de corriente y el agua a tratar (Asaithambi et al., 2023), dichos lodos son formados a partir de la precipitación de las partículas coloidales las cuales

pueden tener un uso y aprovechamiento en las actividades agrícolas (Ocampo-Rodríguez et al., 2018).

Además, se ha identificado que una de las posibles soluciones para los lodos es su aplicación en suelos agrícolas. Esta alternativa permite la reutilización de materiales orgánicos ricos en nutrientes, lo que podría contribuir al mejoramiento de la calidad del suelo (Salcedo-pérez et al., 2007), hallándose beneficios ambientales y económicos, ya que los lodos enriquecen la estructura del suelo por sus altas concentraciones de fósforo, nitrógeno y material orgánico, los cuales pueden ser aprovechados por las plantas (Edmundo & Cabrera, 2021). Por tal motivo el trabajo de investigación tiene como finalidad evaluar la eficiencia de la electrocoagulación para el tratamiento de agua potable y los lodos generados como suplemento para fertilizar quinua (*Chenopodium quinoa*).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. El problema de investigación

La percepción de la calidad del agua de distintas fuentes es la que determina el uso que se le da (Faviel et al., 2019). El agua es un recurso básico fundamental para la salud y alcanzar el bienestar humano, que se ve amenazado por la presencia de contaminantes que alcanza incluso el agua para consumo humano, provocando un riesgo en la población (Villena, 2018).

El Perú es un país potencialmente vulnerable a las consecuencias del cambio climático, y uno de los impactos fundamentales se observa en la escasez de agua (Aquino, 2017). En nuestro país el servicio de agua aún es un problema debido a la contaminación existente; en los años de 2017 al 2018, la población en general tuvo dificultades al acceso de agua potable y se abastecían de distintas fuentes, tales como las cisternas o pozos, e inclusive accedían a este recurso por medio de fuentes de agua superficiales (INEI, 2018).

El agua siendo un recurso valioso para la población, siendo contaminada en los ríos es una problemática, y esta problemática es a una escala mundial, nacional, y regional, y las aguas del río Coata no son la excepción, pues es provocada por el hombre (Menendez, 2018). La contaminación del río Coata también es consecuencia de los relaves mineros que entran desde los distritos de Santa Lucia y Cabanillas. Estas actividades extractivas ocasionan graves problemas a través de sustancias que son producidas y desechadas (Aroapaza & Salazar, 2016).

En el río Coata, los pobladores no cuentan con los servicios de saneamiento de agua para consumo humano, por ello utilizan como fuente de abastecimiento el agua superficial para bebida de animales, asimismo el agua subterránea, para su consumo (Gutierrez, 2018). La contaminación hídrica en el río Coata se da cuando los residuos sólidos y las aguas residuales entran en contacto con sus aguas, ocasionando problemas gastrointestinales, principalmente en los pobladores (Quispe et al., 2020). Otra de las problemáticas de contaminación que existe es por la presencia de metales pesados en las aguas del río Coata, la cual tiene su origen por la acción antrópica de la descarga de aguas residuales y residuos sólidos de la ciudad de Juliaca (Belizario et al., 2019; Quispe et al., 2019).

Por tal motivo se debe contar con otras alternativas para su posible tratamiento, como es el caso de la electrocoagulación, una tecnología atractiva para el tratamiento de aguas, ya que se caracteriza por no utilizar agentes químicos en el tratamiento de efluentes (Rodríguez et al., 2021), los procesos en la celda son controlados mecánicamente, demandando menos mantenimiento, etc., también porque durante el proceso de electrocoagulación los lodos residuales que se generan tienen una estructura deshidratada, haciendo más fácil el retiro y desecación de estos (Piña-Soberanis et al., 2011), además que dichos lodos pueden llegar a tener fines agrícolas; aminorando la problemática de los lodos que se generan mediante tratamientos de agua convencionales; teniendo en cuenta que cuando estos lodos no son tratados causan un impacto significativo en la fauna, flora y los seres humanos (Garzón, 2019).

1.2. La pregunta de investigación

1.2.1. Problema general

¿Cuál será la eficiencia de la electrocoagulación para el tratamiento de agua para consumo y la evaluación de los lodos generados como suplemento para fertilizar quinua (*Chenopodium quinoa*)?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles serán las características físico-químicas de las muestras de agua del río Coata?
- ¿Qué características tendrá la celda de electrocoagulación construido?
- ¿Cuál será la eficiencia de la electrocoagulación en base a los factores de pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento?
- ¿Qué concentración de aluminio tendrán los lodos generados para fertilizar la quinua (*Chenopodium quinoa*)?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de la electrocoagulación para el tratamiento de agua potable y los lodos generados como suplemento para fertilizar quinua (*Chenopodium quinoa*).

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar las características fisicoquímicas de las muestras de agua del río Coata.
- Construir la celda de electrocoagulación.
- Evaluar la eficiencia de la electrocoagulación en función a los factores de pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento.
- Evaluar los lodos generados como suplemento para fertilizar quinua (*Chenopodium quinoa*).

1.4. Justificación de la investigación

1.4.1. Justificación ambiental

A nivel ambiental, el río Coata por ser la principal fuente de agua para abastecer a la población de la ciudad de Juliaca, se ve contaminada por la inadecuada disposición de residuos sólidos y aguas residuales producto del colapso de los buzones de viviendas, alterando la calidad del agua (Callasaca-Pacheco et al., 2022), otra fuente contaminante es el río Torococha, debido a que en su cauce fluye las aguas residuales domésticas altamente contaminadas (Callasaca, 2019), provocando un incremento de la carga orgánica elevando los niveles de la demanda bioquímica de oxígeno. Por otro lado, los lodos que se generan en las plantas de tratamiento, con el pasar del tiempo, estos van aumentando considerablemente (Vasquez & Vargas, 2018), y pueden afectar al medio ambiente debido a los contaminantes presentes como metales pesados, materia orgánica y microorganismos (Amador-Díaz et al., 2015).

1.4.2. Justificación social

A nivel social, la población de Juliaca se ve afectada por la contaminación hídrica en el río Coata, ya que los residuos sólidos y las aguas residuales son depositadas en sus aguas, provocando problemas de salud pública, mayormente intestinales por la ingesta de estas aguas de baja calidad (Quispe et al., 2020). Los pobladores del área rural carecen de agua potable, y por necesidad se ven obligados en utilizar

agua directamente del río Coata para sus actividades de ganadería, agricultura y productivas, para consumo y uso doméstico (Menendez, 2018).

1.4.3. Justificación económica

A nivel económico, existen diversas tecnologías de tratamiento de agua, tales como la tecnología de membranas, que ofrece una solución muy atractiva y llamativa para el tratamiento eficaz de las aguas residuales y para la recuperación de recursos (Lustenberger & Castro-Muñoz, 2022), la técnica de tratamiento de aguas, que se basa en la filtración por membranas, es una tecnología que garantiza la calidad de agua tratada (Jin et al., 2021). La tecnología de filtración por membranas presentan la desventaja de que son muy costosas para su implementación y mantenimiento, con tasas de flujo pequeñas y un tiempo de vida útil limitado (Ribeiro et al., 2007). En tanto, la tecnología de electrocoagulación tiene costos de operación menores en comparación con tratamientos por la coagulación química (Kumar et al., 2004), la cual consiste en una celda electrolítica, compuesto por una fuente de poder y electrodos encargados de suministrar iones desestabilizadores de partículas coloidales (Forero-Buitrago et al., 2020), de manera que la tecnología ofrece la ventaja de clarificar el agua sin la necesidad de adicionar de productos químicos (Muñoz et al., 2022), a su vez, se generan menor cantidad de lodos y estos presentan la característica de ser más compactos (Restrepo et al., 2006), aminorando los costos de disposición.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Bote (2021), estudió el proceso de electrocoagulación para tratar aguas residuales domésticas. La celda tuvo electrodos de hierro y aluminio con dimensiones de 6 cm de longitud, 12 cm de ancho y 0.9 cm de grosor, con una separación de 1 cm. Las configuraciones de electrodos que empleó fueron Al-Al, Fe-Fe, Al-Fe y Fe-Al, considerando factores como el pH, la densidad de corriente y el tiempo de electrólisis. Los mejores resultados que obtuvo para la eliminación de la DQO fueron con un pH 9, a 45 A/m² de densidad de corriente y 60 minutos de tiempo, con una combinación de electrodos de Fe-Fe, logrando la remoción de la carga orgánica reduciendo la concentración de DQO en un 90%.

Lessoued et al. (2021), estudiaron la electrocoagulación en la remoción de la carga orgánica contaminante eliminando la DQO de lixiviados. Las muestras fueron recogidas en el vertedero de la ciudad de Laghouat, Argelia. La celda que utilizaron fue de un volumen de 400 mL y los electrodos utilizados fueron de material aluminio con medidas de 0.3 cm de grosor, 2.4 cm de ancho y 6.1 cm de longitud, con una separación de 3.1 cm. Los resultados que obtuvieron con la mejor configuración óptima de factores de tiempo de tratamiento de 75 minutos, pH de 5.3, intensidad de corriente de 1.2 A y 150 rpm de velocidad de agitación, alcanzaron eficiencias de eliminación de DQO del 90%, un 92.3% de DBO₅ y 99.62 de turbidez.

Aguilar-Ascón et al. (2020), estudiaron los valores óptimos para el mejor tratamiento de electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio con muestras de agua residual de curtiembre. La celda que utilizaron fue de tipo Batch, con medidas de 30 cm de longitud, 20 cm de ancho y 25 cm de altura, con un volumen total de 15 litros, con una capacidad para tratar 12 litros de agua y 3 litros para la acumulación de lodos, además utilizaron 8 electrodos de material de aluminio, 4 para el ánodo y 4 para el cátodo, con dimensiones de 10 cm de ancho y 10 cm de largo con una superficie total de 100 cm², con una configuración de placas en serie y espaciado de 2 cm. Según los resultados, indicaron que los factores intensidad de corriente, tiempo de tratamiento y pH afectaron significativamente a los

parámetros de la DQO y sólidos suspendidos totales, mientras que el tiempo de tratamiento afectó en mayor proporción a la DBO₅; para la remoción de la DQO los valores óptimos de operación fueron intensidad de 3 A, un tiempo de 24 minutos y un pH de 8.4, para la DBO₅, intensidad de 3 A, un tiempo de 24 minutos y un pH de 5.5, y para los SST, intensidad de 2.7 A, un tiempo de 19 minutos y un pH de 7.4; logrando eficiencias de eliminación y remoción de la carga orgánica del 56,8% y un 69,2% para la DQO y DBO₅ y un 99,9% para SST.

López y Harnisth (2016), estudiaron los factores que más influyen durante el proceso de funcionamiento de electrocoagulación en aguas residuales de la industria láctea; tomaron muestras para el tratamiento antes de ser descargadas al alcantarillado, que fueron 3 canecas de 20 litros. Emplearon un diseño estadístico factorial completamente al azar, donde analizaron los factores tiempo, número de placas y el voltaje, y la variable respuesta en el estudio que utilizaron fue la disminución de la turbidez. Obtuvieron resultados con porcentajes de remoción de la carga orgánica contaminante del 93.33% de DBO₅, un 82.42% de remoción de DQO y un 76.81% de remoción de sólidos suspendidos, durante el proceso los factores que más influyeron durante el proceso de electrocoagulación fueron el tiempo de reacción y el voltaje sobre los mejores resultados de remoción.

Ocampo-Rodríguez et al. (2018), en su investigación sobre tratamiento de lodos generados por el proceso de electrocoagulación de lixiviados de un relleno sanitario, utilizando electrodos de hierro y aluminio de 17 cm x 15 cm, con el aluminio como ánodo, en distribución en paralelo con separación de 2 cm y conectado a una fuente de poder de 30 V de corriente directa, en los lodos se encontró una cuantificación de aluminio de 133.70 mg/Kg.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Huaman y Muñoz (2019), estudiaron los valores óptimos del proceso de funcionamiento de electrocoagulación en el tratamiento de efluentes de una industria papelera. Realizaron un muestreo compuesto para la caracterización del efluente, y los electrodos que utilizaron fueron de material aluminio- hierro de medidas 9 cm de ancho, 10 cm de largo y 3 mm de espesor, la celda tuvo dimensiones de 14.1 cm de largo, 10.5 cm de ancho y 18 cm de alto con un volumen de 2.6 litros aproximadamente. Los resultados a los que llegaron para el

mejor tratamiento; indicaron que se aplicó una densidad de corriente de 10.45 mA/m² y un tiempo de 80 min, las cuales obtuvieron un mejor tratamiento resultando un porcentaje de remoción de la carga orgánica reduciendo la concentración de la DBO₅ del 86.22%.

Perez y Rodriguez (2018), estudiaron el proceso de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de lactosuero ácido, tomaron las muestras de una industria láctea en Junín y la celda que utilizaron fue de tipo Batch a escala de laboratorio de un volumen de 2 litros, empleando electrodos de material hierro y aluminio con una configuración en paralelo. Los mejores resultados que obtuvieron en el tratamiento; fueron porcentajes de remoción de la carga orgánica contaminante reduciendo la concentración de DQO y DBO₅, un 92.38% y el 94.94% respectivamente, con un voltaje de 10V y un tiempo de tratamiento de 30 min.

Apaza (2018), estudió los efectos de un sistema de electrocoagulación combinado con un filtro biológico para la remoción de contaminantes de efluentes lácteos. La celda que utilizó tuvo dimensiones de 26.5 cm de largo, 16 cm de ancho y 14 cm de alto, con una capacidad de 5.93 litros, los electrodos utilizados fueron de material hierro y aluminio con dimensiones de 7 cm x 10 cm y un grosor de 3 mm, a una separación de 15 mm entre placas, determinó la eficiencia en función de la reducción de DQO. Obtuvo los siguientes resultados, en cuanto a la remoción de la carga orgánica en la reducción de la demanda química de oxígeno con la celda de electrocoagulación demostró que los valores óptimos de pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento, fueron de 6.8, 44.39 A/m² y 45 minutos, logrando una remoción del 84.96% de DQO.

Apaza (2020), estudió los efectos de biosólidos de PTAR como abono en cultivos de plantones de Mioporo (*Myoporum laetum*). Consideró las siguientes proporciones: M1 (100% tierra agrícola), M2 (30% de biosólido-70% tierra agrícola), M3 (50% de biosólido-50% de tierra agrícola), M4 (70 % de biosólido-30% de tierra agrícola) en 20 plantones; las variables que estudió fueron la altura de la planta, el número de hojas y el número de ramificaciones. Tras 8 semanas se realizaron las mediciones encontrando los siguientes resultados: de todas las

proporciones la que tuvo mejores resultados fue la M2 (30% de biosólido-70% tierra agrícola) en las tres variables evaluadas.

2.1.3. Antecedentes regionales

Apaza (2019), estudió la mejor combinación de factores para obtener los mejores resultados en un proceso de electrocoagulación en la reducción de materia orgánica de las aguas de un río. La celda que empleó fue de tipo Batch a escala de laboratorio con un volumen de 4 litros, empleó electrodos de material hierro y aluminio de dimensiones 10 cm x 7 cm con un grosor de 3 mm, y un 15 mm de distanciamiento de placas. El diseño experimental que utilizó fue de diseño factorial en donde tuvo factores como la densidad de corriente y tiempo de tratamiento. Los resultados que obtuvo para la mejor configuración de factores fueron a 58.25 A/m² de densidad de corriente y tiempo de 30 minutos, logrando una remoción de la turbiedad del 98.58%.

Cancapa (2019), evaluó la eficiencia del proceso de electrocoagulación en la reducción de materia orgánica de aguas residuales domésticas. La celda que utilizó tuvo medidas de 15 cm de ancho, 50 cm de largo y 20 cm de alto y una capacidad de 12 l, con una configuración de electrodos de 7 ánodos y 7 cátodos a una separación de 25 mm. Los tratamientos que realizó fueron a un tiempo de 30 minutos con distintos valores de voltaje siendo 6, 7, 8, 9 y 10 respectivamente. Los resultados que obtuvo para el mejor tratamiento fueron con un tiempo de 30 min de tratamiento, siendo el valor óptimo de 10 V, logrando remover el 52% de carga orgánica.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Calidad del agua

La calidad del agua es el resultado de una comparación en cuanto a ciertas características, tales como las características físicas, químicas y microbiológicas que se encuentran presentes en el agua, con el contenido en las normas que las regulan (Minchan et al., 2018). La calidad de agua potable indica las condiciones para que este recurso sea apto para consumo. El índice de calidad del agua, se caracteriza por agregar en el proceso de evaluación ciertos parámetros como físicos, químicos y microbiológicos (Baloïtcha et al., 2022). La alteración de la calidad de agua en cierto tiempo, es debido a la capacidad de autodepuración de

la determinada masa de agua (Liu et al., 2021); por ello el desconocimiento de estos fenómenos físicos, químicos y microbiológicos que ocurren en los cuerpos de agua, pone en peligro la salud y bienestar de las personas que la consumen (Dolores, 2018).

2.2.2. Factores que alteran la calidad del agua

Los factores que alteran la calidad del agua pueden ser: los factores hidrológicos y meteorológicos, tales como precipitaciones, escorrentía, temperatura, velocidad del viento y las actividades antropogénicas como la urbanización, el desarrollo económico y la producción agrícola (Liu et al., 2021). La industrialización y urbanización han provocado una gran carga de contaminación en los ríos, deteriorando el entorno de las aguas fluviales (Xu et al., 2022), mediante el vertimiento de aguas industriales, aguas domésticas y la producción ganadera-agrícola (García-González et al., 2021). Por ello es de suma importancia investigar la influencia del desarrollo socioeconómico sobre la calidad del agua para identificar los factores principales que provocan su deterioro (Feng et al., 2021).

Los parámetros fisicoquímicos que generalmente se miden para indicar la calidad de agua son: los parámetros químicos (rangos de sustancias químicas tales como amoníaco, cloruros, sulfatos, sólidos disueltos, pH), parámetros físicos (sabor, color, olor, turbidez, conductividad eléctrica) (Conejeros et al., 2021). Así como también los parámetros como la temperatura, el oxígeno disuelto (Mora et al., 2020). Los parámetros más utilizadas para la evaluación físico y química de los cuerpos de agua son el pH, DBO₅, el OD, especies de nitrógeno como el amonio o nitrato, el fósforo total, y los sólidos suspendidos totales (Samboni et al., 2007).

Los contaminantes microbiológicos del agua provocan un deterioro de la calidad del agua, lo cual es un riesgo muy potencial para la salud de las personas (Ye et al., 2022). Los parámetros microbiológicos, así como los parámetros fisicoquímicos también son importantes para evaluar el índice de calidad del agua para consumo humano (Duarte-Jaramillo et al., 2021); ya que estos microorganismos pueden ser bioindicadores de la calidad de agua, facilitando de esta manera la implementación de medidas eficientes para su tratamiento (Ríos-Tobón et al., 2017). Por ejemplo, la presencia de las bacterias coliformes fecales indica contaminación fecal en el agua, y microorganismo como la *Pseudomonas*

aeruginosa indican la contaminación y el deterioro del cuerpo de agua (Rodríguez et al., 2018).

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) es un parámetro que describe la cantidad de O₂ disuelto en el agua que se requiere para la biotransformación de la materia orgánica por parte de microorganismos aerobios (Bezsényi et al., 2021). La DBO₅ de cinco días, es la cantidad total de oxígeno que consumen los microorganismos en condiciones aerobias en los primeros cinco días de biodegradación. La DBO₅ es uno de los indicadores más importantes para la medición de la contaminación de aguas residuales y agua potable (Raffo & Ruiz, 2014). Una alta concentración de DBO₅ indica una baja cantidad de oxígeno disuelto, ya que el oxígeno disponible en el cuerpo de agua es consumida por las bacterias, en consecuencia inhibe el crecimiento y desarrollo de los organismos acuáticos y los peces (Rahman et al., 2021).

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de los componentes del agua por medio de reacciones químicas (Déniz, 2010). Es un segundo método para cuantificar la cantidad de oxígeno de una masa de agua; si la DBO₅ utiliza microorganismos, la DQO utiliza un agente químico oxidante (dicromato de potasio o permanganato de potasio) (Woodard & Curran, 2006). En la prueba de DQO la concentración de materia orgánica en equivalentes de oxígeno se puede determinar a partir de la diferencia de las cantidades iniciales y finales del oxidante en la muestra (Hu & Grasso, 2005).

2.2.3. Agua potable

El agua potable es aquel recurso que no produce ningún riesgo significativo para la salud cuando es consumida durante toda la vida; a su vez, el agua potable es adecuado para todos los usos domésticos tradicionales (OMS, 2006). En el planeta Tierra, existen grandes cantidades de agua, pero no toda es apta para el consumo humano, ni para la satisfacción de otras necesidades humanas, lo cual es un problema que genera escasez de agua para determinados sectores de la población (Mendizábal & Sedano, 2010).

Los problemas del cambio climático, las sequías, el desmesurado crecimiento de la población, la creciente contaminación de fuentes superficiales, el aumento de

la demanda y la inadecuada gestión en los últimos años han esclarecido los escasos recursos de agua dulce en todo el mundo lo cual ha provocado una peligrosa escasez de agua (Sánchez, 2020). Muchas familias se han visto en la necesidad de almacenar agua en tanques de almacenamiento frente al ineficiente suministro de agua potable; pero un control constante y la aplicación de estrategias de mitigación podría disminuir los riesgos potenciales asociados a esta práctica (Salehi, 2022). La población, frente al problema de la escasez de agua, se ha visto en la necesidad de depender de otras fuentes de abastecimiento de agua, tales como los pozos, los manantiales, los arroyos y las perforaciones; pero estas aguas son susceptibles a la contaminación química y microbiana (Brenda et al., 2021).

2.2.4. Tecnologías para el tratamiento de agua potable

Las formas de tratamiento de agua para consumo se pueden dar por dos maneras generalmente, las cuales son las convencionales y las avanzadas. Una planta de tratamiento de agua convencional puede integrar los procesos básicos, los cuales son la coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (Villafuerte & Romero, 2019).

a. Tratamiento convencional

El tratamiento de agua potable de forma convencional consiste principalmente en los siguientes procesos: la coagulación – floculación, la sedimentación y el pulido final por filtración de medios (Chew et al., 2016), a su vez Garfí et al. (2016) indica que el tratamiento convencional del agua posee procesos adicionales tales como la adsorción y la desinfección.

- **Coagulación-floculación:** Entre los tratamientos convencionales se realizan procesos de coagulación y floculación. Proceso en el cual las partículas coloidales presentes en el agua se aglutinan en minúsculas masas (figura 1), cuya característica que poseen es tener un peso específico mayor al agua, dichos agrupados se les conoce como flóculos (Lorenzo-Acosta, 2006). La coagulación es el proceso más importante en el tratamiento de aguas, que trata en la desestabilización química de las partículas coloidales separadas, mediante la ayuda de coagulantes, ya sean naturales o reactivos químicos (Choque-Quispe et al., 2018; Ruiz, 2015). Los coagulantes químicos más frecuentes que se usan son: Sulfato de

Aluminio, Aluminato de Sodio, Cloruro de Aluminio, Cloruro Férrico, Sulfato Férrico, Sulfato Ferroso y Polielectrolitos (Ruiz, 2015). El tipo de coagulante más empleado es el Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$ gracias a su reducido costo en el mercado y su gran efectividad en comparación de los otros coagulantes, pero, su desventaja en su aplicación es el pequeño rango de pH que puede ser utilizado (Rivas-Romero et al., 2017). En la fase de la floculación es en la que las partículas coaguladas y aquellos precursores precipitados se agregan, de esta manera formando flóculos (Liang et al., 2009).

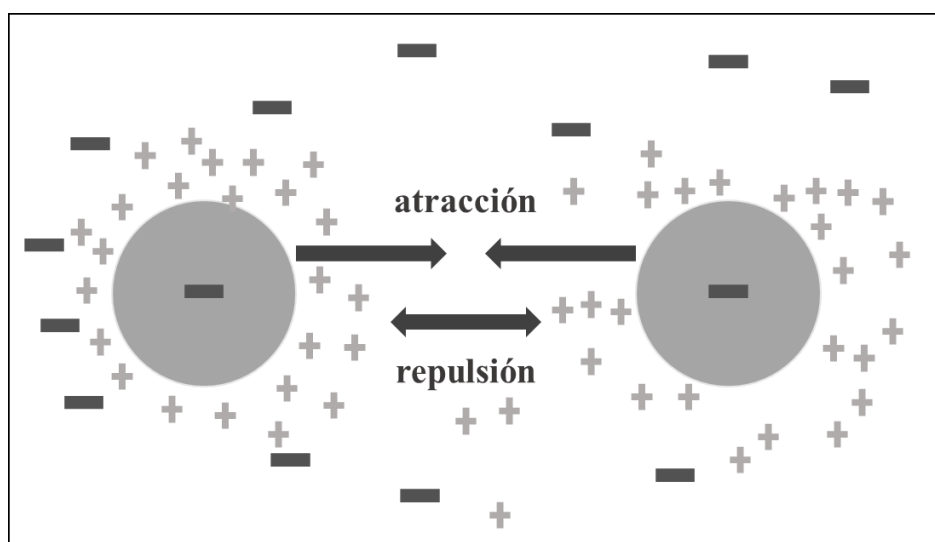


Figura 1. Estabilidad de los coloides presentes en el agua
Fuente: Lorenzo-Acosta, (2006)

- **Sedimentación:** El proceso de sedimentación consiste en la remoción o eliminación de partículas contaminantes más pesadas del agua por acción de la fuerza de gravedad (Uc et al., 2008), y al sedimentar arrastran consigo una parte del color del agua como también ciertos compuestos químicos, lo cual refleja una menor coloración del agua y una disminución de DQO (Solis et al., 2013).

Uc et al. (2008) describe el proceso de manera que en la zona A-B conocida como la zona más clara, las partículas descienden con mayor velocidad, en la zona B-C también llamada la zona turbia, se concentran las partículas, en la zona C-D que es la parte inferior de la zona turbia, se produce una disminución de la velocidad de sedimentación y en la zona D-E que se le conoce como la zona de compresión, los flóculos se forman y ejercen una presión sobre las capas más inferiores (figura 2).

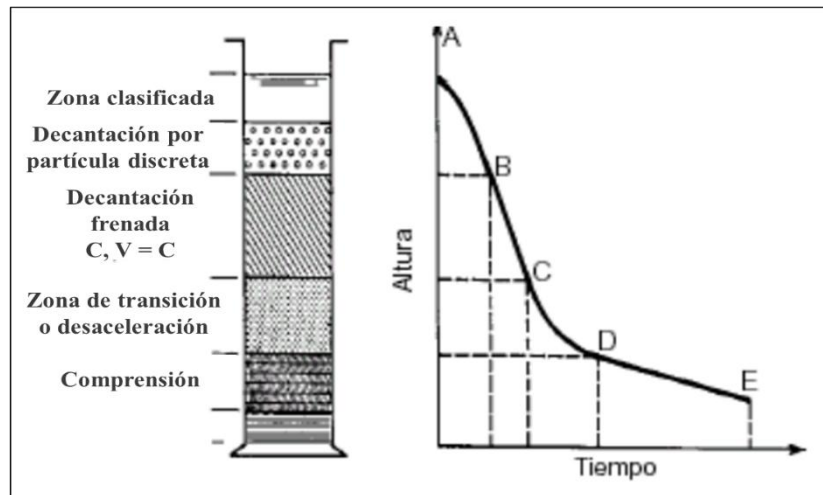


Figura 2. Diagrama del proceso de sedimentación por zonas
Fuente: Uc et al., (2008)

- Filtración:** La filtración es el proceso en el cual se separan las partículas y cantidades pequeñas de ciertos microorganismos, tales como las bacterias y virus, a través de un medio poroso (figura 3) (Chulluncuy, 2011), además en esta etapa también se logran reducciones de turbiedad en el agua considerando un proceso clave para retener partículas que no fueron sedimentadas en el proceso de coagulación – floculación (Veliz et al., 2016).

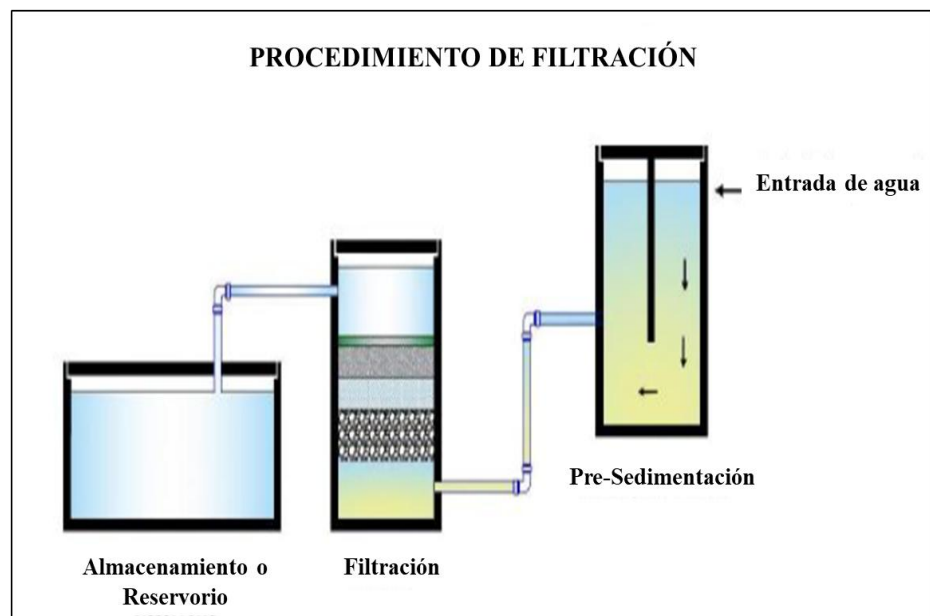


Figura 3. Etapa de la filtración en el tratamiento de aguas
Fuente: Rodríguez et al., (2018)

- Desinfección:** Finalmente, el último proceso en una planta de tratamiento de agua potable es la desinfección, el cual consiste en la eliminación o

inactivación de microorganismos patógenos presentes en el recurso (Ocampo-Rodríguez et al., 2022); el cloro es un compuesto químico muy utilizado en la desinfección debido a que es el más económico y popular en el mundo (figura 4), pero también existen métodos más sofisticados tales como la ozonización y la luz ultravioleta (Velandia et al., 2019). Durante este proceso influyen factores tales como: los microorganismos presentes en el agua y su comportamiento, la naturaleza del compuesto desinfectante, el pH y la temperatura del agua y el tiempo de contacto (Chulluncuy, 2011).

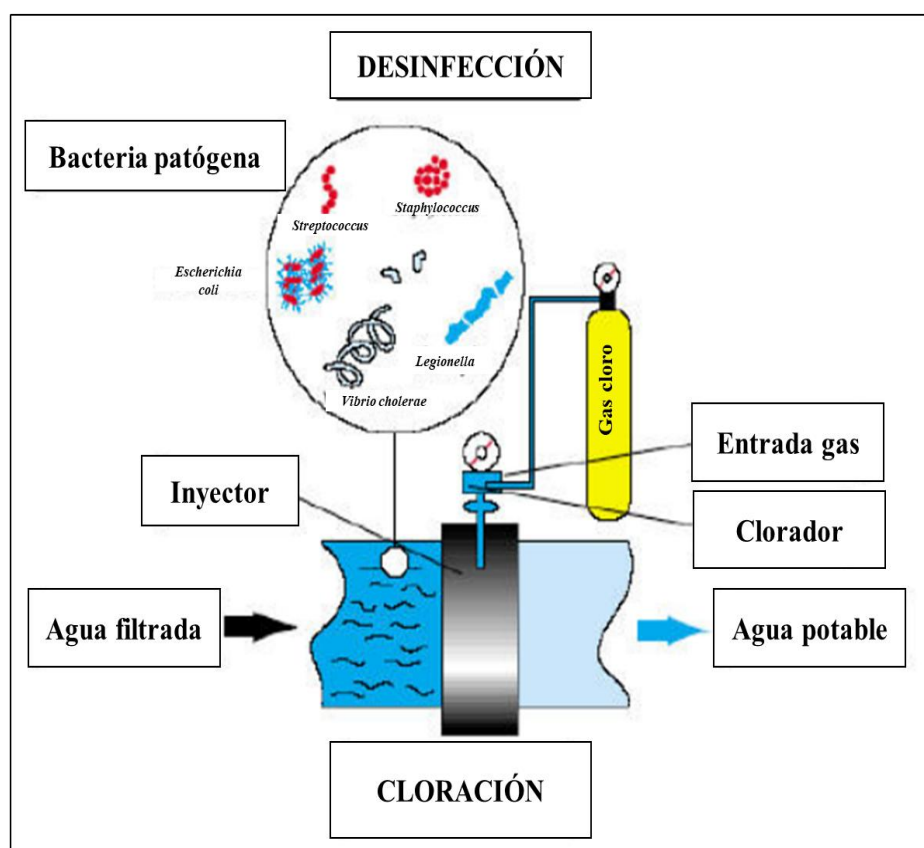


Figura 4. Proceso de la cloración para la potabilización del agua
Fuente: Ramirez, (1998)

b. Tratamiento avanzado

Por otro lado, las tecnologías avanzadas como la filtración por membranas o tecnología de membranas que inciden altamente en el desarrollo de mejores productos conservando el medio ambiente (Solís et al., 2017), estas membranas que en función del tamaño de poro, eliminan especies disueltas no biodegradables, contaminantes orgánicos y patógenos (figura 5) (Agabo, 2018), la microfiltración tiene un tamaño de poro de 0,01 a 1,2 μm que elimina

gran material coloidal y material suspendido (Damian, 2019); la ultrafiltración comprende un tamaño de poro de 10 y 0,1 μm que retendrá hasta la *E. coli* (Vivanco, 2020); la nanofiltración tiene un tamaño de poro de 200 y 1000 dalton, que logra reducir la carga contaminante de origen orgánico e inorgánico (Otero, 2017); y la ósmosis inversa que tiene un tamaño de poro tan pequeño que remueve casi el 100% de sólidos orgánico e inorgánicos disueltos en el agua (Namuche, 2018); se podrá apreciar un resumen en la tabla 1.

Tabla 1

Tecnologías de tratamiento avanzando para potabilizar el agua

Tecnología	Fundamento y explicación	Fuente
Microfiltración	Es un proceso con la capacidad de tratar eficientemente distintos tipos de aguas residuales contaminadas. Cuenta con un tamaño de poros de entre 1-5 μm , con un mecanismo de separación por tamizado a través de macroporos ≥ 50 nm. Esta tecnología llega a remover sólidos en suspensión, moléculas orgánicas, así como también partículas coloidales y microorganismos patógenos como por ejemplo las bacterias.	(Olajire, 2020; Poerio et al., 2022)
Ultrafiltración	Cuenta con un tamaño de poros de entre 0.01–0.1 μm , con un mecanismo de separación por tamizado a través de mesoporos $\geq (2 - 50$ nm). Esta tecnología llega a remover moléculas de soluto disueltas, así como también partículas coloidales en suspensión, remueve bacterias y macromoléculas como proteínas, ácidos húmicos y virus. Una de las desventajas que poseen es que las membranas de ultrafiltración son elevados precios en términos económicos y costos, ya que, al incorporar esta tecnología, también se verá acompañada de una gran inversión económica, como mantenimiento.	(Olajire, 2020; Solís et al., 2017)

Tabla 1 (Continuación)

Nanofiltración	<p>Cuenta con un tamaño de poros de entre 0.001–0.01 μm, con un mecanismo de separación por medio de una combinación carga-rechazo, solubilidad-difusión, y por tamizado a través de microporos ($< 2 \text{ nm}$). Esta tecnología llega a remover el color, los compuestos orgánicos volátiles, pesticidas, mtbe (metil tert-butil éter), iones multivalentes tales como Mg^{2+}, Al^{3+}, SO_4^{2-}, PO_4^{3-} etc., y moléculas cargadas o polares. Estas membranas de nanofiltración desempeñan un rol importante en diversas aplicaciones para la eliminación de contaminantes, pero se necesitan criterios para su buen desempeño, tales como la dificultad de controlar y manipular el tamaño de los poros, así como también el control de su ensuciamiento.</p>	<p>(Olajire, 2020; Yadav et al., 2022)</p>
Ósmosis inversa	<p>Este tipo de membranas se utiliza ampliamente con la finalidad de separar los compuestos contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos presentes en las aguas residuales. Cuenta con un tamaño de poros $< 0.001 \mu\text{m}$, con un mecanismo de separación basada en la diferencia de solubilidad y difusión del agua y los solutos. Esta tecnología llega a remover hasta los componentes de bajo peso molecular tales como los iones inorgánicos y los componentes metálicos como el arsénico y plomo. La ósmosis inversa es un proceso final en el tratamiento de aguas y su utilización va directa, sobre todo en la desalinización del agua.</p>	<p>(An et al., 2022; Khan et al., 2023; Olajire, 2020)</p>

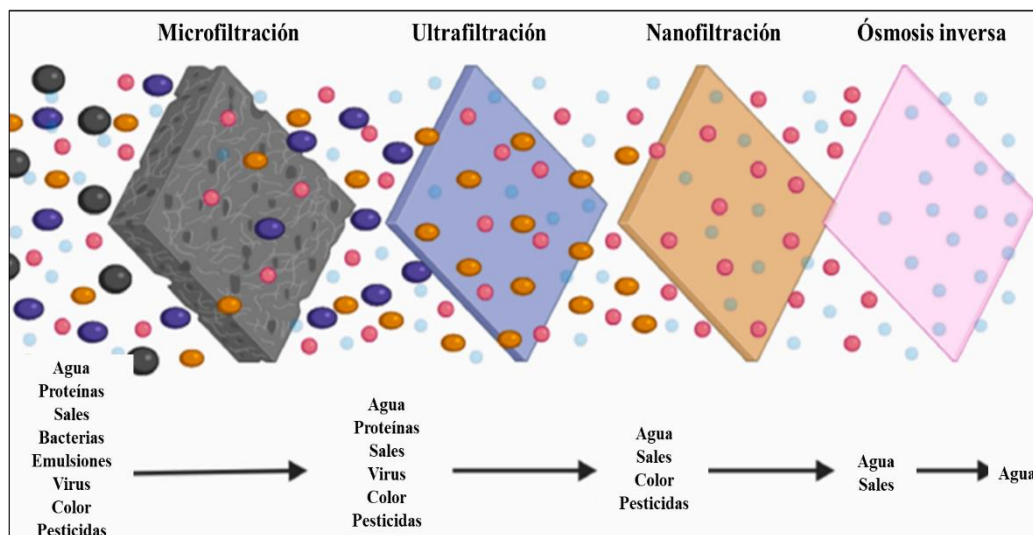


Figura 5. Tipos de membranas y el tipo de contaminante rechazado en cada una
Fuente: Lustenberger & Castro-Muñoz, (2022)

2.2.5. Electrocoagulación

En la actualidad, existe una gran demanda y preocupación por desarrollar tecnologías de tratamiento de aguas residuales más eficientes. Las tecnologías de tratamiento electroquímicas para la remediación de aguas y para la obtención de agua para consumo humano son una clave hacia las tecnologías sostenibles (Suss et al., 2022). Los métodos electroquímicos para el tratamiento de aguas, han ido ganando cierto atractivo por varias ventajas, tales como la escalabilidad, la modularidad, los prometedores sistemas distribuidos y la alta eficiencia energética, haciendo posible utilizar fuentes de energías renovables para producir energía para los sistemas electroquímicos (Kumar & Pan, 2020). En particular, ciertas tecnologías de tratamiento, tales como la electrooxidación y la electrocoagulación, debido a su amplia gama de aplicación y compatibilidad con el medio ambiente (Asfaha et al., 2021).

La electrocoagulación es una opción de tecnología que se basa principalmente en la remoción de contaminantes presentes en el agua mediante el desgaste de los electrodos para la formación del coagulante in situ (Canto-Ríos et al., 2017); combina la coagulación convencional y el tratamiento electroquímico, con el fin de eliminar las partículas suspendidas (figura 6) (Peláez, 2020). La electrocoagulación consta de una celda electroquímica, una fuente y los electrodos (figura 7) que reduce los contaminantes del agua residual (Magaña-Irons et al., 2020), los electrodos de la celda pueden ser de distintos materiales tales como el

cobre, hierro, titanio y aluminio, que dependen del tipo de material influirá durante el proceso de remoción (Muñoz et al., 2022), a su vez los electrodos se encargan de aportar iones que desestabilizan las partículas coloidales, de esta manera reemplazando los compuestos químicos en una planta de tratamiento convencional (Forero-Buitrago et al., 2020).

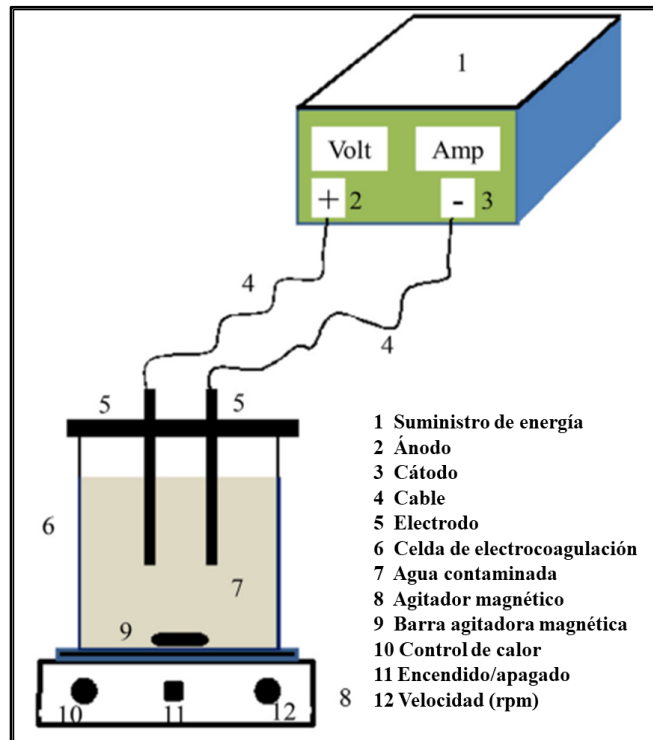


Figura 6. Proceso experimental de la electrocoagulación
 Fuente: Ebba et al., (2022)

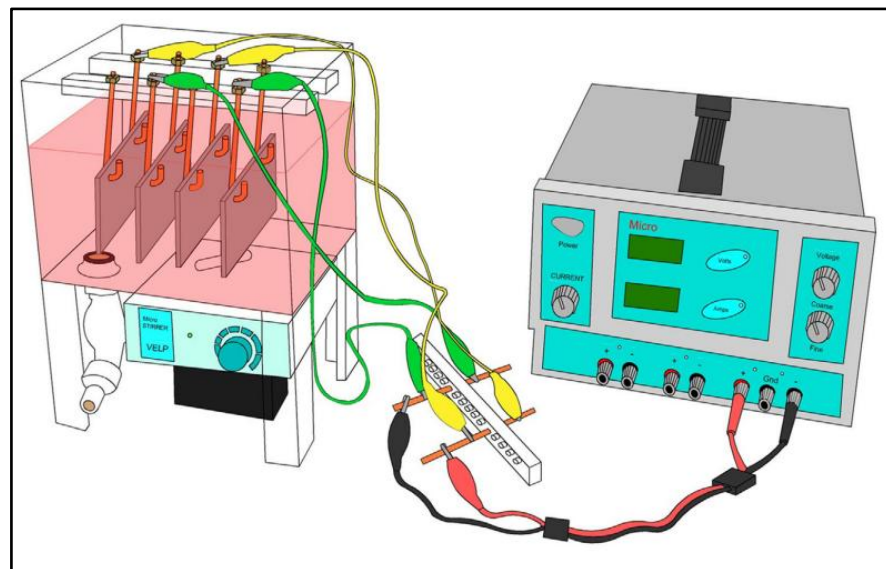


Figura 7. Ilustración de la celda de electrocoagulación conectada a la fuente de poder
 Fuente: Taheri, (2022)

a. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación

En la tecnología de la electrocoagulación se pueden encontrar distintas ventajas, así como también algunas desventajas, las cuales se presenta en la tabla 2.

Tabla 2

Ventajas y desventajas de la tecnología de la electrocoagulación

Ventajas	Desventajas
Esta tecnología es capaz de reducir una amplia variedad de contaminantes, tales como metales, materia orgánica, etc.	Es necesario la reposición de los electrodos de sacrificio, ya que estas se disuelven por el paso de corriente y se oxidan.
El agua tratada por esta tecnología contiene menor concentración de sólidos disueltos a diferencia de la coagulación química.	Los lodos generados contienen altas cantidades de hierro o aluminio, y va a depender del material de electrodo de sacrificio que sea empleado.
Los costos de operación son menores a diferencia de los procesos convencionales empleando polímeros.	El óxido que se forma en el ánodo puede impedir el paso de la corriente, lo cual afecta negativamente en la eficiencia de la tecnología.
Evita la utilización de químicos, aminorando la posibilidad de una contaminación secundaria.	Esta tecnología podría ser costosa, en zonas donde el costo de la energía sea demasiado alto.
Genera lodos más densos y en mínimas cantidades a diferencia de la coagulación química, disminuyendo la problemática de disposición de lodos.	

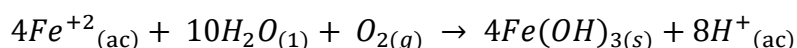
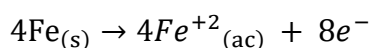
Fuente: Restrepo et al., (2006)

b. Reacciones involucradas en la electrocoagulación

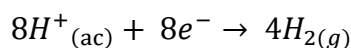
En los electrodos suceden varias reacciones que ceden iones positivos y negativos al proceso (figura 9). Empezando por el ánodo que proporciona iones metálicos, cuyo electrodo se le llama también de sacrificio, ya que la placa metálica se disuelve, mientras tanto el otro electrodo, el cátodo, se encuentra sin disolverse (Restrepo et al., 2006).

- Mecanismo I: Formación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (hidróxido férrico)

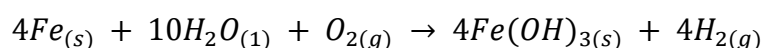
Las siguientes reacciones suceden en el ánodo:



Las siguientes reacciones suceden en el cátodo:

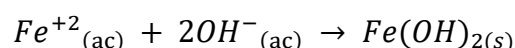
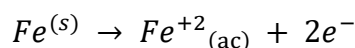


Reacción resultante global:

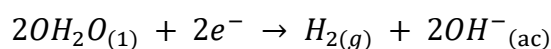


- Mecanismo II: Formación de $Fe(OH)_2$ (hidróxido ferroso)

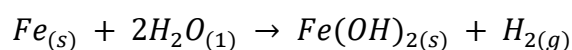
Las siguientes reacciones suceden en el ánodo:



Las siguientes reacciones suceden en el cátodo:



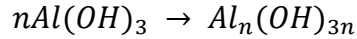
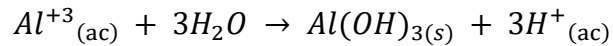
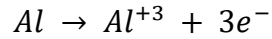
Reacción resultante global:



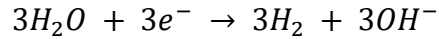
Posterior a la formación de los hidróxidos de hierro, los coloides se juntan y aglomeran, exclusivamente los que poseen carga negativa, y luego otras partículas de contaminantes interaccionan con estos aglomerados, de manera que son removidos por las formaciones de complejos o las atracciones electrostáticas (Larue et al., 2003).

El otro caso particular que se tiene es cuando el aluminio actúa como el ánodo, de manera que se dan las siguientes reacciones (Bayramoglu et al., 2004; Kobya et al., 2003; Mollah et al., 2001; citado por Restrepo et al., 2006).

En el ánodo suceden las reacciones:



En el cátodo sucede la reacción:



Los iones Al^{+3} cuando se combinan con los hidróxidos (OH^{-}) reaccionan con la finalidad de formar especies de un monómero: $Al(OH)^{2+}$, $Al_2(OH)_2^{+}$, $Al(OH)_2^{+}$ y otras especies poliméricas: $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ y $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ que por acción de precipitación se produce el $Al(OH)_{3(s)}$, como se aprecia en la reacción que ocurre en el ánodo. El $Al(OH)_{3(s)}$ es una especie amorfa de característica gelatinosa, que se caracteriza por una gran área superficial, con particularidades absorbentes y que es fundamental para los procesos de atracción y adsorción de contaminantes del agua (Bayramoglu et al., 2004; Holt et al., 1999; citado por Restrepo et al., 2006).

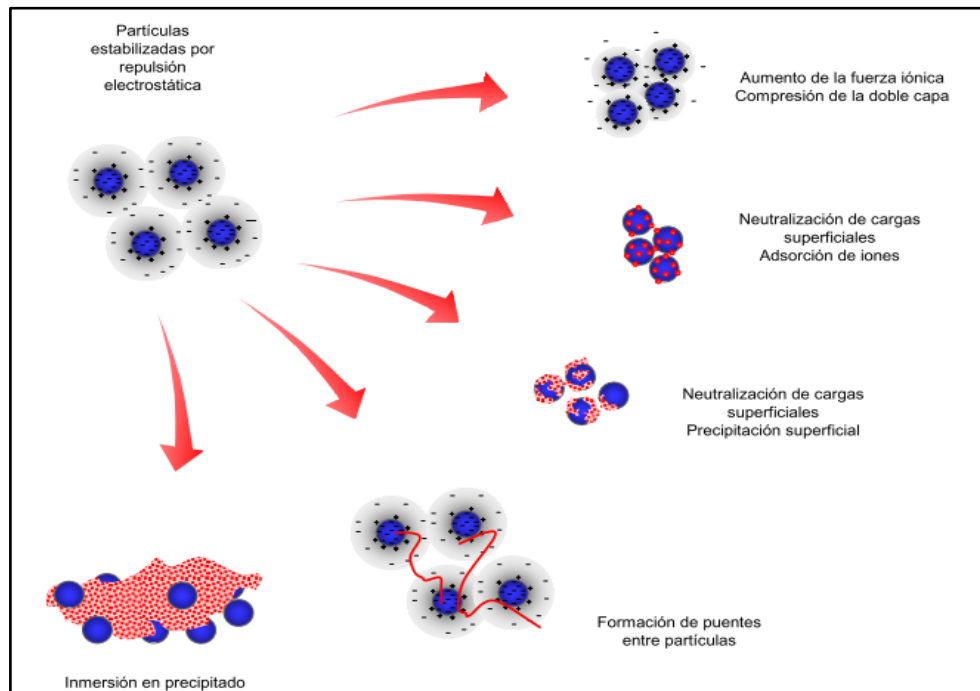


Figura 8. Coagulación de las partículas coloidales

Fuente: Martínez, (2007)

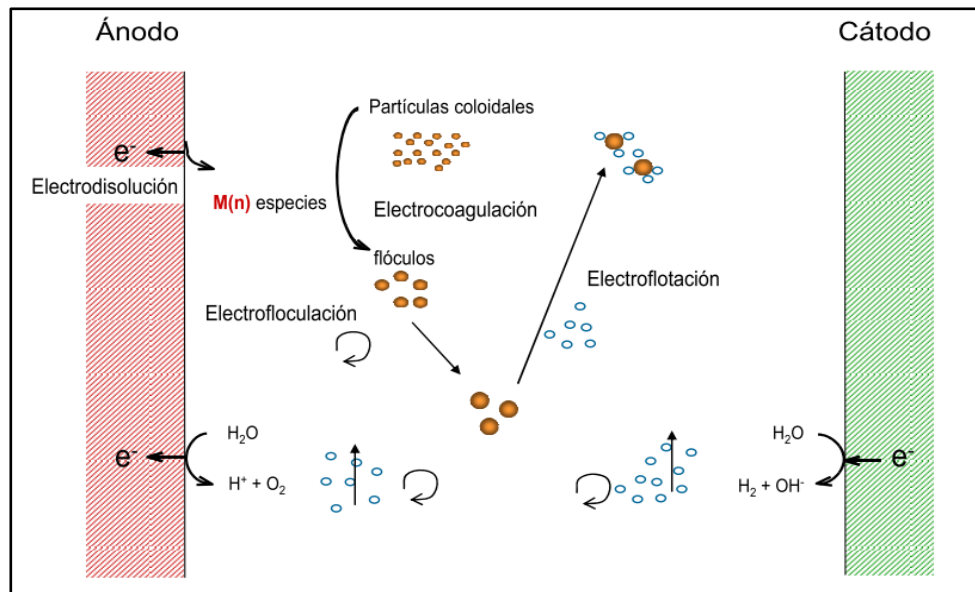


Figura 9. Procesos que están involucrados en una celda de electrocoagulación
Fuente: Martínez, (2007)

c. Factores que influyen en el proceso de electrocoagulación

- **La densidad de corriente:** Factor determinante durante el proceso de electrocoagulación, puesto que a medida que se va incrementando, la eficiencia de remoción de contaminantes y a su vez el consumo energético también se incrementa (Adhoum & Monser, 2004). En la electrocoagulación, el suministro de corriente determina la cantidad de iones de hierro Fe^{+2} o iones de aluminio Al^{+3} que son liberados por los electrodos en el sistema (Restrepo et al., 2006).
- **pH:** El factor de pH influye significativamente en la electrocoagulación, ya que de esta depende la eficiencia de la corriente eléctrica en el transcurso de la solubilidad del metal para producir los hidróxidos (Chen, 2004).
- **Temperatura:** Durante el proceso de electrocoagulación se ha determinado que la eficiencia en la corriente eléctrica se eleva en un inicio hasta los 60 °C, límite máximo para luego sufrir un descenso. Este incremento de la eficiencia relacionada a la temperatura se atribuye a un aumento de la destrucción de película del óxido de aluminio que se forma en la parte superficial del electrodo (Restrepo et al., 2006).
- **Conductividad eléctrica:** La conductividad eléctrica es un factor que determina la eficacia en la eliminación de la carga contaminante (Asfaha et al., 2021). La elevación de la densidad de corriente eléctrica es

provocada por el incremento de la conductividad. En la celda de electrocoagulación cuando el voltaje se mantiene constante y además el incremento de la conductividad, con una constante densidad de corriente, se produce una disminución del voltaje que se aplica (Bayramoglu et al., 2004; Chen et al., 2002).

2.2.6. Lodos residuales

Durante el proceso de la electrocoagulación también se generan lodos residuales que van depositándose en la parte inferior por acción de la gravedad (figura 10), esto por efecto de las reacciones, el cual es otro parámetro importante a evaluar, ya que la mayoría de contaminantes del agua se separan formando este residuo (Alimohammadi et al., 2019), que a diferencia de los coagulantes químicos, se producen en cantidades menores y son más fáciles de filtrar (Moussavi et al., 2021; Oden & Sari-Erkan, 2018); pero se debe tener en cuenta que estos lodos residuales pueden contener altos niveles de aluminio (Al), según la intensidad de corriente utilizada durante el proceso electroquímico (Aguilar-Ascón et al., 2021). La generación de estos lodos residuales durante el proceso de la electrocoagulación deben ser estudiados y analizados para un posterior tratamiento (Soukaina et al., 2022).

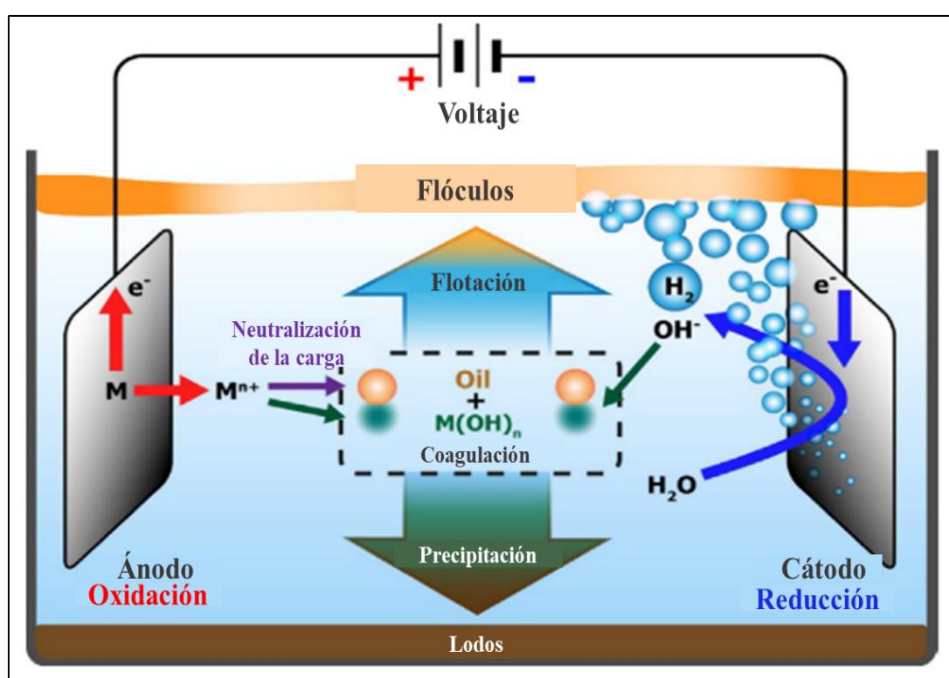


Figura 10. Principio del proceso de la electrocoagulación
Fuente: An et al., (2017)

a. Aprovechamiento de los lodos

Los lodos residuales generados a partir del tratamiento de aguas aerobias o anaerobias pueden ser reutilizados o aprovechados como abonos, enmiendas o restauradoras de suelos para mejorar su calidad, dependiendo de las características que presentan, de acuerdo a su composición física, química y biológica (tabla 3) (Donado, 2013).

Tabla 3

Análisis comparativo de las características químicas habituales de los lodos crudos y los tratados mediante digestión anaerobia

Parámetro	Unidades	Lodos crudos	Lodos digeridos anaeróticamente (Biosólidos)
pH	Unidades	5 – 8	6.5 – 7.5
Alcalinidad	mg/l de CaCO ₃	500 – 1500	2500 – 3500
Nitrógeno	% de ST	1.5 – 4	1.6 – 6
Fosforo	P ₂ O ₅ % de ST	0.8 – 2.8	1.5 – 4
Aceites, grasas	% de ST	6 – 30	5 – 20
Proteínas	% de ST	20 – 30	15 – 20
Ácidos orgánicos	mg/l Hac	6800 – 10000	2700 – 6800
Sólidos totales	%	2 – 8	6 – 12
Sólidos volátiles	% de ST	60 – 80	30 – 60

Fuente: Crites & Tchobanoglous, (1998)

- **Aplicación de biosólidos al suelo como enmienda:** Los lodos residuales debido a su alto contenido de nutrientes pueden ser aprovechados; estos pueden ser aplicados al suelo como enmienda agrícola a través de biosólidos, Cruz (2015) indica a través de su investigación que la aplicación de los biosólidos que provienen del tratamiento de aguas residuales, por ser una fuente de nutrientes, ácidos húmicos y materia orgánica, mejoran la calidad del suelo y mejor rendimiento de los cultivos.

- **Aplicación a cultivos agrícolas:** Así también Martínez et al. (2020) en el estudio que realizó demostró que los biosólidos producidos a través de una PTAR tiene resultados positivos en el cultivo de maíz, principalmente en las características del diámetro de tallo, altura de la planta y la cantidad de granos del cultivo. Por ello la utilización de estos biosólidos ayudan a reducir la utilización de fertilizantes químicos y reducir el impacto ambiental en el suelo.

2.2.7. Quinoa (*Chenopodium quinoa*)

La *Chenopodium quinoa*, tradicionalmente conocida como la quinoa, es una especie de pseudocereal producido en Ecuador, Bolivia y Perú, que cuenta con una variedad de 3000 especies. Esta planta puede ser cultivada desde los 2000-3000 m.s.n.m. en zonas de media montaña hasta >3000 m.s.n.m. en zonas de alta montaña (Campos-Rodríguez et al., 2022; Vargas et al., 2019) y presenta la siguiente taxonomía de acuerdo a la tabla 4 y su fenología de acuerdo a la tabla 5.

Tabla 4

Taxonomía y descripción botánica de la quinoa

Posición taxonómica	
Reino	Vegetal
División	Fanerógamas
Clase	Dicotiledoneas
Sub clase	Angiospermas
Orden	Centrospermales
Familia	Chenopodiaceae
Género	<i>Chenopodium</i>
Sección	Chenopodia
Subsección	Cellulata
Especie	<i>Chenopodium quinoa</i>

Fuente: FAO, (2013)

a. Fenología de la quinoa

La quinoa presenta las siguientes etapas fenológicas en toda su etapa de desarrollo.

Tabla 5

Estados fenológicos de la quinua.

Nº	Estado fenológico	Periodo (días después de la siembra)	Descripción
1	Emergencia	5 – 10	La plántula emerge del suelo con las hojas cotiledóneas extendidas.
2	Crecimiento vegetativo	11 – 21	Aparecen las dos primeras hojas verdaderas.
		22 – 30	Inicio de brotes en la axila del primer par de hojas verdaderas.
		31 – 45	Aparecen 3 pares de hojas verdaderas.
3	Ramificación	45 – 50	Ramificación lateral profusa y mueren y caen las hojas cotiledonares.
		55 y 60	Inicio de la espiga, aparece el primer par de hojas verdaderas de color amarillento.
4	Crecimiento reproductivo	65 – 70	Inicio de la inflorescencia, aparecen racimos evidentes en hojas del ápice de la planta.
		75 – 80	Inicio de la floración.
		90 – 100	Plena floración, el 50 % de flores de espiga están abiertas.
		100 – 130	Granos lechosos, crecimiento de granos.
5	Llenado de grano y madurez	130 – 160	Granos pastosos, el grano inicia su desecamiento.
		160 – 180	Madurez fisiológica, el grano presenta resistencia a la presión con bajo contenido de humedad.

Fuente: Pinto, (2015)

2.2.8. Consumo de agua potable en Juliaca

La ciudad de Juliaca es el eje central comercial más importante de Puno, y su población se ve afectada por las insatisfechas necesidades de acceso al agua potable, cuya fuente de abastecimiento es el río Coata, que se ve perjudicada por la presencia de contaminantes como los residuos sólidos y aguas servidas (Llanos & Roque, 2021). Debido al crecimiento poblacional en la ciudad de Juliaca, muchos usuarios están insatisfechos con el servicio de agua potable que se brinda, ya que el agua presenta olor, color y sabor anormal (Tito et al., 2020). La problemática del agua potable en Juliaca, ha llevado a que los pobladores recurran a fuentes alternativas de agua, tales como los pozos, lo cual es una preocupación

puesto que estas aguas subterráneas están sometidas a potenciales fuentes de contaminación (Tacuri, 2019).

2.2.9. Lago Titicaca

La cuenca del Lago Titicaca está ubicada en Sudamérica, al sur del Perú y el noreste de Bolivia, con coordenadas 14 ° 05' y 16° 50' de longitud norte y 68° 10' y 71° 05' longitud oeste (MINAM, 2013). Es el segundo lago más grande de Sudamérica, con una superficie total de 8400 km², de los cuales a Perú le corresponde el 55 % y el 45 % al Estado de Bolivia; es un cuerpo de agua dulce importante del altiplano peruano y es considerado un ecosistema frágil ecológica y ambientalmente (Ocola & Laqui, 2017).

Muchas cuencas de los ríos depositan sus aguas en el Lago Titicaca, los más relevantes por el área de su cuenca, la longitud de sus cauces y su caudal son los siguientes: la cuenca Suches, la cuenca Huancané, la cuenca Ramis, la cuenca Coata, la cuenca Illa y la cuenca Ilave (Ocola & Laqui, 2017).

2.2.10. Río Coata

La cuenca del río Coata está ubicada en el departamento de Puno (figura 11), esta es una de las cuencas de mayor interés económica de Puno debido a las actividades económicas que se desarrollan como la agricultura, ganadería, etc. (Santos, 2016), además que la cuenca del río Coata es la única fuente de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Juliaca, provincia de San Román (Huacani, 2014). Esta cuenca es considerada una de las principales arterias fluviales que desemboca en el Lago Titicaca (Quispe et al., 2019).

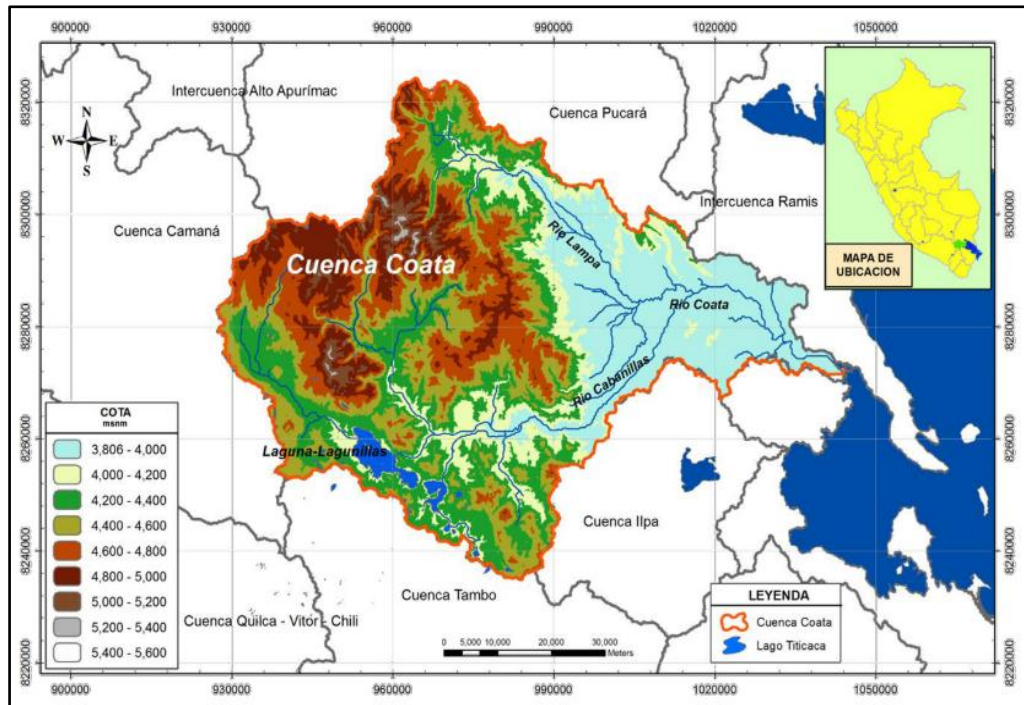


Figura 11. Ubicación geográfica de la cuenca del río Coata
Fuente: Santos, (2016)

2.2.11. Normativa ambiental

El MINAM mediante el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM establece los niveles de concentración de las sustancias, elementos, parámetros químicos, físicos y microbiológicos que se encuentran presentes en el agua en condición de cuerpo receptor y componente básico de ecosistemas acuáticos que no representen un riesgo significativo para la salud del ambiente y de las personas (MINAM, 2017).

La evaluación de la calidad del agua se realiza mediante la comparación con los Estándares de Calidad Ambiental para agua (anexo 8).

2.2.12. Análisis factorial estadístico

El análisis factorial estadístico es un modelo que representa las relaciones de un conjunto de variables. Plantea que las relaciones pueden explicarse de una serie de variables llamados factores (Ferrando & Anguiano-Carrasco, 2010). Los diseños factoriales manejan dos o más variables independientes y es muy utilizado en la investigación experimental. El análisis factorial indica el grado en que las categorías se juntan a lo largo de un número limitado de dimensiones (Hernández et al., 2014).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. **Ámbito de estudio**

El estudio se comprendió en el río Coata y el punto de monitoreo donde se obtuvieron las muestras fueron en las coordenadas Este 381308.13 y Norte 8289756.15 de la ciudad de Juliaca – Puno (figura 12).



Figura 12. Ubicación del punto de monitoreo

3.2. Tipo y diseño de la investigación

Según los niveles de investigación es “descriptivo”, porque se describirá las situaciones y eventos del cómo es y se manifiestan determinados fenómenos en un determinado tiempo y área geográfica (Pacori & Pacori, 2018).

Según la finalidad es “experimental”, porque busca conocer, para después hacer, actuar, construir y modificar (Pacori & Pacori, 2018)

Según su secuencia temporal es “prospectiva”, porque se registrará la información según van ocurriendo los hechos o fenómenos (Pacori & Pacori, 2018).

Se aplicó un diseño tipo factorial de 3 factores con 3 niveles de cada factor y 3 repeticiones, como se puede apreciar en el anexo 9, tabla 12.

3.3. Población y muestra

La población de la investigación se constituyó del agua superficial del río Coata en las coordenadas Este 381308.13 y Norte 8289756.15 de la ciudad de Juliaca.

La muestra es de tipo “no probabilístico”, porque la muestra tomada es acorde al juicio del autor.

3.4. Variables de investigación

3.4.1. Variables independientes

- Niveles de pH: 7, 8 y 9 unidades de pH.
- Densidad de corriente: 20 A/m², 30 A/m² y 40 A/m².
- Tiempo de tratamiento: 15 minutos, 25 minutos y 40 minutos.

3.4.2. Variable dependiente

- DBO₅

3.5. Hipótesis de investigación

3.5.1. Hipótesis general

La electrocoagulación reducirá la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno superior al 80% en el tratamiento de agua potable, y los lodos generados benefician como suplemento a la quinua.

3.5.2. Hipótesis específicas

- Las concentraciones de los parámetros DBO₅ y DQO se encontrarán fuera de los valores establecidos por el ECA para agua en la categoría 1.

- Las características óptimas de la celda de electrocoagulación permitirán reducir la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno.
- La eficiencia de la electrocoagulación estará directamente relacionada con los niveles de pH, densidad de corriente y del tiempo de tratamiento.
- Los lodos residuales generados tendrán una respuesta positiva en el crecimiento y desarrollo de la quinua.

3.6. Equipos, materiales y reactivos

3.6.1. Equipos

Multiparámetro AK88, espectrofotómetro dr2800 Hach, digestor DRB200 Hach, conductímetro SI ANAALYTICS-LAB 955, balanza analítica OHAUS-PX323, incubadora MEMMERT-IPP260, turbidímetro LOVIBOND Water Testing, pinza amperimétrica PRASEK, estufa eléctrica P-SELECTA-F6A, mufla eléctrica LINN HIGH THERM, plancha de calentamiento ROBAX, multímetro Digital Prasek PR-85, fuente de poder, medidor portátil de concentración de clorofila FIELD SCOUT CM 1000, refrigeradora, laptop LENOVO V15-IIL.

3.6.2. Materiales

Matraces de 50 y 100 mL, pipetas de 1, 2, 5 y 10 mL, beakers de 250, 500 y 1000 mL, frascos winkler de 300 mL, crisol de porcelana de 40 y 200 mL, probeta de 100 y 200 mL, fiola de 10 y 50 mL, micropipeta, puntas de micropipeta, papel filtro, pinzas, cono imhoff, espátula de laboratorio, tubos falcon.

3.6.3. Reactivos

Ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado, hidróxido de sodio (NaOH) grado reactivo analítico, fosfato diácido de potasio (KH_2PO_4) grado reactivo analítico, cloruro de amonio (NH_4Cl) grado reactivo analítico, sulfato de magnesio ($MgSO_4$) grado reactivo analítico, cloruro de calcio ($CaCl_2$) grado reactivo analítico, cloruro férrico ($FeCl_3$) grado reactivo analítico, ácido nítrico (HNO_3) 100%, ácido perclórico ($HClO_4$) 70%.

3.7. Métodos

3.7.1. Evaluar las características fisicoquímicas de las aguas del río Coata

Se recolectaron las muestras de agua del río Coata según el protocolo del ANA (2016) en las coordenadas Este 381308.13 y Norte 8289756.15. Se ubicó un lugar adecuado para fácil accesibilidad al río, teniendo en cuenta de que el punto de

monitoreo sea de una corriente homogénea, para la toma de muestras, se sumergieron las botellas tres veces en el agua y se enjuagaron, posterior a ello, se introdujeron los frascos a una profundidad de 20 cm de la superficie, se tomaron las respectivas muestras, y se preservó la muestra de DQO con H₂SO₄ hasta llegar a un pH ácido de 2. Se midieron los parámetros de campo (pH, Oxígeno disuelto, Temperatura y Conductividad eléctrica) y finalmente las muestras se aseguraron en un cooler para su cuidado y traslado a laboratorio para su respectivo análisis.

Para determinar la calidad del agua de las muestras de agua del río Coata, se evaluó los distintos parámetros fisicoquímicos con sus respectivas metodologías como se puede apreciar en la tabla 6.

Tabla 6

Parámetros fisicoquímicos y sus metodologías

Parámetro	Unidad	Método
pH	Unidades de pH	Standard Methods 4500 H+ – B
Conductividad eléctrica	μS/cm	Standard Methods 2510 – B
Temperatura	°C	Standard Methods 2550 – B
Oxígeno disuelto	mg/L	Standard Methods 4500-O – G
DQO	mg/L	8000 HACH digestión reactor
DBO ₅	mg/L	Standard Methods 5210 – B
Turbidez	NTU	Standard Methods 2130 – B
Sólidos totales	mg/L	Standard Methods 2540 – B
Sólidos disueltos totales	mg/L	Standard Methods 2540 – C
Sólidos suspendidos totales	mg/L	Standard Methods 2540 - D
Sólidos totales fijos	mg/L	Standard Methods 2540 – E
Sólidos volátiles totales	mg/L	Standard Methods 2540 – E
Sólidos sedimentables	mg/L	Standard Methods 2540 – F

3.7.2. Construcción de la celda de electrocoagulación

La celda de electrocoagulación se construyó a escala de laboratorio tipo Batch, de forma paralelepípedo de cara rectangular, ya que Arias et al., (2011) indica que este tipo de celda para uso en laboratorio es más adecuado para determinar las variables operativas al abordar un proceso específico; se consideró una distribución volumétrica que contempla las regiones de la zona de flotación, la zona de reacciones y la zona de sedimentación y producción de lodos (Arango & Garcés, 2007), con un volumen total de la celda de 9 litros (4/4 de la celda), un volumen de funcionamiento de 4.5 litros (2/4 de la celda) para la disposición de electrodos y zona de reacciones, 2.25 litros en la parte superior (1/4 de la celda) para la generación de espumas y 2.25 litros en la parte inferior (1/4 de la celda) para la sedimentación de lodos, con dimensiones de 30 cm de largo, 20 cm de ancho y 15 cm de altura, y se utilizó acrílico transparente para la fabricación de la celda. En la celda se acondicionó separadores para colocar y sostener los electrodos. Los electrodos que se utilizaron, fueron de material hierro y aluminio, siendo el aluminio el electrodo de sacrificio para el proceso de electrocoagulación; ambos electrodos tuvieron las mismas dimensiones, 10 cm x 12 cm y un espesor de 3 mm. El distanciamiento de las placas fue de 15 mm. Para la obtención de muestras se colocó una llave en la zona inferior de la celda (figura 13).

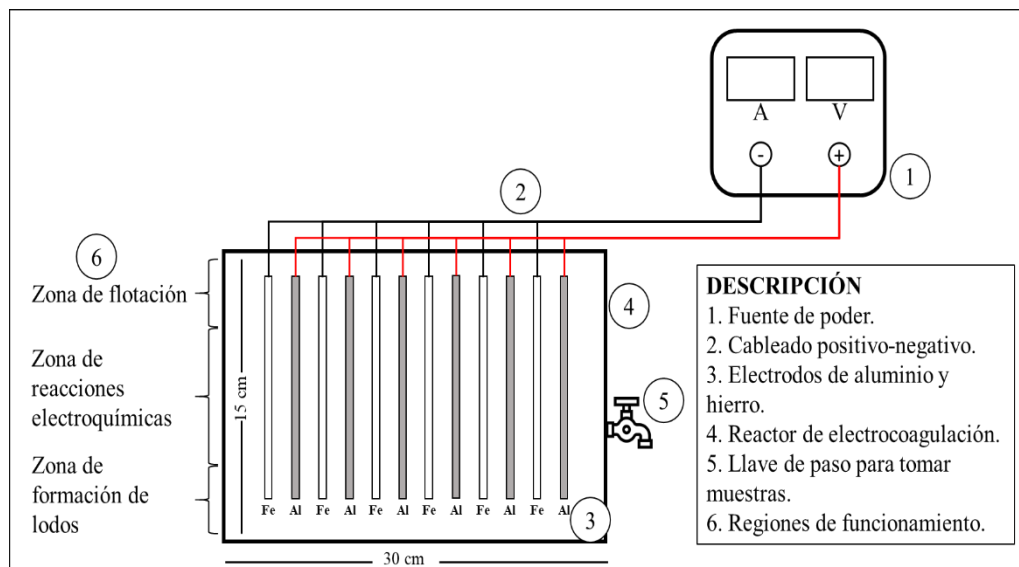


Figura 13. Ilustración de la celda de electrocoagulación

3.7.3. Evaluación de la eficiencia de la electrocoagulación en base a los parámetros de pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento

Se realizó experimentos de la electrocoagulación variando niveles de pH, densidad de corriente y el tiempo de tratamiento, se realizó en 27 experimentos de 9 litros de capacidad cada una, con 3 repeticiones por muestra, con un total de 81 experimentos.

a. pH

Los experimentos se realizaron a tres niveles de pH: 6, 7 y 8 unidades de pH; el pH se ajustó con H₂SO₄ (ácido sulfúrico) al 1N e NaOH (hidróxido de sodio) al 10%.

b. Densidad de corriente

La densidad de corriente se varió a tres distintos niveles: 20 A/m², 30 A/m² y 40 A/m².

c. Tiempo de tratamiento

Se trabajó a tres niveles de tiempos de tratamiento: 15 minutos, 25 minutos y 40 minutos.

3.7.4. Eficiencia de la electrocoagulación en el porcentaje de reducción de DBO₅

Para evaluar el sistema se determinó en función de la reducción de DBO₅, mediante la fórmula 1:

$$\text{Porcentaje de reducción de DBO}_5 = \frac{\text{DBO}_{5_i} - \text{DBO}_{5_f}}{\text{DBO}_{5_i}} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

DBO_{5_i} = Valor inicial de DBO₅.

DBO_{5_f} = Valor final de DBO₅.

3.7.5. Evaluación de los lodos generados como suplemento para fertilizar quinua (*Chenopodium quinoa*)

Después del proceso de electrocoagulación se analizó los lodos residuales generados del mejor tratamiento frente a un control, determinando la concentración de aluminio (Al) debido a que se utilizó como electrodo de sacrificio el aluminio. Se utilizó como suplemento para ver de qué manera

influyó en el crecimiento de la quinua (*Chenopodium quinoa*) teniendo como variables respuestas, el porcentaje de materia seca, la altura, estimación de concentración de clorofila y el número de hojas. El proceso se llevó a cabo en el invernadero de las instalaciones de la UNAJ, en un total de 60 días.

a. Porcentaje de materia seca

El porcentaje de materia seca de las plántulas de quinua se determinaron siguiendo la metodología de Calvache & Valle (2021); Méndez-Natera (2002) colocando las hojas, raíces y tallos en la estufa a una temperatura constante de 72 °C durante 72 horas, para posteriormente pesarlas.

b. Altura de la plántula

La altura de las plántulas se determinaron mediante el método descrito por Zitácuaro & Aparicio-Rentería (2004) midiendo desde el cuello de la raíz de la plántula hasta la yema principal de crecimiento.

c. Estimación de concentración de clorofila

La estimación de concentración de clorofila se determinó siguiendo el método descrito por Castañeda et al. (2018) con el equipo medidor portátil de concentración de clorofila, con 5 mediciones en distintas partes de la plántula para obtener un promedio y así evitar variaciones de los valores.

d. Número de hojas

Se hizo una cuenta total de la cantidad de hojas de la planta.

3.8. Análisis estadístico

En el presente trabajo se aplicó un diseño factorial 3A3B3C, con 3 niveles de pH, densidad de corriente y tiempo, en un diseño completo al azar. Para el análisis de datos se utilizó el software estadístico R para sistema operativo Windows.

Para modelar estadísticamente los datos, se aplicó las siguientes abreviaturas: para pH (factor A) y los niveles pH1 = 6 (a1), pH2 = 7 (a2) y pH3 = 8 (a3) respectivamente; densidad de corriente eléctrica (factor B) y los niveles j1 = 20 A/m² (b1), j2 = 30 A/m² (b2) y j3 = 40 A/m² (b3) y tiempo de tratamiento (factor C) y los niveles t1 = 15 min (c1), t2 = 25 min (c2) y t3 = 40 min (c3) respectivamente.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de las características físicoquímicas de las aguas del río Coata

A continuación, se presentan los valores de los resultados de los análisis de las aguas del río Coata para conocer su composición física y química (tabla 7), siguiendo las metodologías (APHA/AWWA/WEF- 23rd Edition, 2017), los cuales se analizaron en el laboratorio de la UNAJ y los parámetros de la DQO y DBO₅ fueron analizados en el laboratorio RHLAB S.A.C.

Tabla 7

Resultados del análisis de los parámetros físicoquímicos de las aguas del río Coata

Parámetro	Unidad	Valor	ECA (Categoría 1-A)
pH	Unidades de pH	7.47	5.5-9.0
Conductividad eléctrica	μS/cm	1322	1600
Temperatura	°C	13.1	Δ 3
Oxígeno disuelto	mg/L	5.6	≥ 5
DQO	mg/L	714.3	20
DBO ₅	mg/L	198.5	5
Turbidez	NTU	6	100
Sólidos totales	mg/L	21	--
Sólidos disueltos	mg/L	8.07	1000
Sólidos suspendidos totales	mg/L	12.93	--
Sólidos totales fijos	mg/L	12	--
Sólidos totales volátiles	mg/L	8	--
Sólidos sedimentables	mg/L	0.8	--

-- El parámetro no aplica para esta Subcategoría

En la tabla 7 se observa los valores de los parámetros evaluados en el punto de monitoreo Este 381308 y Norte 8289756 de la ciudad de Juliaca, los resultados como el pH con un valor de 7.47, la conductividad eléctrica con 1322 μS/cm, la DBO₅ en una concentración de 198.5 mg/L, la DQO con 714.3 mg/L, la conductividad eléctrica con 1322 μS/cm, una turbidez de 6, comparados con los estándares de calidad ambiental de la Categoría 1 establecidos por el MINAM, los parámetros que

sobrepasan los valores son la DQO que establece un valor de 20 mg/L y la DBO₅ con un valor de 5 mg/L, lo que nos indica que estas aguas del río Coata, tienen una alta concentración de carga orgánica contaminante, producto de la presencia de residuos sólidos y el vertimiento de aguas residuales domésticas.

Respecto al parámetro de la DBO₅ que se reportó con un valor de 198.5 mg/L, en contraste con estudios realizados por Callasaca-Pacheco et al. (2022), que reportó una concentración de DBO₅ de 185.47 mg/L, presenta una similitud en su caracterización que realizó en el río Coata. En cambio, Coila (2022) reportó valores de DBO₅ de 98 mg/L en las aguas del río Coata, valores diferentes, esta variación en los valores puede deberse a muchos factores, como el punto de muestreo, la fecha de muestreo y principalmente si se muestreó en época de sequía o avenida.

Como se aprecia, las aguas del río Coata presentan contaminación, y puede tener ciertas variaciones de acuerdo a la época de muestreo, esto debido a que el cuerpo de agua es receptor de distintos contaminantes, así como también de residuos sólidos tanto inorgánicos como orgánicos y el vertimiento de las aguas residuales domésticas de la población aledaña.

4.2. Celda de electrocoagulación

La celda de electrocoagulación se construyó en un régimen de tipo Batch de forma paralelepípedo de cara rectangular, ya que de acuerdo con Aguilar (2015) es más recomendable trabajar con este tipo de celda para el caso de laboratorios, puesto que se puede controlar de mejor manera los procesos que ocurren durante la electrocoagulación; además que de acuerdo al diseño, este tipo de celda tiene la característica de una simplicidad operativa y fiabilidad en el mantenimiento de acuerdo a los costos (Arias et al., 2011).

La celda se construyó a base de una forma rectangular y teniendo en cuenta el proceso de electrocoagulación, ya que durante el proceso existe cambios de temperatura facilitando el movimiento de iones, dicho factor y por el costo, se eligió el material de acrílico transparente (Arias et al., 2011); además de que se puede apreciar de mejor manera las reacciones que ocurren durante el proceso. Se consideró un volumen total de 9 litros de capacidad, teniendo en cuenta los siguientes cálculos a partir del volumen total:

- Para la zona de flotación (1/4 de la celda):
30 cm de largo x 20 cm de ancho x 3.75 cm de alto
2.25 litros
- Para la zona de reacciones y disposición de electrodos (2/4 de la celda):
30 cm de largo x 20 cm de ancho x 7.5 cm de alto
4.5 litros
- Para la zona de sedimentación de lodos (1/4 de la celda):
30 cm de largo x 20 cm de ancho x 3.75 cm de alto
2.25 litros

Con una longitud de 30 cm, altura de 15 cm y ancho de 20 cm, considerando que Perales (2019) indica que en la celda ocurren 3 procesos, la parte superior, donde se acumulan los lodos menos densos o la espuma que sería 1/4 del volumen (2.25 litros), la zona media donde se dan las reacciones y están dispuestas los electrodos 2/4 del volumen (4.5 litros) y la zona inferior donde se precipitan los lodos más densos, 1/4 del volumen (2.25 litros). El material de los electrodos es uno de los elementos más importantes durante el proceso de la electrocoagulación, ya que de estos depende las reacciones que se vayan a dar (Akkaya, 2022). En este trabajo de investigación se emplearon electrodos de material hierro y aluminio con medidas de 10 cm de alto, 12 cm de ancho y un espesor de 3 mm, siendo el electrodo de sacrificio o desgaste el aluminio (figura 14), ya que según Ebba et al. (2021) indica que dichos materiales son los más utilizados durante el proceso y tienen una alta eficacia, además que presentan la ventaja de que son más accesibles y presentan una alta resistencia a la corrosión. Se empleó una configuración monopolar en paralelo, ya que con esta configuración de electrodos se tiene mejores resultados de remoción del tipo de contaminante de carga orgánica (Rodríguez et al., 2021). El distanciamiento entre electrodos fue de 15 mm en base a los antecedentes, considerando además que Boinpally et al. (2023) mencionan que la eficacia de remoción de contaminantes disminuye cuando existe una separación mínima de electrodos, esto debido a que existe una atracción electrostática eliminando degradando los flóculos que se forman para eliminar el contaminante (Olmos & Moncaleano, 2021).

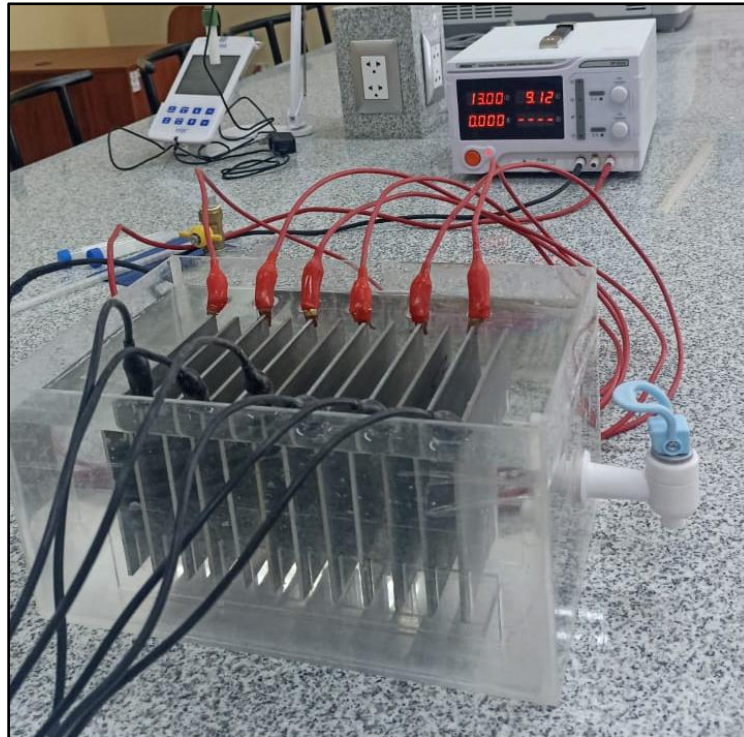


Figura 14. Celda de electrocoagulación en funcionamiento

4.3. Eficiencia de la electrocoagulación en el porcentaje de reducción de DBO₅

Una vez realizada todos los experimentos de electrocoagulación con un diseño factorial de 3 factores 3A3B3C (pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento), en la figura 15 se muestran los resultados finales de la remoción de la carga orgánica en el porcentaje de reducción de DBO₅ para las distintas combinaciones de tratamientos. Se puede apreciar que, en todos los experimentos a diferentes pH inicial, densidad de corriente y tiempo de tratamiento se tienen reducciones de DBO₅, a medida que se aumenta la densidad de corriente y el tiempo de tratamiento conjuntamente, el porcentaje de reducción de DBO₅ también aumenta.

Se obtiene como mejor resultado la configuración de pH 7, siendo un valor neutro, y según Arango (2012) indica que se obtienen mejores reducciones de contaminantes con valores de pH cercanos a la neutralidad, y en su investigación para tratar aguas residuales lácteas trabajando a valores de pH de 5, 7 y 8, con densidades de corriente de 32.43 A/m² y 43.23 A/m² y tiempos de tratamiento de 5, 10 y 15 minutos, encontró que hay una alta reducción de DQO al mayor tiempo, aclarando que los pH más adecuados para trabajar son 5 y 7; así también lo demostró Dubey et al. (2024) que en su investigación tuvieron mejores resultados en la eliminación de contaminantes de carga orgánica cuando trabajaron a un pH neutro de 7 y un tiempo de tratamiento

de 48 minutos, eliminando hasta un 93% de DQO y un 88% de color en aguas residuales de destilería.

Se trabajó con densidad de corriente eléctrica 40 A/m^2 , valor similar con el que trabajó Apaza (2018) el cual utilizando densidades de corriente de 22.19 A/m^2 , 33.28 A/m^2 , y 44.39 A/m^2 , en el proceso de electrocoagulación para la remoción de contaminantes de carga orgánica, obtuvo mejores resultados trabajando a 44.39 A/m^2 de densidad de corriente; y 45 min de tiempo de tratamiento en la eliminación específicamente de la DQO de aguas residuales lácteas, y según Zafar et al. (2024) indican que al haber un mayor tiempo de electrólisis en la electrocoagulación se produce una mayor liberación de iones para que remuevan los contaminantes presentes en la solución, ya que en su investigación de tratamiento de aguas industriales textiles mediante la electrocoagulación, encontró que se obtienen mejores eficiencias de eliminación de SDT, SST, DQO y color, hasta valores de 91%, 75%, 79% y 86% respectivamente, trabajando a un tiempo de 60 minutos, trabajando a un pH inicial de 7-8; en el presente trabajo de investigación se llegó a obtener un porcentaje máximo de reducción de 89.32%.

La combinación de los factores que determinan la eficiencia de la electrocoagulación es indispensable, así lo demostraron Bote (2021), Lessoued et al. (2021), Aguilar-Ascón et al. (2020), López & Harnisth (2016), Huaman & Muñoz (2019), Apaza (2018) en sus investigaciones removiendo contaminantes de carga orgánica en aguas mediante la electrocoagulación.

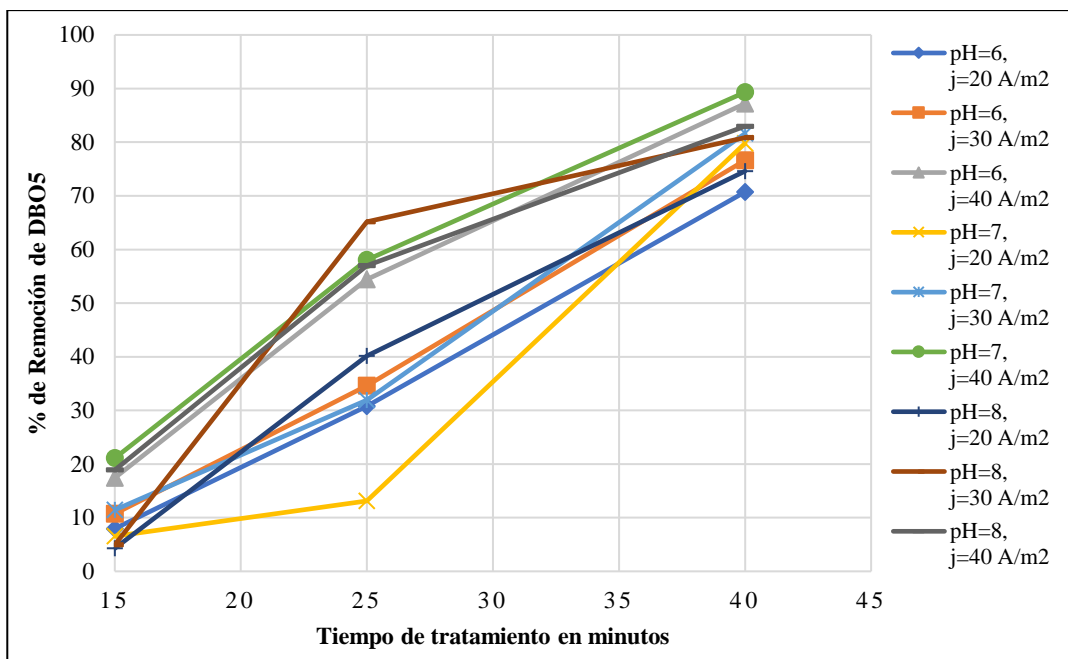


Figura 15. Resultados del porcentaje de reducción de DBO₅ en las distintas configuraciones de tratamiento de los factores tiempo, densidad de corriente y pH

Tras realizar el análisis estadístico, primero debemos validar los datos para encontrar el coeficiente de variabilidad, y el resultado fue de 1.17, valor que está debajo de 25, límite para la variabilidad, lo cual indica que los datos son completamente válidos (Apaza, 2018).

En relación a la tabla 13, en el análisis estadístico de la combinación de los 3 factores (pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento), se obtuvo un valor de 2e-16, que significa que tiene una alta significancia, y se deduce que hay relación entre los 3 factores, por lo que se realizó un análisis estadístico de los efectos simples de los factores, aplicando el test de Tukey con alfa de 0.05.

4.3.1. Análisis estadístico

a. Evaluación de efectos simples

Para el caso del análisis estadístico del efecto simple del factor pH con los niveles de la densidad de corriente, según el anexo 10 (tablas 14-16), el resumen indica que el factor pH posee diferencias estadísticamente significativas cuando dicho factor se trabaja con los tres niveles de densidad de corriente. Obteniéndose como la mejor configuración en cuanto al % de reducción de DBO₅, a los niveles pH2j3 (pH 7 y densidad de corriente de 40 A/m²).

El análisis estadístico del efecto simple del factor pH, en combinación con los niveles del tiempo de tratamiento, de acuerdo con el anexo 10 (tablas 17-19), resultaron que el factor pH posee diferencias estadísticamente significativas, cuando este se trabaja con los tres niveles de tiempo de tratamiento. Quedando como mejor configuración los niveles pH2t3 (pH 7 y tiempo de tratamiento de 40 minutos).

En cuanto al análisis estadístico del efecto simple del factor DC, en combinación con los niveles de pH, según el anexo 10 (tablas 20-22), indicaron que el factor DC tiene diferencias estadísticamente significativas cuando se trabaja con los tres niveles del factor pH. Obteniendo la mejor configuración J3pH2 (densidad de corriente de 40 A/m² y pH 7).

Para el caso del análisis estadístico del factor DC, en combinación con los niveles del factor tiempo, anexo 10 (tablas 23-25), los resultados indican que el factor DC posee diferencias estadísticamente significativas cuando se trabaja con los tres niveles del tiempo. Quedando como mejor configuración los niveles j3t3 (densidad de corriente de 40 A/m² y tiempo de tratamiento de 40 minutos).

El resumen estadístico del efecto simple del factor tiempo, cuando se trabaja con los niveles del factor pH, anexo 10 (tablas 26-28), resultan que el factor tiempo tiene diferencias estadísticamente significativas cuando este se trabaja con los tres niveles de pH. Obteniéndose como mejor configuración los niveles t3pH2 (tiempo de tratamiento de 40 minutos y pH 7).

Finalmente, el análisis estadístico del efecto simple del factor tiempo, en combinación con los niveles del factor DC, según el anexo 10 (tablas 29-31), resultaron el tiempo como factor posee diferencias estadísticamente significativas cuando dicho factor se trabaja con los tres niveles de DC. Obteniéndose como la mejor configuración t3j3 (tiempo de tratamiento de 40 minutos y densidad de corriente de 40 A/m²).

De acuerdo al análisis estadístico en la evaluación de los efectos simples de los tres factores (tiempo de tratamiento, densidad de corriente y pH) todos estos poseen un efecto significativo en cuanto al % de reducción de DBO₅.

b. Evaluación de los efectos principales

Respecto al análisis estadístico de los efectos principales de los factores tiempo de tratamiento, densidad de corriente y pH, según el anexo 10 (tablas 32-38), de acuerdo al análisis Tukey con un $\alpha = 0.05$, los resultados indican que los factores pH: DC, DC: tiempo y pH: tiempo y también la interacción entre los 3 factores combinados pH: DC: tiempo, los efectos son significativos.

Para el caso del factor pH, según la tabla 32, se evidencia estadísticamente que dos niveles son diferentes a un nivel del 5% de significancia, obteniéndose que el nivel pH3, tiene superiores resultados.

En cuanto al factor DC, en relación al análisis estadístico, en la tabla 33, se evidencia que los tres niveles del factor son diferentes evaluados con una significancia estadística del 5%, y obteniendo j3 tiene superiores resultados.

El análisis estadístico para el factor tiempo, de acuerdo a la tabla 34, resultó que los tres niveles de dicho factor son diferentes de cada uno, cuando se evaluó a una significancia estadística del 5%, indicando que el nivel t3 posee superiores resultados.

De acuerdo a la evaluación estadística para la combinación de los factores pH y densidad de corriente, según la tabla 35, presentan diferencias significativas a un nivel del 5% de significancia, resultando como mejor combinación los niveles pH2j3 (pH 7 y densidad de corriente de 40 A/m²).

En el caso del análisis estadístico para la combinación de factores DC y tiempo, en la tabla 36, se presentan los resultados, concluyendo que los niveles de ambos factores poseen diferencias significativas, con un nivel de significancia del 5%, quedando como mejor combinación los niveles j3t3 (40 A/m² y tiempo de tratamiento de 40 minutos).

Para el caso del análisis estadístico de los factores pH y tiempo, según la tabla 37, se evidencia que los niveles de la interacción de los factores pH y tiempo poseen significativas diferencias evaluadas al 5% de significancia, resultando la mejor combinación de niveles a pH2t3 (pH 7 y tiempo de tratamiento de 40 minutos).

Finalmente, la evaluación estadística de los factores, pH, DC y tiempo, de acuerdo a la tabla 38, se puede decir que, existe diferencia significativa en los niveles de los tres factores evaluados con un nivel de significancia del 5%, y obteniéndose como mejor resultado a la interacción de factores pH2j3t3 (pH 7, densidad de corriente de 40 A/m² y tiempo de tratamiento de 40 minutos).

Seguidamente, se presentan las distintas figuras de las combinaciones de la interacción resultante de los factores tiempo, DC y pH.

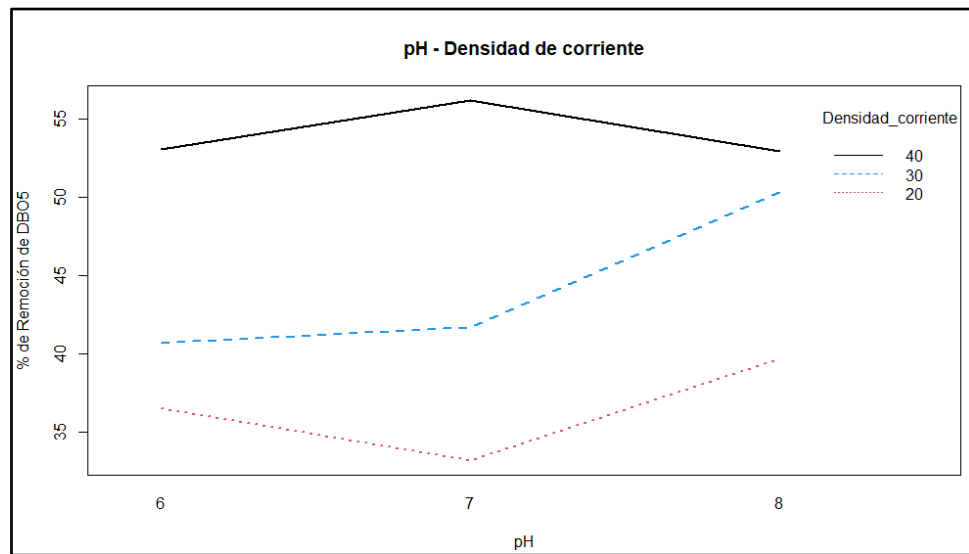


Figura 16. Relación de los factores pH - Densidad de corriente en cuanto al porcentaje de reducción de DBO₅

De acuerdo a la figura 16, se representa la evaluación del factor pH en los tres niveles que tiene el factor de DC que se evaluaron (20, 30 y 40 A/m²), como se visualiza en la figura, el efecto simple del factor pH es dependiente del nivel del factor de DC, concluyendo que el mejor porcentaje de reducción de DBO₅ se da cuando se combinan los niveles pH2j3, es decir un pH 7 con una DC de 40 A/m².

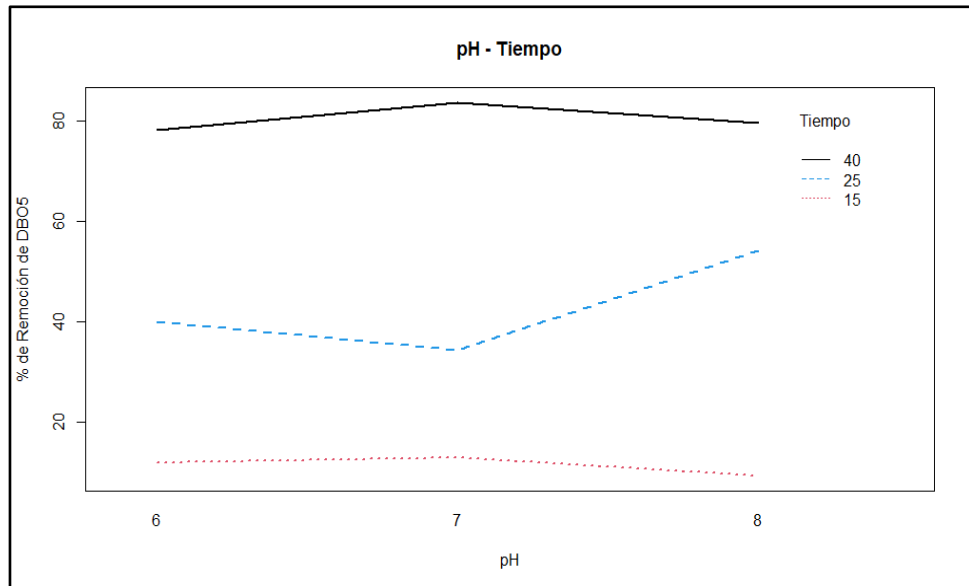


Figura 17. Relación de los factores pH - Tiempo en cuanto al porcentaje de reducción de DBO₅

Según la figura 17, se muestran la evaluación del factor pH en los tres niveles que posee el factor tiempo (15, 25 y 40 min), deduciendo que existe interacción del efecto simple del factor pH dependiendo del nivel del factor tiempo, concluyendo que el mejor resultado del porcentaje de reducción de DBO₅ se da al combinar los niveles pH2t3, un valor de pH 7 con 40 minutos de tiempo.

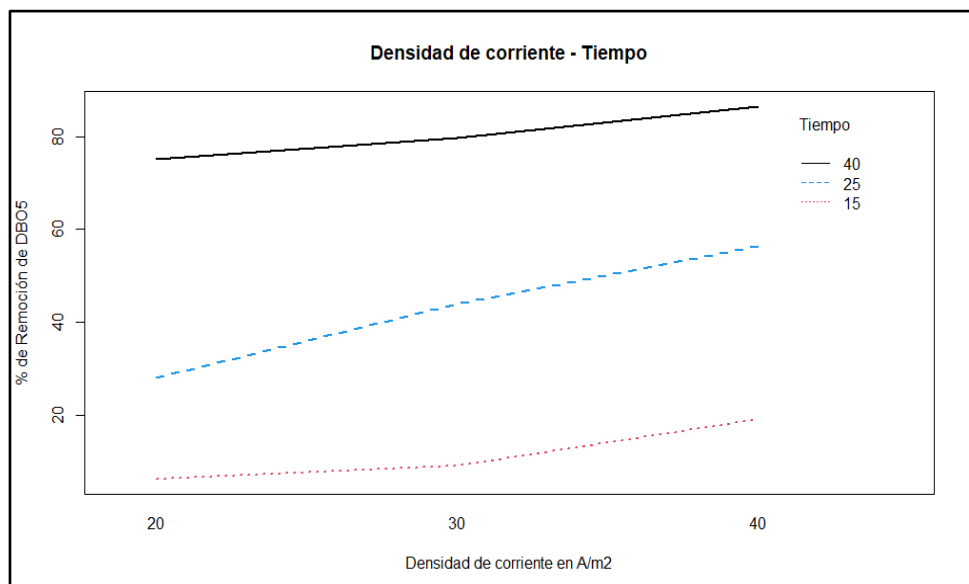


Figura 18. Relación de los factores DC - Tiempo en cuanto al porcentaje de reducción de DBO₅

En la figura 18, representa el efecto del factor DC, evaluado en los tres niveles del factor tiempo (15, 25 y 40 min), de la gráfica se resume que el mejor

resultado para la reducción de DBO₅ se obtiene cuando interactúan los niveles j3t3, siendo los valores, DC de 40 A/m² con 40 minutos de tiempo.

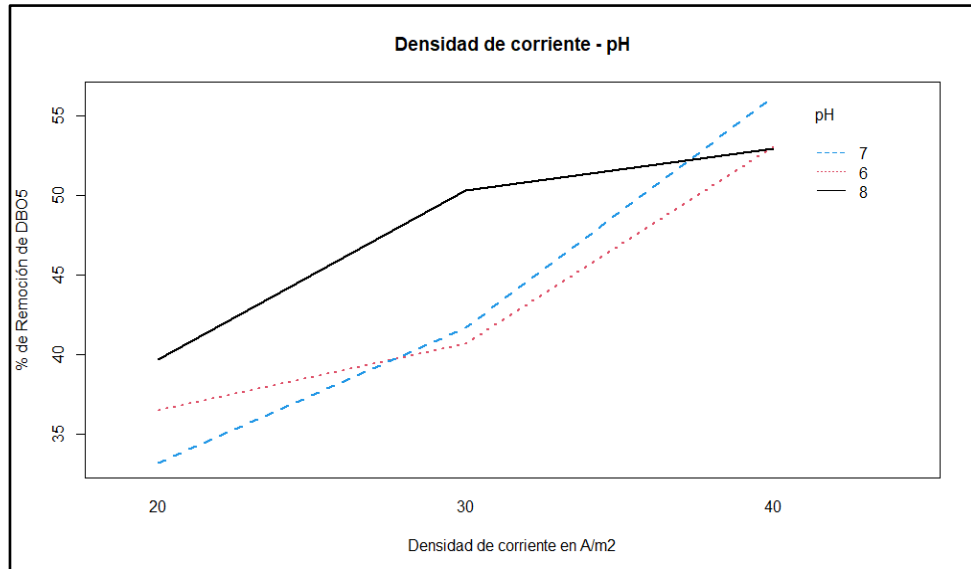


Figura 19. Relación de los factores DC - pH en cuanto al porcentaje de reducción de DBO₅

Según la figura 19, representa los efectos factor DC en los tres niveles del factor pH, evidenciando que el efecto del factor DC depende de los niveles del factor pH, esto conforme a la interacción que presentan, obteniéndose que el mejor porcentaje de reducción de DBO₅ se da al combinar los niveles j3pH2, siendo los valores de pH 7 con una DC de 40 A/m².

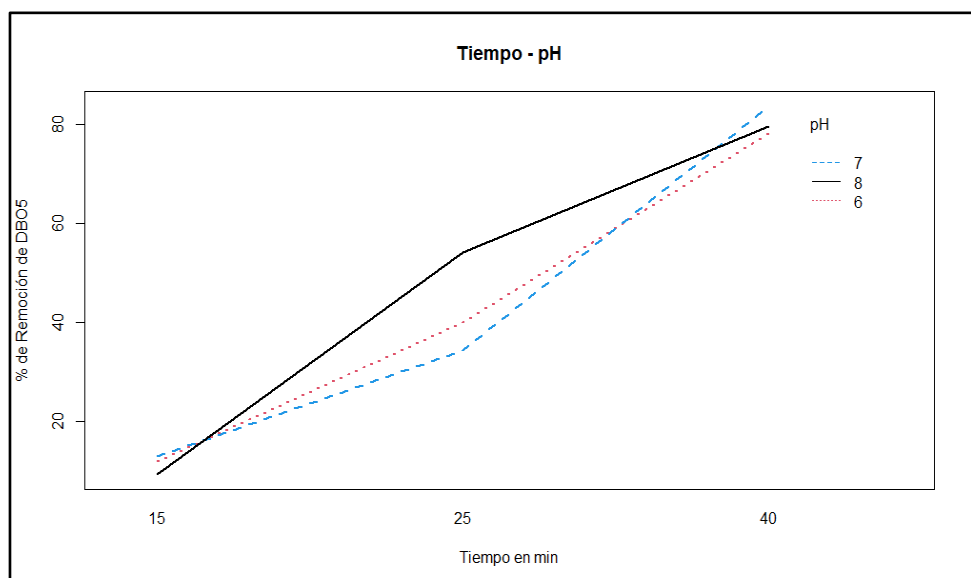


Figura 20. Relación de los factores Tiempo - pH en cuanto al porcentaje de reducción de DBO₅

De acuerdo a la figura 20, se muestran gráficamente los efectos del factor tiempo en los tres niveles del factor pH, concluyendo que existe interacción entre ambos factores, y la mejor combinación de niveles para el mayor porcentaje de reducción de DBO₅ es de los niveles t3pH2, siendo los valores de tiempo de tratamiento de 40 min interactuando con un valor de pH de 7.

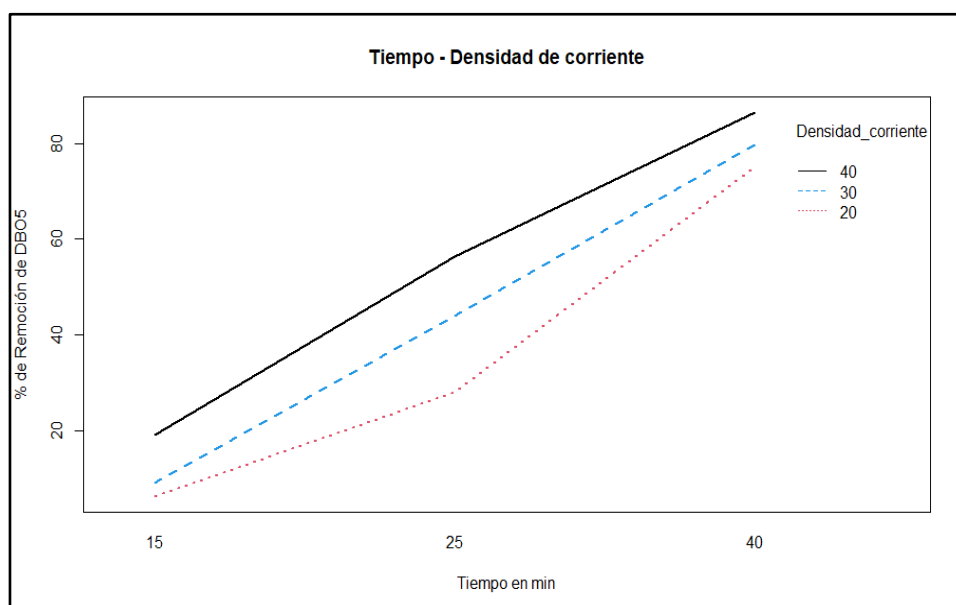


Figura 21. Relación de los factores Tiempo - DC en cuanto al porcentaje de reducción de DBO₅

Por último, la figura 21, representa los efectos simples del tiempo como factor en los tres valores de los niveles del factor densidad de corriente (20, 30 y 40 A/m²), apreciándose que el efecto del factor tiempo depende del factor DC, concluyéndose que el mejor porcentaje de reducción de DBO₅ se da cuando se combinan los niveles t3j3, siendo los valores de tiempo de tratamiento de 40 min interactuando con el tercer nivel de densidad de corriente que fue de 40 A/m².

El pH es uno de los factores más relevantes durante el proceso de electrocoagulación, se ha demostrado que existen mayores eficiencias de remoción de contaminantes cuando el pH inicial tiende al neutro, en el estudio de Dubey et al. (2024) durante el proceso de electrocoagulación con electrodos de hierro tuvieron mejores resultados de remoción de contaminantes orgánicos, de esta manera reduciendo la concentración de DQO en un 93% respectivamente, trabajando a un pH inicial de 7 y tiempo de 48 minutos. Así también Syaichurrozi et al. (2020) estudió el proceso de electrocoagulación con

pH iniciales de 4.35, 5 y 6, teniendo como mejores resultados óptimos, el tratamiento con un pH 6, que está más cercano al neutro, ya que logró una mayor remoción de concentración orgánica reduciendo la DQO de aguas residuales provenientes de la vinaza, frente a los otros experimentos trabajando a los demás valores de pH. De igual forma, Patel et al. (2022) en su investigación de tratamiento de aguas grises mediante la electrocoagulación, trabajó con pH inicial que van de un rango de 3 a 11, y tuvo resultados de la remoción de contaminantes orgánicos, de esta manera reduciendo las concentraciones de DBO₅ y DQO, en un 70% y un 82.7% respectivamente, trabajando con un pH 7 y un tiempo de tratamiento de 60 minutos. En el presente trabajo de investigación se trabajó a pH inicial de valores 6, 7 y 8, y se obtuvo mejores eficiencias de remoción de la carga orgánica reduciendo la concentración de DBO₅ trabajando a un pH inicial de 7, llegando hasta un 89.32% de reducción de DBO₅, llegándose a demostrar en relación a los otros estudios, que si existe una mayor eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos cuando se trabaja a un pH cercano a la neutralidad.

Otro de los factores más relevantes durante el proceso de la electrocoagulación es la densidad de corriente, parámetro que además de determinar la tasa de dosificación del coagulante desde el ánodo, también determina el tamaño y la tasa de formación de burbujas durante el proceso (Chen et al., 2021). Por otro lado, Asaithambi et al. (2023) en su investigación de tratamiento de aguas residuales provenientes de una destilería mediante la electrocoagulación, en la remoción de carga orgánica de DQO, trabajó con distintos valores de corriente, un rango que va de 0.1125 Amp a 0.65 Amp, evaluó el impacto de la corriente eléctrica en función de la eficacia de reducción de DQO, concluyendo que a medida que aumenta la corriente, la reducción de DQO también aumenta, ya que existe una mayor formación de hidróxidos durante el proceso. En la investigación realizada por Prihartini et al. (2022) realizando un tratamiento de aguas contaminadas de un río mediante el proceso de electrocoagulación, trabajando con densidades de corriente de 37 A/m² y 74 A/m², obtuvo mejores resultados en la remoción de carga orgánica, reduciendo la concentración de contaminantes de DBO₅ y DQO del 94.35% y un 81.55%, con la densidad de corriente de 74 A/m², ya que indica que a medida que se va aumentando la

densidad de corriente aplicada, mejora la eficiencia de eliminación de contaminantes. Así también Apaza (2018) el cual utilizando densidades de corriente de 22.19 A/m², 33.28 A/m², y 44.39 A/m², en el proceso de electrocoagulación para la remoción de contaminantes orgánicos de efluentes lácteos, obtuvo mejores resultados trabajando a 44.39 A/m²; y 45 minutos en la reducción de DQO de aguas residuales lácteas. En el presente trabajo de investigación se trabajó a densidades de corriente de valores 20 A/m², 30 A/m² y 40 A/m², y tras realizar todos los experimentos, se demostró que existen mejores resultados cuando hay una elevación de la densidad de corriente aplicada al proceso, obteniéndose mejores eficiencias de reducción de DBO₅ llegando hasta un 89.32%.

Otro de los parámetros que tiene directa influencia en el proceso de la electrocoagulación es el tiempo de tratamiento, Dubey et al. (2024) señalan que depende del tiempo de electrólisis la eficacia de la electrocoagulación permitiendo que exista mayor producción de iones metálicos, hasta que exceda el límite, lo cual invierte la eficiencia del proceso; de igual forma Zafar et al. (2024) indican que cuando en el proceso se alcanza tiempo adecuado de electrólisis, la eficiencia de eliminación de contaminantes puede mantenerse constante, no habiendo una mejora, ya que en su investigación de tratamiento de aguas industriales textiles mediante la electrocoagulación, encontró que se obtienen mejores eficiencias de eliminación de SDT, SST, DQO y color, hasta valores de 91%, 75%, 79% y 86% respectivamente trabajando a un tiempo de 60 minutos, variando desde 20 a 60 minutos, con variaciones de 10 minutos. Asimismo, Chen et al. (2021) afirman que el tiempo de reacción durante el proceso de electrocoagulación afecta directamente a la cantidad de iones liberados por el ánodo y consecuentemente en la eliminación de contaminantes orgánicos presentes en el agua, ya que en su investigación de tratamiento de aguas residuales porcinas de una granja de cerdos mediante la electrocoagulación, trabajando a un tiempo de 35 minutos, variando desde 10 a 45 minutos; como se puede observar, en esta investigación los mejores resultados no se obtuvo cuando se trabajó al mayor tiempo, ya que Chen et al. (2021) en sus experimentos utilizó el material del ánodo de hierro, la distancia de electrodos de 20 mm, la densidad de corriente aplicada de 30 mA/cm² y un

pH inicial de 6.3. En el presente trabajo de investigación se trabajó a tiempos de tratamiento de valores 15 minutos, 25 minutos y 40 minutos, y tras realizar todos los experimentos, se encontró que existen mejores resultados cuando hay un aumento del tiempo de tratamiento en el proceso de electrocoagulación, obteniéndose mejores eficiencias de reducción de DBO₅ llegando hasta un 89.32% cuando se trabajó a un tiempo de 40 minutos.

Pantoja y Sanchez (2021), en su investigación en cuanto a la remoción de la carga orgánica reduciendo la DBO₅, obtuvieron los mejores resultados en cuanto a la remoción del contaminante en un 70.78%, trabajando con las condiciones de densidad de corriente y tiempo de tratamiento de 45 A/m² y 21 minutos respectivamente.

En este trabajo de investigación resultaron como mejores condiciones óptimas para tratar aguas provenientes del río Coata, en función de la remoción de DBO₅, un pH 7, 40 A/m² de densidad de corriente y 40 minutos de tiempo de tratamiento, los cuales al trabajar conjuntamente se logró remover la carga orgánica, de esta manera reduciendo el porcentaje de la concentración de DBO₅ hasta en un máximo de un 89.32%, presentando un valor final de 21.2 mg/L. Por otro lado, Bote (2021) en su investigación de remoción de carga contaminante orgánica (Demanda química de oxígeno), utilizando una configuración de Al-Fe (Ánodo-Cátodo) con un pH 6, 20 A/m² de densidad de corriente y 60 min de tiempo, logró reducir el contaminante hasta en un 83.33%.

En contraste con otros trabajos de investigación, siempre se debe de tener en cuenta otros factores que determinan la electrocoagulación, tales como las condiciones de la muestra a tratar al inicio del tratamiento, los electrodos utilizados y su calidad y la configuración que aplica el autor que lo realiza (Apaza, 2018).

4.3.2. Variación de pH, Conductividad y temperatura

a. Variación de pH

En la presente investigación se trabajó con pH iniciales de 6, 7 y 8, y conforme se incrementa la densidad de corriente con el tiempo de tratamiento, el pH va incrementándose, a diferencia de las pruebas con un pH de 8 a 20 A/m², que,

en los primeros tiempos de tratamiento, el pH sufrió una disminución hasta llegar a 7.1, para posteriormente sufrir un aumento hasta llegar a 8.15 nuevamente.

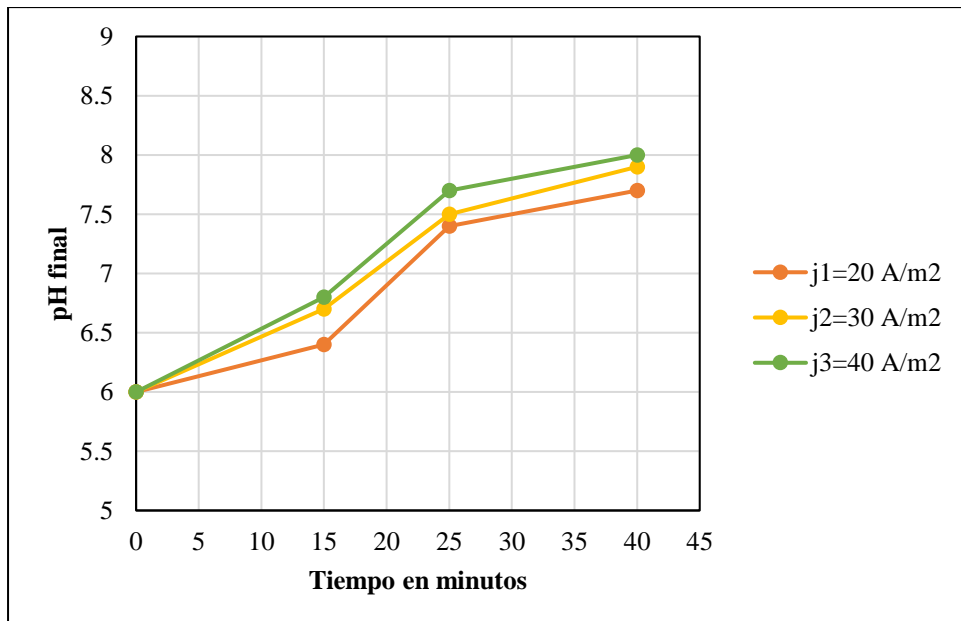


Figura 22. Variación del pH final cuando se trabaja con un pH 6

De acuerdo a la figura 22, se representa el comportamiento del pH, cuando se trabajó a un pH 6, con una DC de 40 A/m² y 40 minutos, el pH va incrementándose, pasando de un valor de 6, hasta llegar al pico de 8.

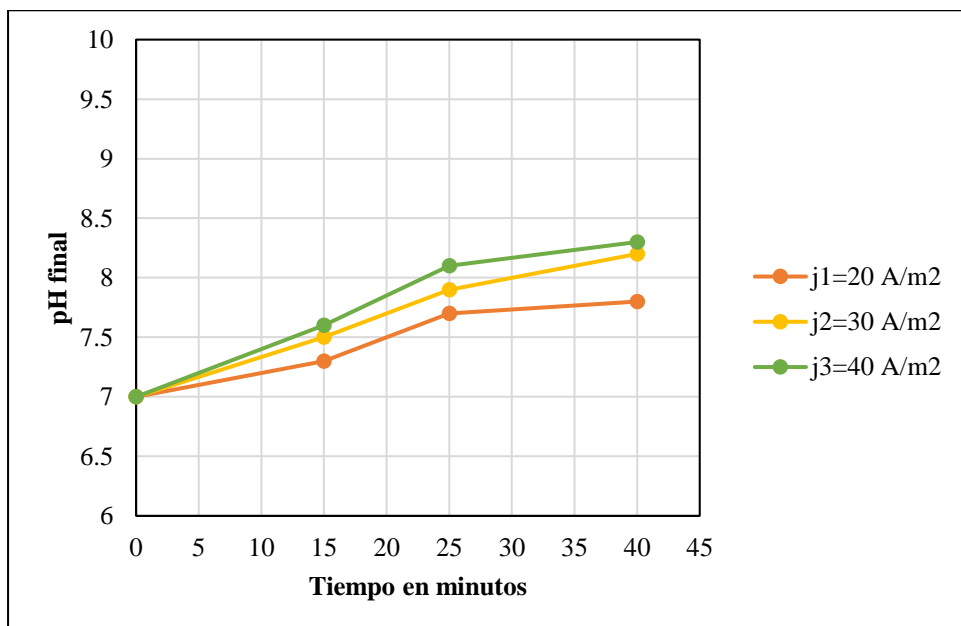


Figura 23. Variación del pH final cuando se trabaja con un pH 7

Como se ve en la figura 23, se visualiza el comportamiento del pH, cuando se trabajó a un pH inicial neutro de 7, con una DC de 40 A/m² y 40 minutos, el pH va incrementándose, pasando de un valor de 7, hasta llegar al pico de 8.3 unidades.

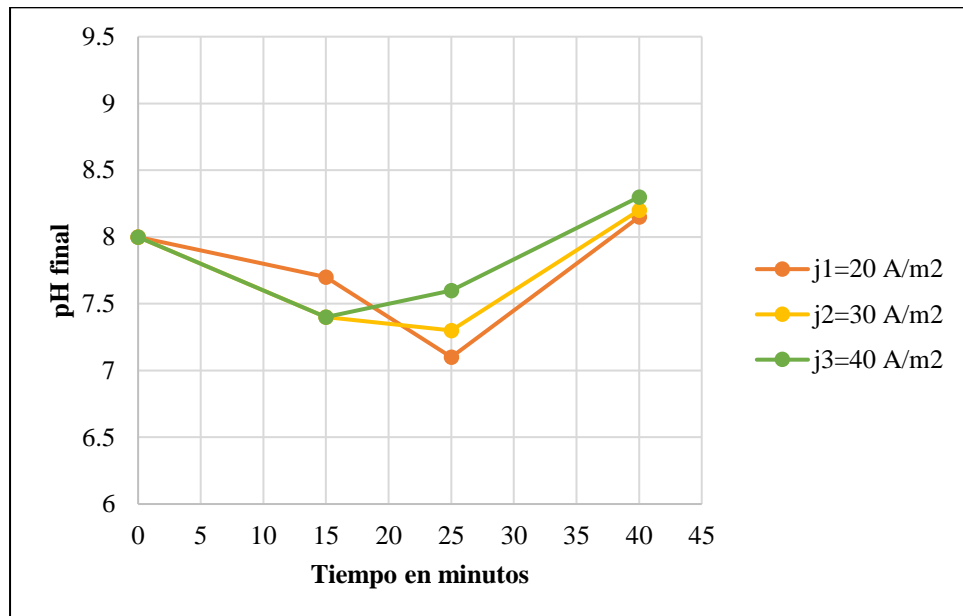


Figura 24. Variación del pH final cuando se trabaja con un pH 8

En relación a la figura 24, se representa el comportamiento del pH, cuando se trabajó a un pH inicial de 8, con una DC de 40 A/m² y 40 minutos, el pH inicialmente decrece hasta un mínimo de 7.4, para posteriormente aumentar pasando de un valor de 7.4, hasta llegar al pico de 8.3 unidades.

Como se pudo apreciar en las figuras 22, 23 y 24, el pH sufre variaciones, según Arango (2012) indica que durante la electrocoagulación se presenta una incremento y descenso del pH, aumenta de entre 1.5 a 2 unidades, esto puede ser provocado por la formación de hidróxidos, en consecuencia de las reacciones que suceden asociadas al electrodo de sacrificio, Prieto-García et al. (2014) indican que en medios ácidos y neutros los iones OH⁻ del cátodo no están presentes en su totalidad para formar especies hidróxido de aluminio neutras, por lo que aumentan el pH del medio; por otro lado en condiciones alcalinas debido al consumo de OH⁻ para formar Al(OH)₄⁻ y Al(OH)₅²⁻ y otros hidróxidos de aluminio, el pH tiende a disminuir. A su vez, un pH alcalino puede tener tendencias a bajar, debido a la naturaleza ácida de los coagulantes

in situ, y a medida que va bajando, este puede ir incrementándose (Ojeda & Hing, 2009).

b. Variación de la conductividad eléctrica

En el presente estudio, se observó una disminución de la conductividad eléctrica para todos los tratamientos en estudio, hubo una mayor disminución de la conductividad en los tratamientos cuando se trabajó a un pH inicial de 7, combinando 40 A/m^2 de densidad de corriente y 40 min, llegando hasta una conductividad mínima de $955 \mu\text{S/cm}$.

A continuación, se presentan los gráficos del comportamiento de la conductividad eléctrica trabajados a diferentes pH, densidades de corriente y tiempos.

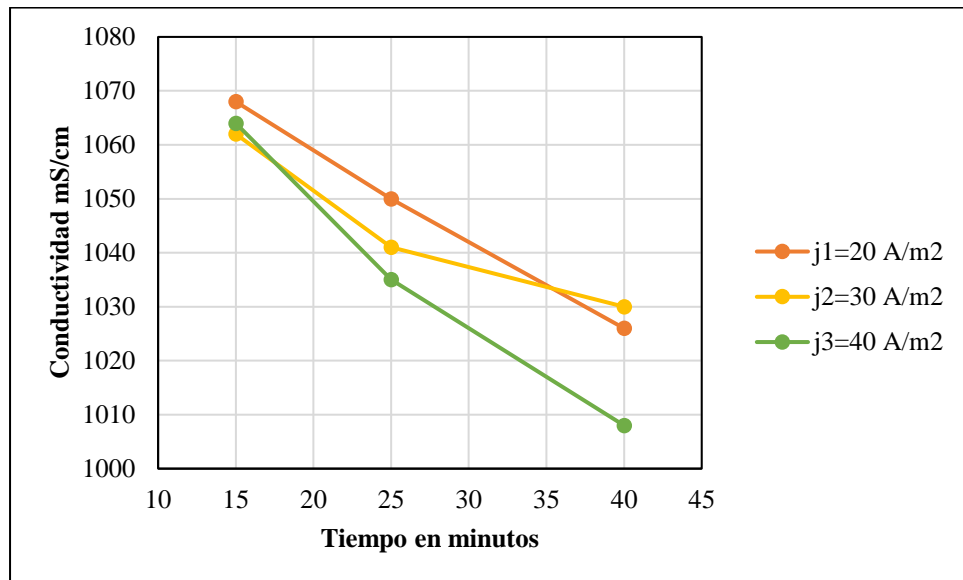


Figura 25. Variación de la conductividad final interactuando con un pH 6

De acuerdo a la figura 25, se puede observar el comportamiento de la conductividad eléctrica cuando se trabajó a un pH inicial de 6, en los distintos tiempos de tratamiento a distintas densidades de corriente, siendo la mayor disminución cuando se trabajó con una DC de 40 A/m^2 a 40 minutos respectivamente, llegando hasta una conductividad final de $1008 \mu\text{S/cm}$.

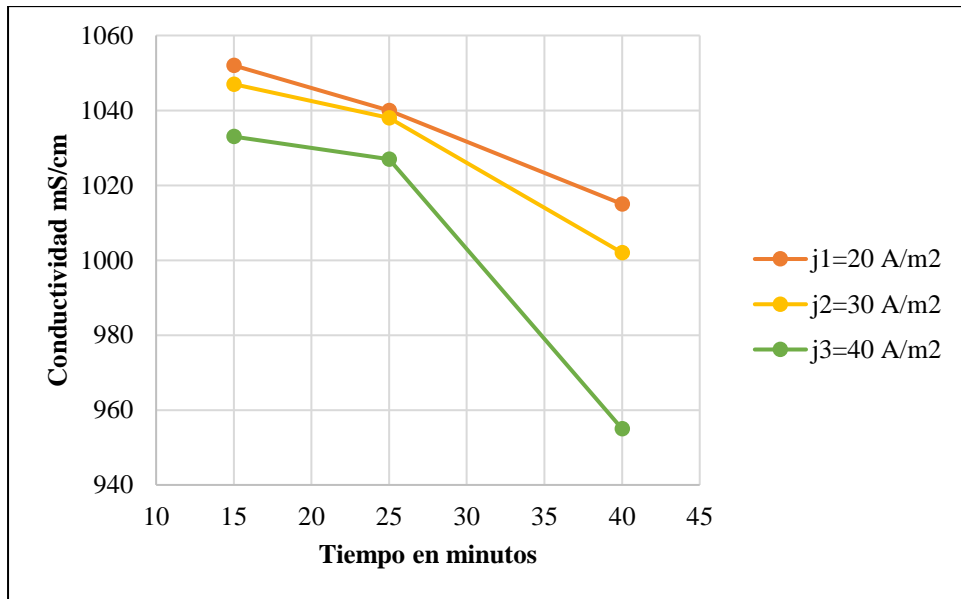


Figura 26. Variación de la conductividad final interactuando con un pH 7

En la figura 26, se aprecia la variación que sufre la conductividad eléctrica cuando los tratamientos se trabajaron a un pH 7, a los diferentes niveles de DC, así como también a los distintos niveles de tiempo de tratamiento. Según la gráfica, en todos los tratamientos se observa la disminución de la conductividad eléctrica, siendo la que más variación sufrió, el tratamiento cuando se trabajó a una DC de 40 A/m² y 40 min, llegando hasta una conductividad final de 955 μ S/cm.

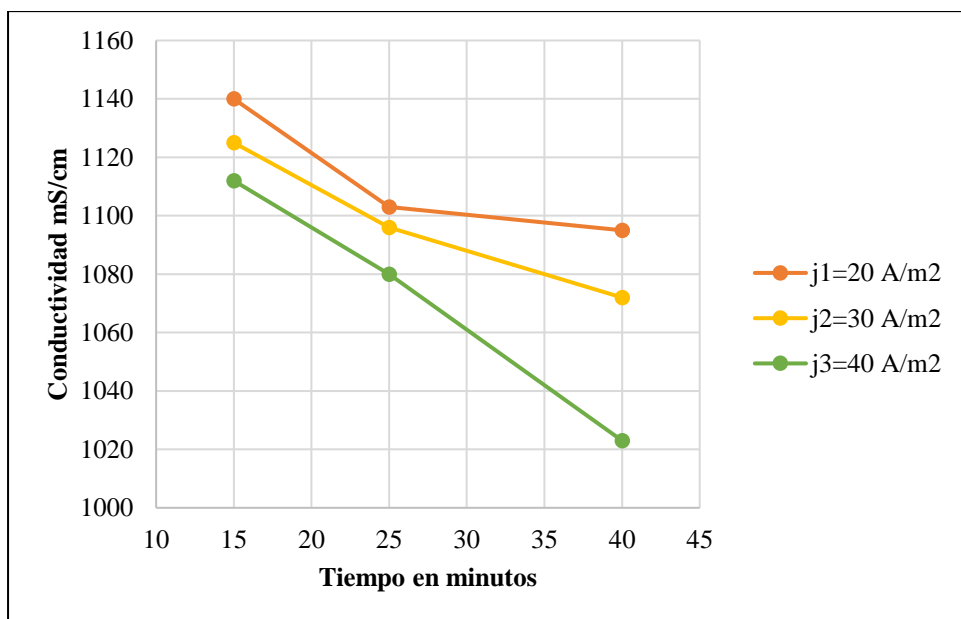


Figura 27. Variación de la conductividad final interactuando con un pH 8

En relación a la figura 27, se puede observar el comportamiento de la conductividad eléctrica cuando se trabajó a un pH alcalino 8, en los distintos tiempos de tratamiento a distintas densidades de corriente, siendo la mayor disminución cuando se trabajó con una DC de 40 A/m² a 40 minutos respectivamente, llegando hasta una conductividad final de 1023 μS/cm.

De acuerdo a las figuras 25, 26 y 27, la conductividad eléctrica sufre variaciones. Según Vrsalović et al. (2023) que en su estudio de remoción de contaminantes por electrocoagulación, indican que esta disminución de la conductividad se produce debido a la eliminación de los contaminantes en la capa de flóculos, además que la formación de óxido en el electrodo de sacrificio provoca su pasivación, lo que implica un incremento en el uso de la energía. Según Arango (2012) en sus experimentos de electrocoagulación trabajó a 32.43 A/m² y 43.23 A/m² de densidad de corriente y para los dos procesos a pH de valor 5, la conductividad sufre una disminución de hasta un 7% en los 15 minutos del proceso.

c. Variación de la temperatura

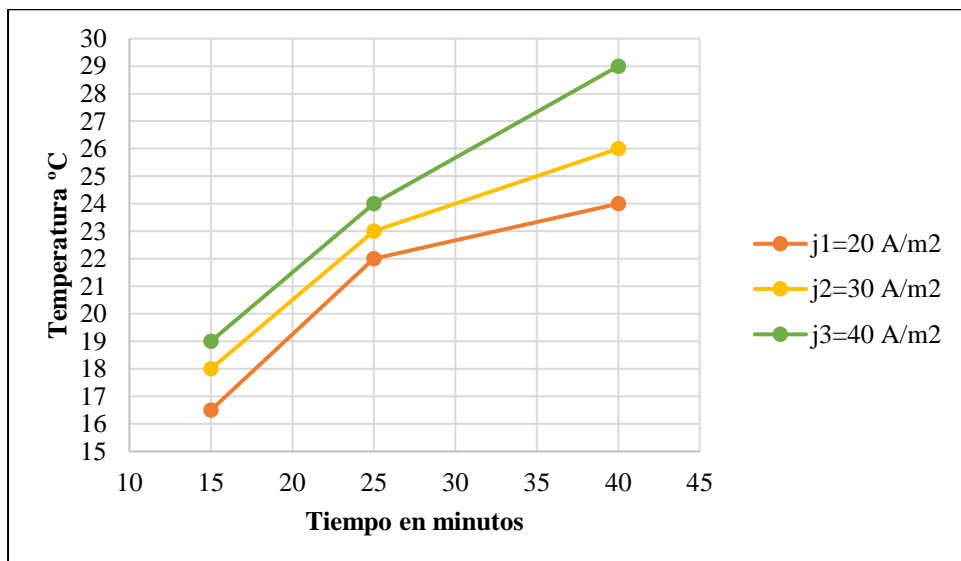


Figura 28. Variación de la temperatura final interactuando con un pH inicial de 6

En la figura 28, se aprecia el comportamiento de la temperatura cuando trabaja a un pH 6, con diferentes niveles de DC y tiempos de tratamiento, siendo la mayor elevación de temperatura, a la DC de 40 A/m² a un tiempo de 40 minutos, llegando hasta un final de 30 °C.

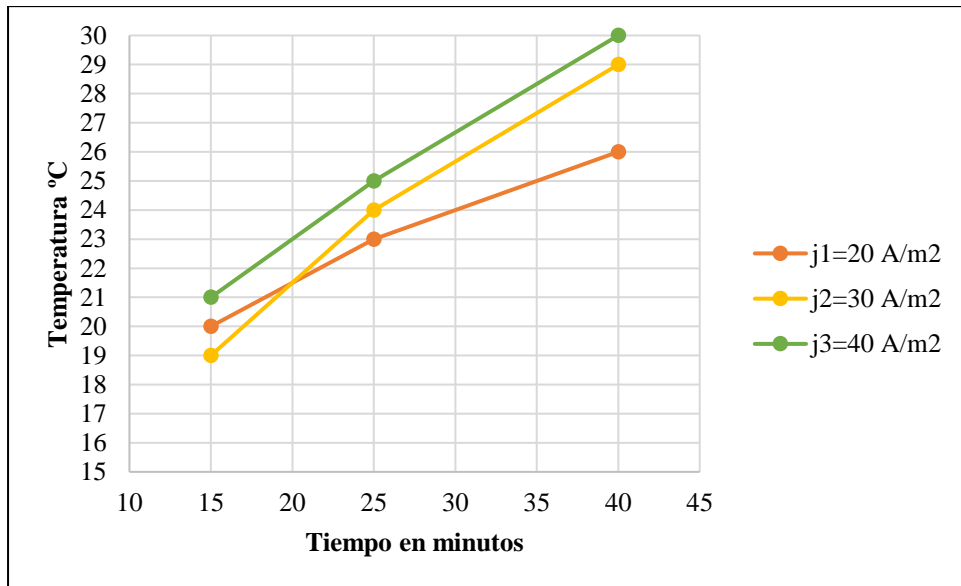


Figura 29. Variación de la temperatura final interactuando con un pH inicial de 7

Respecto a la figura 29, se observa la variación de la temperatura cuando trabaja a un pH neutro de 7, a diferentes densidades de corriente en tiempos de tratamiento distintos, siendo la mayor elevación de temperatura del tratamiento que se trabajó a una DC de 40 A/m² a un tiempo final de 40 minutos, llegando hasta los 28 °C; una temperatura inferior respecto al tratamiento trabajado a un pH inicial de 6, y esto es debido a que como se explicó, en medios ácidos, existe un mayor incremento de temperatura.

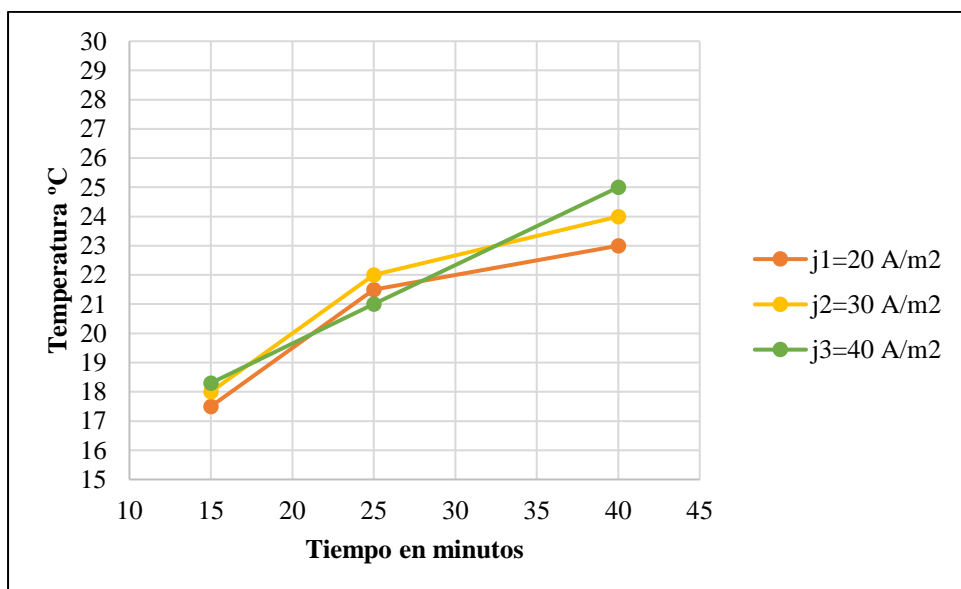


Figura 30. Variación de la temperatura final interactuando con un pH inicial de 8

De acuerdo a la figura 30, se puede visualizar la variación que tiene la temperatura en los tratamientos trabajados a un pH 8, a distintos niveles de DC y tiempos de tratamiento, siendo la que mayor cambio sufrió aquella a la cual se aplicó 40 A/m^2 a un tiempo de tratamiento de 40 minutos, llegando hasta una elevación de temperatura final de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Como se pudo apreciar en las figuras 28, 29 y 30, la temperatura también sufre variaciones durante el proceso de electrocoagulación, según Vrsalović et al. (2023) los cambios de temperatura están sujetas al suministro de corriente eléctrica, siendo la mayor elevación de este cuando el medio presenta un pH ácido, lo cual se debe a que existe un mayor consumo de energía por parte de los electrodos en ese nivel de pH; a diferencia de soluciones con un pH alcalino, que la elevación de la temperatura no es tan pronunciada. De acuerdo con Apaza (2018) indica que en otros experimentos del proceso de electrocoagulación se trabajan a una densidad de corriente más baja, pero a tiempos de reacción más prolongados, con el objetivo principal de no elevar demasiado la temperatura de la solución.

En el presente trabajo de investigación de acuerdo a los resultados obtenidos, se puede deducir que existe una remoción de la carga orgánica contaminante, reduciéndose un alto porcentaje de la concentración de la DBO_5 , hasta un 89.32%, llegando a un valor final de 21.2 mg/L para el tratamiento de agua para consumo, pero no llegando a cumplir con los valores establecidos por el ECA, esto pudo ser debido a varios factores tales como el pH de la solución, la densidad de corriente suministrada, la cual influye directamente en el porcentaje de reducción del contaminante, el tipo de material de los electrodos empleados, y su distanciamiento, la variación de la conductividad eléctrica durante el tiempo de tratamiento (Apaza, 2018; Arango, 2012; Asfaha et al., 2021; Mecola, 2019; Mousazadeh, Niaragh, et al., 2021), todos estos factores son indispensables en el proceso de electrocoagulación para evaluar la eficiencia del proceso. Si bien, no hay valores fijos para los factores que determinan la eficiencia de la reducción de la DBO_5 , se tiene que hacer un ajuste de todos estos factores para encontrar el máximo porcentaje de eficiencia y llegar a una concentración de DBO_5 que se encuentre dentro del ECA para agua.

Al evaluar los porcentajes de reducción obtenidos inicialmente con la caracterización fisicoquímica y la evaluación tras la electrocoagulación, se obtuvieron remociones de la carga orgánica, obteniendo altos valores de porcentajes de reducción de la DBO₅ y de acuerdo a otras investigaciones, también es un método muy prometedor en la eliminación de metales, carga orgánica de contaminantes de residuos lácteos, en el tratamiento de aguas residuales de la curtiembre, aguas residuales de la industria textil, entre muchos otros.

Por ejemplo, Apaza (2018) mediante la electrocoagulación logró la remoción de la carga orgánica reduciendo la concentración de DQO de efluentes lácteos hasta un 84.96%; también Asaithambi et al. (2023) empleando la electrocoagulación logró remover la carga orgánica de los efluentes, reduciendo hasta un 99.90% la concentración de DQO de los efluentes industriales con fines de destilación; por su parte Guvenc et al. (2022) en su estudio de remoción de contaminantes del efluente de una industria de producción pinturas, aplicando la electrocoagulación, lograron remover la carga orgánica contaminante reduciendo hasta el 64% de DQO y un 98.1% del color; de igual manera Asfaha et al. (2022) en su investigación de tratamiento de efluentes de una industria textil, mediante la electrocoagulación, logró remover la carga orgánica del efluente, obteniendo una disminución del 89% de color y un 76% de DQO; los autores Al-Shannag et al. (2015) en el estudio que realizaron, lograron tratar aguas residuales con presencia de iones de metales pesados (Cu_2^+ , Cr_3^+ , Ni_2^+ y Zn_2^+), logrando un porcentaje de remoción de más del 97%; esta tecnología inclusive puede remover bacterias patógenas del agua, así lo indican Gamero et al. (2020) que en su trabajo de investigación lograron una remoción del 99.9% de la *Escherichia coli*.

4.4. Evaluación de los lodos generados como suplemento para fertilizar quinua (*Chenopodium quinoa*)

Tras realizar todas las pruebas de electrocoagulación, y evaluar estadísticamente todos los resultados obtenidos, se realizó la repetición del mejor tratamiento, el cual tienen la combinación de factores pH2j3t3 (pH 7, con una densidad de corriente de 40 A/m² y un tiempo de tratamiento de 40 minutos), para obtener los lodos generados

sedimentados en la celda (figura 31), y usarlos como suplemento para fertilizar la quinua, en función del crecimiento de la planta.

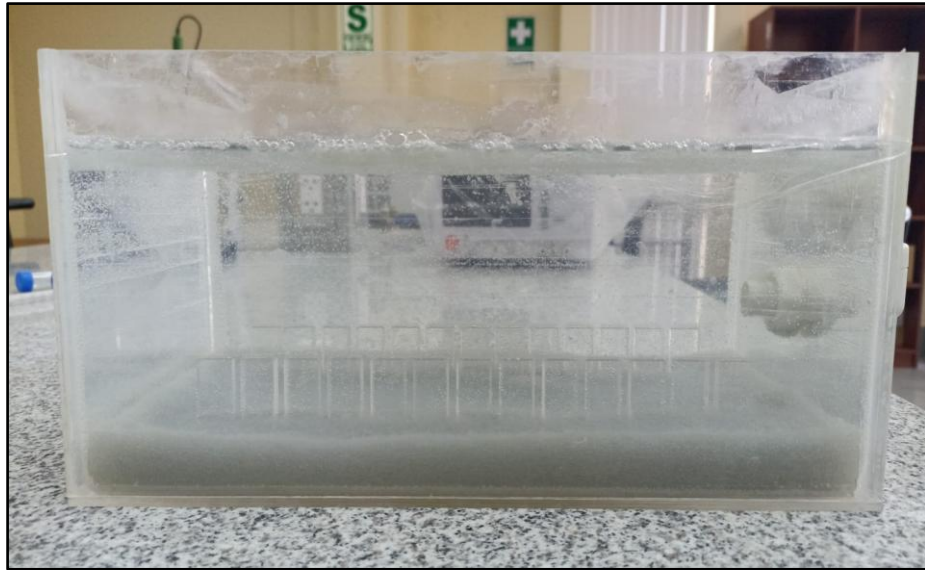


Figura 31. Formación de lodos producto del proceso de electrocoagulación

Tabla 8

Nivel de pH y contenido de Aluminio de los lodos del mejor tratamiento de electrocoagulación

Parámetro	Unidades	Concentración
pH	Unidades de pH	8.34
Aluminio	mg/kg	82.538

En la tabla 8, se muestra el nivel de pH y la cantidad de aluminio que presentó los lodos generados del mejor tratamiento, con un pH alcalino de 8.34 y una concentración de Al de 82.538 mg/kg. Siendo este un valor alto, debido a que durante el proceso de electrocoagulación se desgasta el electrodo de aluminio, ya que fue el de sacrificio; en la investigación que realizó Ocampo-Rodríguez et al. (2018) encontraron que la cantidad de aluminio presente en los lodos generados tras el proceso de electrocoagulación de lixiviados de un relleno sanitario, fue de 133.70 mg/kg. Esta variación de la cantidad de aluminio, varían según los factores determinantes durante la electrocoagulación, como la aplicación de la densidad de corriente, la cantidad y configuración de electrodos, el electrodo de sacrificio, el tiempo de tratamiento y la muestra de agua a tratar.

Posterior al análisis de los lodos generados, se procedió a evaluar si los lodos pueden comportarse como un suplemento para fertilizar la quinua, evaluando 10 tratamientos de 3 dosificaciones de los lodos con 3 repeticiones frente a un control, en función del crecimiento de la quinua.

Las condiciones ambientales del lugar de siembra, realizados en el invernadero de la UNAJ-Sede Ayabacas, fueron a una temperatura promedio de 26 °C durante el día, con riegos constantes de agua para todos los tratamientos.

Tabla 9

Tratamientos de las dosificaciones de los lodos para fertilizar la quinua

Tratamiento	Unidades	Dosificación de lodos
T0 (Control)	---	---
	g	1
T1	g	1
	g	1
	g	3
T2	g	3
	g	3
	g	5
T3	g	5
	g	5

--- No se adicionó los lodos al tratamiento

A continuación, se observan los resultados que se obtuvieron de la fertilización de la quinua con los lodos generados del mejor experimento de la electrocoagulación a los 60 días, periodo establecido para evaluar hasta el inicio de su panojamiento, y que según Soto et al. (2015) indican que a los 60 días ya se puede realizar los análisis a la quinua de acuerdo al estadio de crecimiento.

Tabla 10

Resultados obtenidos en la evaluación de las plantas a los 60 días

Tratamiento	Porcentaje de materia seca (%)	Longitud aérea (cm)	Longitud radical (cm)	Estimación de clorofila	Número de hojas
T0	98.6	10.8	6.5	92	10
T1	97.8	12.5	11.7	97	13
T2	96.7	13.2	14.4	120	15
T3	95.1	14.9	13.5	137	21

En la tabla 10, se resumen los resultados tras un tiempo de 60 días, tras la siembra con la adición de los lodos como fertilizante, se puede observar que en la evaluación de todos los parámetros respuesta de la planta, el tratamiento tres (T3) fue el mejor, obteniendo un porcentaje de materia seca del 95.1%, una longitud aérea de 14.9 cm, una longitud radical de 13.5 cm, una estimación de clorofila de 137 y un número de hojas total de 21, a diferencia del tratamiento 0 (T0) o muestra control, al cual no se le añadió ninguna dosificación de los lodos, obteniéndose resultados inferiores, con un porcentaje de materia seca del 98.6%, una longitud aérea de 10.8 cm, una longitud radical de 6.5 cm, una estimación de clorofila de 92 y un número de hojas total de 10.

De acuerdo con Francisco et al. (2011) utilizando lodo seco para fertilizar maíz, a mayor tiempo de contacto del lodo con el maíz en dosis de 0,24, 0,16 y 0,08 kg de lodo, en un sustrato de 4 kg, a los 60 días este benefició su crecimiento y desarrollo, de esta manera demostrando la acción fertilizante del lodo. Por su parte Apaza (2020) en su investigación estudió los efectos de biosólidos de PTAR como abono en cultivos de plántones de Mioporo (*Myoporum laetum*). Consideró las siguientes proporciones: M1 (100% tierra agrícola), M2 (30% de biosólido-70% tierra agrícola), M3 (50% de biosólido-50% de tierra agrícola), M4 (70 % de biosólido-30% de tierra agrícola) en 20 plántones; las variables que estudió fueron la altura de la planta, el número de hojas y el número de ramificaciones. Tras 8 semanas se realizaron las mediciones encontrando los siguientes resultados: de todas las proporciones la que tuvo mejores resultados fue la M2 (30% de biosólido-70% tierra agrícola) en las tres variables evaluadas.

Por otro lado Chacaltana y Scaramutti (2022) en su investigación del efecto que tienen los lodos de una PTAR al ser tratados mediante el vermicompostaje en el cultivo del pallar (*Phaseolus lunatus*) aplicados como enmienda, consideraron 3 grupos de ensayos (aplicación de lodo crudo, sin lodo y aplicación con lodos vermicompostados) con 3 repeticiones y 4 semillas por unidad experimental; en sus resultados encontró que los mejores resultados de crecimiento vegetativo del cultivo fue en el grupo donde se adicionó lodos vermicompostados, seguido del grupo sin lodos y el último grupo de la aplicación de lodos crudo; concluyendo que la aplicación de lodos vermicompostados resultó más beneficioso en el cultivo del *Phaseolus lunatus*, ya que hubo un incremento de nutrientes en los lodos por la actividad de las lombrices.

El porcentaje de materia seca se atribuye al volumen de la planta, ya que, a un mayor volumen de la planta, tendrá una mayor retención de agua; en cuanto a los parámetros morfológicos como la longitud aérea y radical, según la Figura 32, se puede observar que la planta con el tratamiento tres, a la que se adicionó 5 gramos de los lodos, tuvo un mejor desarrollo y crecimiento, frente al resto de tratamientos, lo que se puede indicar que los lodos sí favorecieron respecto al desarrollo de la quinua en un tiempo de 60 días. Según Dray et al. (2012) indican que el contenido de clorofila aumenta a medida que las hojas de la planta maduran, de esta manera teniendo mejores capacidades fotosintéticas; de acuerdo a los resultados de la estimación de clorofila, medidos con el equipo portátil, se hizo distintas evaluaciones en cada hoja de la planta de la quinua, teniendo como resultados 92, 97, 120 y 137 de los tratamientos T0, T1, T2 y T3 respectivamente, valores que concuerdan con la fuente bibliográfica, ya que la planta que presenta el mayor valor de la estimación de clorofila, es aquella que posee un mayor volumen de crecimiento.

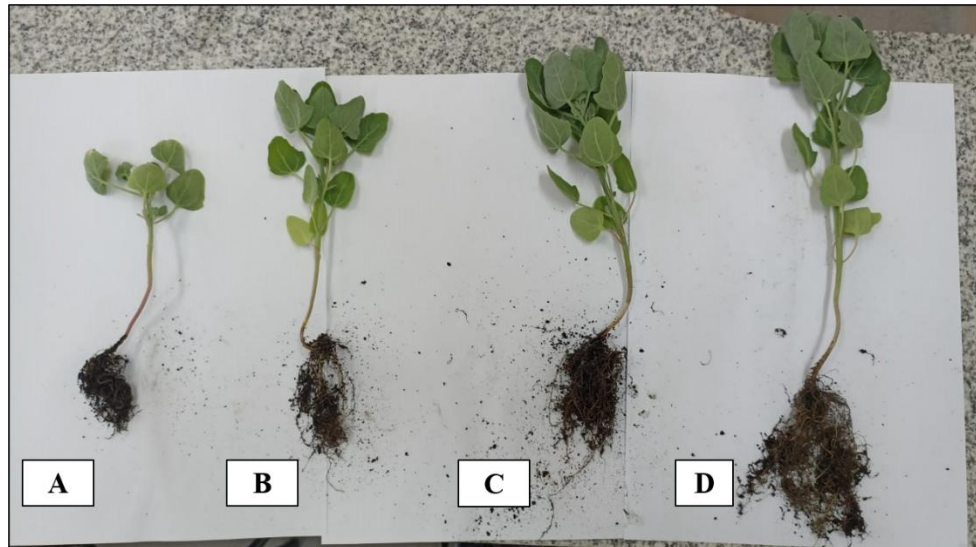


Figura 32. Resultados morfológicos de los distintos tratamientos en la quinua A:T0, B:T1, C:T2 y D:T3

Como se pudo apreciar, los lodos generados a partir del proceso de la electrocoagulación en esta investigación tuvieron efectos positivos en la aplicación a la quinua, de esta manera ayudando en el desarrollo y crecimiento de la planta hasta los 60 días sin observarse algún efecto adverso o negativo. Pero se tiene que considerar que según Chacaltana y Scaramutti (2022) aplicar los lodos crudos directamente al suelo no siempre resultará beneficioso, dependerá principalmente del origen de agua residual tratada, de su composición física, química y microbiológica; debido a que los lodos con elevada toxicidad pueden dificultar la absorción de nutrientes por las raíces, lo que perjudica el crecimiento de la planta.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se caracterizó fisicoquímicamente las aguas provenientes del río Coata, el cual presentó las siguientes concentraciones: DBO₅ de 198.5 mg/L, DQO de 714.3 mg/L, una conductividad de 1322 μ S/cm y un pH de 7.47, de los cuales la DBO₅ y la DQO fueron los parámetros que excedieron el ECA para agua en la categoría 1.

Se construyó una celda para el proceso de electrocoagulación tipo Batch a escala de laboratorio, puesto que en este tipo de celda se controla mejor los procesos que ocurre en la electrocoagulación, con una capacidad total de 9 litros considerando las zonas de generación de espumas, las zonas de reacciones y la zona de sedimentación de lodos, para tener altas reducciones de la DBO₅.

En los tratamientos del proceso de electrocoagulación se evidencia la remoción de la carga orgánica contaminante, obteniendo como mejor porcentaje de reducción de la DBO₅, los niveles de pH 7, 40 A/m² y 40 minutos respectivamente, logrando un 89.32% de eliminación de la DBO₅, pero no llegando a cumplir con los Estándares de Calidad Ambiental para agua trabajando bajo esa configuración de factores.

Los lodos generados del mejor tratamiento del proceso de electrocoagulación tuvieron una respuesta positiva al utilizarse como suplemento para el crecimiento de la quinua; la dosificación del tercer tratamiento (5 g), presentó mejores resultados tras los 60 días sin evidencia de efectos negativos, como porcentaje de materia seca de 95.1%, longitud aérea de 14.9 cm, longitud radical de 13.5 cm, una estimación de clorofila de 137 y mayor número de hojas siendo 21, frente a los otros tratamientos y la prueba control.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda experimentar a niveles de densidad de corriente y tiempo de tratamiento distintos a los de la presente investigación, además del tipo de celda, material del electrodo, la configuración de estos, las dimensiones y su distanciamiento, para disminuir la concentración de DBO₅ hasta llegar a cumplir con el ECA para agua.

Se recomienda comparar las condiciones de los lodos con la normativa del manejo y reaprovechamiento para su uso.

Se recomienda evaluar el crecimiento de la quinua empleando los lodos generados como suplemento, en toda su etapa fenológica.

Se recomienda evaluar el contenido de aluminio en la planta de la quinua para evaluar si existe o no una bioacumulación.

Se recomienda evaluar los lodos generados como suplemento, en otras especies, como, por ejemplo, especies forestales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adhoum, N., & Monser, L. (2004). Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(10), 1281–1287. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2003.12.001>
- Agabo, C. (2018). *Aplicación de tecnologías avanzadas de oxidación en el tratamiento de las aguas residuales de la industria oleícola* [Universidad Pablo de Olavide]. <http://hdl.handle.net/10433/6490>
- Aguilar-Ascón, E., Marrufo-Saldana, L., & Neyra-Ascon, W. (2020). Efficiency of electrocoagulation method to reduce COS, BOD and TSS in tannery industry wastewater: application of the Box-Behnken design. *Leather and Footwear Journal*, 20(3), 217–228. <https://doi.org/10.24264/lfj.20.3.1>
- Aguilar-Ascón, E., Neyra-Ascón, W., Albrecht-Ruiz, M., & Ibarra-Basurto, A. (2021). Optimizing the reduction of total suspended solids in pump water from fish factories through electrocoagulation using response surface methodology. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 269–277. <https://doi.org/10.12911/22998993/137079>
- Aguilar, E. (2015). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. *Revista Del Instituto De Investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias Geográficas*, 18(35), 69–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v18i35.11843>
- Akkaya, G. K. (2022). Treatment of petroleum wastewater by electrocoagulation using scrap perforated (Fe-anode) and plate (Al and Fe-cathode) metals: optimization of operating parameters by RSM. *Chemical Engineering Research and Design*, 187, 261–275. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.048>
- Al-Shannag, M., Al-Qodah, Z., Bani-Melhem, K., Qtaishat, M. R., & Alkasrawi, M. (2015). Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: kinetic study and process performance. *Chemical Engineering Journal*, 260, 749–756. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.035>
- Alimohammadi, M., Mesdaghinia, A., Shayesteh, M. H., Mansoorian, H. J., & Khanjani, N. (2019). The efficiency of the electrocoagulation process in reducing fluoride: application of inductive alternating current and polarity inverter. *International Journal*

- of Environmental Science and Technology*, 16(12), 8239–8254.
<https://doi.org/10.1007/s13762-019-02297-4>
- Amador-Díaz, A., Veliz-Lorenzo, E., & Bataller-Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46, 1–10.
<https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf>
- An, C., Huang, G., Yao, Y., & Zhao, S. (2017). Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: a review. *Science of The Total Environment*, 579, 537–556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.062>
- An, S.-A., Lee, J., Sim, J., Park, C.-G., Lee, J.-S., Rho, H., Park, K.-D., Kim, H.-S., & Woo, Y. C. (2022). Evaluation of the advanced oxidation process integrated with microfiltration for reverse osmosis to treat semiconductor wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 1057–1066.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.010>
- ANA. (2016). Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales. In *Autoridad Nacional del Agua* (p. 92). Autoridad Nacional del Agua.
<http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/209>
- Apaza, A. F. (2020). *Efectos del biosólido de la PTAR la Escalerilla como abono en el cultivo de plántones de Mioporo (Myoporum laetum) - Arequipa 2019* [Universidad Tecnológica del Perú].
https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/3801/Adela_Apaza_Julio_Quirita_Tesis_Titulo_Profesional_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Apaza, H. (2018). Sistema combinado electrocoagulación-filtro biológico para la remoción de carga orgánica de los efluentes lácteos [Universidad Nacional Agraria La Molina]. In *Universidad Nacional Agraria la Molina*.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3395>
- Apaza, H. (2019). Eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de materia orgánica de las aguas del río Torococha. *Revista Científica de Investigaciones Ambientales*, 2(2), 8–18. <http://revistas.upsc.edu.pe/journal/index.php/RIAM/article/view/57>
- Aquino, P. (2017). *Calidad del agua en el Perú Retos y aportes para una gestión sostenible en aguas residuales* (1st ed.). Derecho, Ambiente y Recursos Naturales.

- Arango, Á. (2012). Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Producción + Limpia*, 7(1), 59–67. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000100006
- Arango, A., & Garcés, L. F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *REVISTA Universidad EAFIT*, 43(147), 56–67. <https://www.redalyc.org/pdf/215/21514706.pdf>
- Arias, V., Lovera, D., & García, I. (2011). Diseño y construcción de un reactor electrolítico multielectródico para laboratorio. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 14(27), 53–57. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8135959>
- Aroapaza, V. A., & Salazar, P. Y. (2016). *Diseño e implementación de un sistema de monitorización de la calidad ambiental de línea base de la cuenca del río Coata Puno* [Universidad Nacional Del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/3684>
- Asaithambi, P., Yesuf, M. B., Govindarajan, R., Selvakumar, P., Niju, S., Pandiyarajan, T., Kadier, A., Nguyen, D. D., & Alemayehu, E. (2023). Industrial wastewater treatment using batch recirculation electrocoagulation (BRE) process: studies on operating parameters. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 2, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100014>
- Asfaha, Y. G., Tekile, A. K., & Zewge, F. (2021). Hybrid process of electrocoagulation and electrooxidation system for wastewater treatment: a review. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100261. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100261>
- Asfaha, Y. G., Zewge, F., Yohannes, T., & Kebede, S. (2022). Application of hybrid electrocoagulation and electrooxidation process for treatment of wastewater from the cotton textile industry. *Chemosphere*, 302, 134706. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134706>
- Baloitcha, G. M. P., Mayabi, A. O., & Home, P. G. (2022). Evaluation of water quality and potential scaling of corrosion in the water supply using water quality and stability indices: a case study of Juja water distribution network, Kenya. *Heliyon*, 8(3), e09141. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09141>

- Bayramoglu, M., Kobya, M., Can, O. T., & Sozbir, M. (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology*, 37(2), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.09.002>
- Belizario, G., Capacoila, J., Huaquisto, E., Cornejo, D. A., & Chui, H. N. (2019). Determinación del contenido de fósforo y arsénico, y de otros metales contaminantes de las aguas superficiales del río Coata, afluente del Lago Titicaca, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 36(5), 223–228. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.36.5.4>
- Bezsenyi, A., Sági, G., Makó, M., Wojnárovits, L., & Takács, E. (2021). The effect of hydrogen peroxide on the biochemical oxygen demand (BOD) values measured during ionizing radiation treatment of wastewater. *Radiation Physics and Chemistry*, 189, 109773. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109773>
- Boinpally, S., Kolla, A., Kainthola, J., Kodali, R., & Vemuri, J. (2023). A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle*, 4, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001>
- Bote, M. E. (2021). Studies on electrode combination for COD removal from domestic wastewater using electrocoagulation. *Heliyon*, 7(12), e08614. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08614>
- Brenda, E. A., Matchawe, C., Nsawir, B. J., Manuela, B. B. A., Adjele, J. J. B., Mouafo, H. T., Baleba, M. M. R., Romuald, E. S., Ngonde, M.-C., & Noni, L. D. (2021). The use of alternative water sources as a means of adaptation to water shortages in Nsimyong, Yaounde city: a quality assessment. *Scientific African*, 13, e00861. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00861>
- Callasaca-Pacheco, R.-A., Larico-Mamani, C.-J., Fernandez-Mamani, D.-L., Cabana, R., Cahua-Alvarez, J. L., & Quiñonez, J. (2022). Variación de la calidad del agua del río Coata según el Ica-Pe por fuentes contaminantes. *Cátedra Villarreal*, 10(1), 16–25. <https://doi.org/10.24039/cv20221011189>
- Callasaca, R. (2019). *Influencia de fuentes puntuales de contaminación en la calidad de agua del río Coata, en el tramo puente maravillas y puente coata, Puno 2018* [Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez]. <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/4770>
- Calvache, M., & Valle, L. (2021). Índice de cosecha con macro-nutrientes en grano de

- quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). *Revista Alfa*, 5(13), 15–28. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i13.95>
- Campos-Rodríguez, J., Acosta-coral, K., & Paucar-menacho, L. M. (2022). Quinoa (*Chenopodium quinoa*): composición nutricional y componentes bioactivos del grano y la hoja, e impacto del tratamiento térmico y de la germinación. *Scientia Agropecuaria*, 13(3), 209–220. <http://www.scielo.org.pe/pdf/agro/v13n3/2077-9917-agro-13-03-209.pdf>
- Cancapa, E. A. (2019). *Eficiencia de la electrocoagulación en la reducción de materia orgánica presente en las aguas residuales domésticas bajo condiciones altoandinas (Juliaca –Puno)* [Universidad Peruana Unión]. https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/2735/Erick_Trabajo_Bachiller_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Canto-Ríos, J. de J., Martín-Domínguez, A., Pérez-Castrejón, S., Alcocer-Yamanaka, V., & Tzatchkov-Velitchko, G. (2017). Modelación hidráulica de un reactor de electrocoagulación tubular de sección anular. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(3), 111–126. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-07>
- Castañeda, C. S., Almanza-Merchán, P. J., Pinzón, E. H., Cely-Reyes, G. E., & Serrano-Cely, P. A. (2018). Estimación de la concentración de clorofila mediante métodos no destructivos en vid (*Vitis vinifera* L.) cv. Riesling Becker. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(2), 329–337. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i2.7566>
- Chacaltana, F. S., & Scaramutti, S. C. (2022). *Efecto de Lodos de una PTAR tratados por vermicompostaje en el cultivo de Phaseolus lunatus* [Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/110872>
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11–41. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>
- Chen, R.-F., Wu, L., Zhong, H.-T., Liu, C.-X., Qiao, W., & Wei, C.-H. (2021). Evaluation of electrocoagulation process for high-strength swine wastewater pretreatment. *Separation and Purification Technology*, 272, 118900. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118900>
- Chen, X., Chen, G., & Yue, P. L. (2002). Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. *Chemical Engineering Science*, 57(13), 2449–2455.

[https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00147-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00147-1)

- Chew, C. M., Aroua, M. K., Hussain, M. A., & Ismail, W. M. Z. W. (2016). Evaluation of ultrafiltration and conventional water treatment systems for sustainable development: an industrial scale case study. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 3152–3163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.037>
- Choque-Quispe, D., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A., & Ramos-Pacheco, B. (2018). Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. *Tecnología Química*, *38*(2), 298–309. <https://doi.org/10.22533/at.ed.5672127015>
- Chulluncuy, N. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, *29*, 153–170. https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/download/232/208
- Coila, F. J. (2022). *Evaluación de la calidad del agua en la zona de confluencia de los ríos Torococha y Coata Caracoto-San Román - Puno* [Universidad Nacional del Altiplano]. http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7104/Molleapaza_Mamani_Joel_Neftali.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Conejeros, A., Hueichaqueo, C., Martínez-Jiménez, B. L., & Placeres, A. (2021). Monitoreo de calidad del agua en sistema de agua potable rural. *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, *42*(3), 60–70. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282021000300060
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. In *WCB/McGraw Hill*.
- Cruz, L. G. (2015). *Optimización de la aplicación de lodos de depuración de aguas residuales al abonado o mejora de suelos* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.39429>
- Damian, D. F. (2019). *Propuesta de un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de lavado de filtros de Epsel S. A. Lambayeque para su aprovechamiento* [Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. http://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/2006/1/TL_DamianChafloqueDanny.pdf

- Déniz, F. A. (2010). *Análisis estadístico de los parámetros DQO, DBO5 y SS de las aguas residuales urbanas en el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa* [Universidad de las Palmas de Gran Canaria]. https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/4858/3/0622200_00000_0000.pdf
- Dolatabadi, M., Malekahmadi, R., Ghorbanian, A., & Ahmadzadeh, S. (2021). Investigation of electrocoagulation process for efficient removal of bisphenol a from the aqueous environment: promising treatment strategy. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 6, 1275–1283. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18502/jehsd.v6i2.6539>
- Dolores, A. (2018). Calidad del agua para consumo humano. *Revista Científica Investigación Andina*, 18(1), 258–267. <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/3055>
- Donado, R. (2013). *Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y san Martín de los llanos en el departamento del Meta* [Pontificia Universidad Javeriana]. <https://doi.org/10.1007/s38314-024-1571-z>
- Dray, F. A., Center, T. D., & Mattison, E. D. (2012). In situ estimates of waterhyacinth leaf tissue nitrogen using a SPAD-502 chlorophyll meter. *Aquatic Botany*, 100, 72–75. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2012.03.005>
- Duarte-Jaramillo, L., Mendoza-Atencio, M. A., & Jaramillo-Colorado, B. E. (2021). Water quality in the municipalities of Sincerín and Gambote, Bolívar, Colombia (2017-2018). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 103, 77–87. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210217>
- Dubey, S., Rekhate, C., Sharma, A., Joshi, A., & Kumar Prajapati, A. (2024). Optimizing distillery effluent treatment through sono-electrocoagulation: a response surface methodology approach. *Total Environment Advances*, 9, 200093. <https://doi.org/10.1016/j.teadva.2023.200093>
- Ebba, M., Asaithambi, P., & Alemayehu, E. (2021). Investigation on operating parameters and cost using an electrocoagulation process for wastewater treatment. *Applied Water Science*, 11, 175. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01517-y>
- Ebba, M., Asaithambi, P., & Alemayehu, E. (2022). Development of electrocoagulation process for wastewater treatment: optimization by response surface methodology.

Heliyon, 8(5), e09383. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09383>

Edmundo, J. E., & Cabrera, C. F. (2021). Valoración energética de lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas – Lima. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48), 229–233.

http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/2300/OT_311.pdf?sequence=1&isAllowed=y

FAO. (2013). *Catálogo de variedades comerciales de quinua en el Perú* (1st ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/5bd231bd-7284-4d91-8a48-ee37d2424f9e/content>

Faviel, M., Infante, D., & Molina, D. O. (2019). Percepción y calidad de agua en comunidades rurales del área natural protegida La Encrucijada, Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 317–334. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.05>

Feng, Y., Zheng, B.-H., Jia, H.-F., Peng, J.-Y., & Zhou, X.-Y. (2021). Influence of social and economic development on water quality in Dongting Lake. *Ecological Indicators*, 131(September), 108220. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108220>

Ferrando, P. J., & Anguiano-Carrasco, C. (2010). El análisis factorial como técnica de investigación en psicología. *Papeles Del Psicologo*, 31(1), 18–33. <https://www.redalyc.org/pdf/778/77812441003.pdf>

Forero-Buitrago, G. A., Hernández-Lara, R., & Rojas, O. (2020). Desarrollo de un equipo de tratamiento de agua residual de pintura de construcción mediante electrocoagulación. *Ingeniería y Competitividad*, 22(2), 1–10. <https://doi.org/10.25100/iyc.v22i2.9474>

Francisco, J., Ramos, P., & Aguirre, G. (2011). Aprovechamiento agrícola del lodo generado en la PTAR de Puente Piedra - Lima. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 77(1), 75–85. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v77n1/a08v77n1.pdf>

Gamero, A., García, P., & La Rosa-Toro, A. (2020). Remoción de bacterias patógenas del agua mediante electrocoagulación con ánodos de aluminio. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(4), 136–178. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-04-05>

- García-González, J., Osorio-Ortega, M. A., Saquicela-Rojas, R. A., & Cadme, M. L. (2021). Determinación del índice de calidad del agua en ríos de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. *Ingeniería Del Agua*, 25(2), 115–126. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.13921>
- Garfí, M., Cadena, E., Sanchez-Ramos, D., & Ferrer, I. (2016). Life cycle assessment of drinking water: comparing conventional water treatment, reverse osmosis and mineral water in glass and plastic bottles. *Journal of Cleaner Production*, 137, 997–1003. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.218>
- Garzón, G. A. (2019). *Diseño de una alternativa para el manejo adecuado de los lodos generados por la planta de tratamiento del acueducto Piendamó-Morales, Municipio de Piendamó* [Corporación Universitaria Autónoma del Cauca]. https://repositorio.uniautonomia.edu.co/bitstream/handle/123456789/249/T_IA-P_115_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- González-Cabrera, O., Ruiz-Pérez, T., Claro-Pérez, M., Pérez-Pino, N. M., & Collazo-Alfonso, L. (2022). Estudio de patentes sobre tecnologías para tratamiento de agua y el agua residual. *Transinformação*, 26(3), 339–347. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/0103-37862014000300010>
- Gutierrez, V. R. (2018). *Evaluación de la calidad de agua del río Coata en la desembocadura del río Torococha utilizando el índice de calidad de agua del consejo canadiense CCME-WQI y el ICA-PE, Puno-2018* [Universidad Peruana Unión]. https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/1771/Verónica_Tesis_Licenciatura_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Guvenc, S. Y., Can-Güven, E., & Varank, G. (2022). Persulfate enhanced electrocoagulation of paint production industry wastewater: process optimization, energy consumption, and sludge analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 157, 68–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.11.015>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6th ed.). McGraw-Hill. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Holt, P., Barton, G., & Mitchell, C. (1999). Electrocoagulation as a wastewater treatment. *The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Event, 1000*, 41–

46. [https://kremesti.com/water/chemical_and_biological_reference/Electrocoagulation PH_GP_CM_1999.pdf](https://kremesti.com/water/chemical_and_biological_reference/Electrocoagulation_PH_GP_CM_1999.pdf)
- Hu, Z., & Grasso, D. (2005). Chemical oxygen demand. In *Encyclopedia of Analytical Science* (2nd ed., pp. 325–330). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00663-4>
- Huacani, Y. (2014). Valoración económica del agua para consumo en la ciudad de Juliaca-2013. *Revista Científica Investigación Andina*, 13(1), 7. <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/2674>
- Huaman, A. G., & Muñoz, M. (2019). *Influencia del tiempo y densidad de corriente para la remoción de DBO y turbidez de efluentes de industria papelera por electrocoagulación* [Universidad de Trujillo]. https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/14063/HuamanRodriguez_A - MunozOlivera_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ibana-Lopez, K., Sihuay-Perales, M., Garate-Quispe, J., Araújo-Florez, J., Herrera-Machaca, M., Alarcón Aguirre, G., & Rodriguez-Achata, L. (2021). Contaminación de agua superficial de la periferia urbana de Puerto Maldonado, al sureste de la amazonia peruana. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 32(6), e20365. <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i6.20365>
- INEI. (2018). Perú: formas de acceso a agua y saneamiento básico. In *Instituto Nacional Estadística E Informática* (pp. 1–69). Instituto Nacional Estadística E Informática. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin_agua_y_saneamiento.pdf
- Jin, T., Peydayesh, M., & Mezzenga, R. (2021). Membrane-based technologies for per- and poly-fluoroalkyl substances (PFASs) removal from water: removal mechanisms, applications, challenges and perspectives. *Environment International*, 157, 106876. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106876>
- Khan, S., Al-Obaidi, M. A., Kara-Zaïtri, C., & Mujtaba, I. M. (2023). Optimisation of design and operating parameters of reverse osmosis process for the removal of phenol from wastewater. *South African Journal of Chemical Engineering*, 43, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.10.005>
- Kobyas, M., Can, O. T., & Bayramoglu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by

- electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 100(1–3), 163–178. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00102-X)
- Kumar, A., & Pan, S.-Y. (2020). Opportunities and challenges of electrochemical water treatment integrated with renewable energy at the water-energy nexus. *Water-Energy Nexus*, 3, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.03.006>
- Kumar, P. R., Chaudhari, S., Khilar, K. C., & Mahajan, S. P. (2004). Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*, 55(9), 1245–1252. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.12.025>
- Larue, O., Vorobiev, E., Vu, C., & Durand, B. (2003). Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. *Separation and Purification Technology*, 31, 177–192. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(02\)00182-X](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(02)00182-X)
- Lessoued, R., Baameur, L., & Tabchouche, A. (2021). Modeling and optimization of COD removal from leachate by electrocoagulation: application of central composite design. *Environmental Modeling & Assessment*, 26(3), 423–432. <https://doi.org/10.1007/s10666-021-09765-7>
- Liang, Z., Wang, Y., Zhou, Y., Liu, H., & Wu, Z. (2009). Variables affecting melanoidins removal from molasses wastewater by coagulation/flocculation. *Separation and Purification Technology*, 68(3), 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.06.011>
- Liu, C., Pan, C., Chang, Y., & Luo, M. (2021). An integrated autoregressive model for predicting water quality dynamics and its application in Yongding River. *Ecological Indicators*, 133, 108354. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108354>
- Llanos, I. G., & Roque, M. Y. (2021). *Percepción de los líderes de las organizaciones sociales sobre la sostenibilidad del servicio de agua potable en la ciudad de Juliaca* [Universidad Nacional del Altiplano]. http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7104/Molleapaza_Mamani_Joel_Neftali.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- López, P., & Harnisth, A. (2016). Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Enfoque UTE*, 7(1), 13–21. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n1.84>
- Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 40(2), 10–17.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>

- Lustenberger, S., & Castro-Muñoz, R. (2022). Advanced biomaterials and alternatives tailored as membranes for water treatment and the latest innovative European water remediation projects: a review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 5, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100205>
- Magaña-Irons, L., Rojas-vargas, A., Gonzáles-Díaz, Y., & Ojeda-armaignac, E. (2020). Remoción de contaminantes del residual lácteo por electrocoagulación con electrodos de aluminio. *Tecnología Química*, 40(1), 17–34. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852020000100017
- Martínez, A. de J., Castillo, J. del C., Rodríguez, V. A., & Orgaz, F. (2020). Aprovechamiento de los biosólidos procedentes de plantas de tratamiento de aguas urbanas en agricultura. Estudio de caso en República Dominicana. *Revista DELOS*, 13(37), 23. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7794697>
- Martínez, F. (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional* [Universidad de Castilla - La Mancha]. <https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/984/251> Tratamiento de aguas residuales industriales.pdf
- Mecola, N. (2019). Efecto de la electrocoagulación en la concentración de materia orgánica de aguas residuales de la Universidad Nacional de Trujillo. *Ciencia y Tecnología*, 15(1), 143–147. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/2382>
- Méndez-Natera, J. R. (2002). Relación entre el peso seco total y los caracteres vegetativos y la nodulación de plantas de maní (*Arachis hypogaea* L.). *Revista Científica UDO Agrícola*, 2(1), 46–53. <http://www.bioline.org.br/pdf?cg02006>
- Mendizábal, G., & Sedano, M. G. (2010). El agua potable como derecho fundamental para la vida. *Misión Jurídica*, 3(3), 43–60. <https://doi.org/10.25058/1794600X.21>
- Menendez, W. M. (2018). *Evaluación de los parámetros fisicoquímicos y calidad bacteriológica del río Coata - región Puno 2015* [Universidad José Carlos Mariátegui]. <http://repositorio.ujcm.edu.pe/handle/20.500.12819/546>
- Mesa, S. L., Orjuela, J. M., Ortega Ramírez, A. T., & Sandoval, J. A. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera

- colombiana. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 87–98.
<https://doi.org/10.15446/ga.v21n1.69792>
- MINAM. (2013). *Línea base ambiental de la cuenca del lago Titicaca* (p. 85). Ministerio del Ambiente. <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/Linea-Base-Ambiental-del-Lago-Titicaca.pdf>
- MINAM. (2017). Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias. In *Normas legales*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>
- Minchan, A., Vásquez, B. G., Vásquez, C. L., Moreno, D. L., Ordoñez, F. de M., Rojas, N. H., Torres, P. A., & Ponce, R. N. (2018). *Vigilancia y control de la calidad del agua* (1st ed.). Ministerios de Salud. <https://repositorio.ins.gob.pe/handle/INS/1082>
- Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29–41. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5)
- Mora, G., Medina, C., Polo-Corro, J., & Hora, M. (2020). Calidad del agua según los macroinvertebrados bentónicos y parámetros fisicoquímicos en la cuenca del río Huacamarçanga (La Libertad, Perú). *Revista de Investigación Científica REBIOL*, 40(1), 85–98. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/faccbbiol/article/view/2999/3327>
- Mousazadeh, M., Niaragh, E. K., Usman, M., Khan, S. U., Sandoval, M. A., Al-Qodah, Z., Khalid, Z. Bin, Gilhotra, V., & Emamjomeh, M. M. (2021). A critical review of state-of-the-art electrocoagulation technique applied to COD-rich industrial wastewaters. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43143–43172. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14631-w>
- Moussavi, M., Pendashteh, A., & Alinia, H. (2021). Treatment of a natural gas refinery effluents by electrocoagulation. *Environmental Challenges*, 3, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100036>
- Muñoz, M. Á., Cortés, J. D., & Agudelo, R. N. (2022). Electrocoagulación con electrodos de aluminio para tratamiento de aguas residuales de curtiembres en Villapinzón, Cundinamarca, Colombia. *Mutis*, 12(1), 96–109.

<https://doi.org/10.21789/22561498.1783>

- Namuche, S. M. (2018). *Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta de tratamiento de agua potable por osmosis inversa a partir de agua de mar en el distrito de Huarmey - 2017* [Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/UNJFSC/5010>
- Ocampo-Rodríguez, D. B., Quero-Gutiérrez, E., & León-Castelazo, Y. (2018). Tratamiento de lodos generados por electrocoagulación de lixiviados del relleno sanitario El Huixmí. *Revista de Tecnologías En Procesos Industriales*, 2(5), 1–6. https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Tecnologías_en_Procesos_Industriales/vol2num5/Revista_de_Tecnologías_en_Procesos_Industriales_V2_N5_1.pdf
- Ocampo-Rodríguez, D. B., Vázquez-Rodríguez, G. A., Martínez-Hernández, S., Iturbe-Acosta, U., & Coronel-Olivares, C. (2022). Desinfección del agua: una revisión a los tratamientos convencionales y avanzados con cloro y ácido peracético. *Ingeniería Del Agua*, 26(3), 185–204. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17651>
- Ocola, J. J., & Laqui, W. F. (2017). *Fuentes contaminantes en la cuenca del Lago Titicaca: un aporte al conocimiento de las causas que amenazan la calidad del agua del maravilloso Lago Titicaca*. Autoridad Nacional del Agua. <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/636>
- Oden, M. K., & Sari-Erkan, H. (2018). Treatment of metal plating wastewater using iron electrode by electrocoagulation process: optimization and process performance. *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 207–217. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.08.001>
- Ojeda, E., & Hing, R. (2009). Tratamiento por electrocoagulación y coagulación-floculación de la vinaza de destilerías. *Tecnología Química*, XXIX, 153–161. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543761019>
- Olajire, A. A. (2020). Recent advances on the treatment technology of oil and gas produced water for sustainable energy industry-mechanistic aspects and process chemistry perspectives. *Chemical Engineering Journal Advances*, 4, 100049. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100049>
- Olmos, D. M., & Moncaleano, J. N. (2021). *Evaluación de la eficiencia de la electrocoagulación en aguas residuales textiles utilizando como electrodo el aluminio*

- [Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas].
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/29904/OlmosBonillaDianaMarcela&MoncaleanoGuayaraJuanNicolas2021.pdf?sequence=3>
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable* (3rd ed.). Organización Mundial de la Salud. <https://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/39098>
- Otero, A. (2017). *Aplicaciones de la nanofiltración para el acondicionamiento del agua potable destinada la industria farmacéutica y tratamiento de vertidos tóxicos conteniendo metales pesados cromo (VI) Y plomo (II)* [Universidad Nacional De Educación a Distancia]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=138760>
- Pacori, E. W., & Pacori, A. K. (2018). *Metodología y diseño de la investigación científica*. FFECAAT E.I.R.L.
- Pantoja, A., & Sanchez, O. R. (2021). Reducción de la Dbo5 y coliformes termotolerantes mediante la electroquímica en aguas servidas domésticas del Citrar-Uni-Perú. *Revista Científica: BIOTECH AND ENGINEERING*, 1(02), 18–32. <https://doi.org/10.52248/eb.Vol1Iss02.9>
- Patel, P., Gupta, S., & Mondal, P. (2022). Electrocoagulation process for greywater treatment: statistical modeling, optimization, cost analysis and sludge management. *Separation and Purification Technology*, 296, 121327. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121327>
- Pavan, J. V., Masachessi, G., Prez, V. E., Di Cola, G., Re, V. E., & Nates, S. V. (2022). Evaluación de la calidad de aguas superficiales en espacios recreacionales, una propuesta integradora de marcadores químicos y microbiológicos. *Revista de La Facultad de Ciencias Médicas de Córdoba*, 79(2), 210–214. <https://doi.org/10.31053/1853.0605.v79.n2.33403>
- Peláez, S. (2020). *Uso de la electrocoagulación como alternativa para la eliminación de microplásticos presentes en las aguas residuales urbanas* [Escuela Politécnica Superior]. <http://www.elsevier.com/locate/scp>
- Perales, J. C. (2019). *Influencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de cromo hexavalente (Cr+6) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental*, 2019 (Vol. 5) [Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/7711/2/IV_FIN_107_T

E_Perales_Vilchez_2019.pdf

Perez, J. L., & Rodriguez, R. E. (2018). *Remoción de DQO y DBO del lactosuero ácido mediante el uso de una celda de electrocoagulación* [Universidad Nacional del Centro del Perú].

https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5168/T010_20085567_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Piña-Soberanis, M., Martín-Domínguez, A., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Guevara-Lara, A., & García-Espinoza, J. E. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(2), 257–271. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v10n2/v10n2a10.pdf>

Pinto, M. (2015). *Aspectos de la fisiología del cultivo de la quínoa* (p. 14). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/6730>

Poerio, T., Denisi, T., Mazzei, R., Bazzarelli, F., Piacentini, E., Giorno, L., & Curcio, E. (2022). Identification of fouling mechanisms in cross-flow microfiltration of olive-mills wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103058. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103058>

Prieto-García, F., Callejas-Hernández, J., Reyes-Cruz, V. E., Marmolejo-Santillán, Y., & Prieto-Méndez, J. (2014). Electrodissolution aluminum electrode during an electrocoagulation acid whey. *DYNA*, 81(187), 129–136. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n187.40757>

Prihartini, P. T., Nugroho, F. A., Prabowo, B. H., Prasetyo, T., Rahayu, F. S., Kadier, A., & Sher, F. (2022). Integrated electrocoagulation-tight ultrafiltration for river water decontamination: the influence of electrode configuration and operating pressure. *Cleaner Engineering and Technology*, 9, 100524. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100524>

Quispe-Mamani, J. C., Aguilar-Pinto, S. L., Quispe-Lino, C. N., Tuesta-Ramirez, Y. A., & Tintaya-Choquehuanca, O. (2021). Incidence of contamination of water resources in the development of livestock activities in the lower area of the Coata river watershed, Peru. *INFORMATION TECHNOLOGY IN INDUSTRY*, 9(1), 581–594. <https://doi.org/10.17762/itii.v9i1.176>

Quispe, J. C., Marca, H. R., Mamani, V. Y. F., & Arce, R. R. (2020). Efectos de la

- contaminación hídrica sobre la salud pública de la población de la cuenca Coata, de la región de Puno – 2019. *Journal of the Academy*, 3, 1–16. <https://doi.org/10.47058/joa3.1>
- Quispe, R. F., Belizario, G., Chui, H. N., Huaquisto, S., Calatayud, A. P., & Yábar, P. S. (2019). Concentración de metales pesados: cromo, cadmio y plomo en los sedimentos superficiales en el río Coata, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 36(2), 83–90. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.36.2.3>
- Raffo, E., & Ruiz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 17(1), 71. <https://doi.org/10.15381/idata.v17i1.12035>
- Rahman, K., Barua, S., & Imran, H. M. (2021). Assessment of water quality and apportionment of pollution sources of an urban lake using multivariate statistical analysis. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100309. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100309>
- Ramirez, F. (1998). *Cloración*. <http://www.elaguapotable.com/cloracion1.htm>
- Restrepo, A. P., Arango, Á., & Garcés, L. F. (2006). La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción Mas Limpia*, 1(2), 58–77. https://www.researchgate.net/publication/277035194_La_Electrocoagulacion_retos_y_oportunidades_en_el_tratamiento_de_aguas
- Ribeiro, R. M., Bergamasco, R., Gimenes, M. L., & Müller, C. M. O. (2007). Preparación de membranas para producción de agua potable. *Información Tecnológica*, 18(1), 15–21. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642007000100004>
- Ríos-Tobón, S., Agudelo-Cadavid, R. M., & Gutiérrez-Builes, L. A. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 35(2), 236–247. <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v35n2a08>
- Rivas-Romero, S., Menés-Vuelta, G., & Rómulo-Rodríguez, A. (2017). Tratamiento por coagulación-floculación a efluente de la empresa del Níquel comandante Ernesto Che Guevara. *Tecnología Química*, 37(2), 173–183. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v37n2/rtq02217.pdf>

- Rodríguez, Y. J., Fuentes, M. D., Beleño, Ó. D., & Montoya, L. H. (2021). Electrocoagulación como proceso de tratabilidad de aguas residuales de una planta de lácteos y cárnicos. *Tecnura*, 25(67), 26–39. <https://doi.org/10.14483/22487638.15769>
- Rodríguez, J., Ortiz, D., Rodríguez, E., & Santos, E. (2018). Diseño de un filtro potabilizador ecológico para comunidades rurales, utilizando la Moringa Oleifera. *Revista Lasallista de Investigación*, 15(2), 118–130. <https://doi.org/10.22507/rli.v15n2a9>
- Rodríguez, S. C., Asmundis, C. L., Ayala, M. T., & Arzú, O. R. (2018). Presencia de indicadores microbiológicos en agua para consumo humano en San Cosme (Corrientes, Argentina). *Revista Veterinaria*, 29(1), 9. <https://doi.org/10.30972/vet.2912779>
- Ruiz, F. D. (2015). *Modelo y manual de operación para la prueba de tratabilidad de filtración* [Universidad Nacional Autónoma de México]. https://repositorio.unam.mx/contenidos?c=pQ8wXB&q=MODELO_.Y_.MANUAL_.DE_.OPERACIÓN_.PARA_.LA_.PRUEBA_.DE_.TRATABILIDAD_.DE_.FILTRACIÓN&t=search_0&as=0&d=false&a=-1&v=0
- Salcedo-pérez, E., Vázquez-alarcón, A., Krishnamurthy, L., Zamora-natera, F., Hernández-álvarez, E., & Rodríguez, R. (2007). Evaluación de lodos residuales como abono orgánico en suelos volcánicos de uso agrícola y forestal en Jalisco, México. *Interciencia*, 32(2), 115–120. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007000200009
- Salehi, M. (2022). Global water shortage and potable water safety; today's concern and tomorrow's crisis. *Environment International*, 158, 106936. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106936>
- Samboni, N. E., Carvajal, Y., & Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172–181. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092007000300019#:~:text=Los parámetros físico-químicos dan,del contaminante o los contaminantes
- Sánchez, L. D., & Quiroga, É. (2020). Sostenibilidad de las tecnologías de tratamiento de agua para la zona rural. *Revista de Ingeniería*, 49, 52–61. <https://doi.org/10.16924/revinge.49.7>

- Sánchez, V. (2020). La desalinizadora de agua de mar en Playas de Rosarito. Un proyecto estratégico frente a la dependencia del Río Colorado y la escasez de agua en Baja California. *Norteamérica*, 15(1), 149–172. <https://doi.org/10.22201/cisan.24487228e.2020.1.394>
- Sandoval, L., Motellano, L., Martín, A., Sánchez, L., Santana, M. de L., & Morán, M. (1999). Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización del agua. *Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua*, 10. http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/2300/OT_311.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Santos, D. (2016). *Oferta hídrica superficial del río Coata-Puno bajo escenarios de cambio climático* (p. 89). SENAMHI. <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/117>
- Solís, C. A., Vélez, C. A., & Ramírez-Navas, J. S. (2017). Tecnología de membranas: ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 22, 26–36. <http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v11n22/1909-8367-ecei-11-22-00026.pdf>
- Solis, M., Gil, J. ., Pérez, H. ., Manjarrez, N., & Perdomo, M. (2013). El proceso de sedimentación como una aplicación sencilla para reducir contaminantes en efluentes textiles. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3), 585–594. <https://www.redalyc.org/pdf/620/62029966020.pdf>
- Soto, R. L., Chumpitaz, O. M., Torres, E., Rojas, J., Llópiz, J. C., & Szegedi, S. (2015). Estudio de la quinua, *Chenopodium quinoa* Willd, como fertilizante natural alternativo, mediante métodos nucleares analíticos. *Revista de Investigación de Física*, 18(1), 1–7. <https://doi.org/10.15381/rif.v18i1.11576>
- Soukaina, N., Chaimaa, M., Kabriti, M., Abdelmotalib, N., Naamane, A., Mohamed, C., & Nadia, I. (2022). Treatment of surface treatment effluents by electrocoagulation process using aluminium electrodes. *Journal of Ecological Engineering*, 23(1), 91–99. <https://doi.org/10.12911/22998993/143974>
- Suss, M. E., Zhang, Y., Atlas, I., Gendel, Y., Ruck, E. B., & Presser, V. (2022). Emerging, hydrogen-driven electrochemical water purification. *Electrochemistry Communications*, 136, 107211. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2022.107211>
- Syaichurrozi, I., Sarto, S., Sediawan, W. B., & Hidayat, M. (2020). Mechanistic model of

- electrocoagulation process for treating vinasse waste: effect of initial pH. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103756. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103756>
- Tacuri, R. (2019). *Determinación de la calidad de agua de pozos artesianos y sus aspectos ambientales asociados, Juliaca, Puno, 2018* [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/8842/UPMtaror.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Taheri, M. (2022). Techno-economical aspects of electrocoagulation optimization in three acid azo dyes' removal comparison. *Cleaner Chemical Engineering*, 2, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100007>
- Tahreem, A., Jami, M. S., & Ali, F. (2020). Role of electrocoagulation in wastewater treatment: a developmental review. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101440. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101440>
- Tito, J. M., Quispe, R., Contreras, A. M., Casani, M. R., Huayhua, E., & Zegarra, J. (2020). Nivel de satisfacción del servicio de agua potable en la ciudad de Juliaca, el caso de la urbanización Jorge Chávez. *Ñawparisun - Revista de Investigación Científica*, 3(1), 97–102. <https://doi.org/10.47190/nric.v3i1.131>
- Uc, O., Vallejos, G., & Cortés, M. (2008). Estudio de la dinámica de sedimentación de lodos mediante un sistema óptico. *Ingeniería*, 12(2), 17–29. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46712202.pdf>
- Vargas, P., Arteaga, R., & Cruz, L. (2019). Análisis bibliográfico sobre el potencial nutricional de la quinua (*Chenopodium quinua*) como alimento funcional. *Revista Centro Azúcar*, 46(4), 89–100. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v46n4/2223-4861-caz-46-04-89.pdf>
- Vasquez, J. P., & Vargas, G. (2018). *Aprovechamiento de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Funza, como insumo de cultivo y mejoramiento del suelo* [Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/0b4e8d61-3b56-4245-b62b-160151992fad/content>
- Velandia, L., De Plaza, J. S., & Pulgarín, D. A. (2019). Análisis comparativo del componente

- administrativo y de los procesos de desinfección utilizados en dos plantas de tratamiento de agua potable. *INVENTUM*, 14(27), 78–88. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.14.27.2019.78-88>
- Veliz, E., Llanes, J. G., Fernández, L. A., & Bataller, M. (2016). Coagulación-floculación, filtración y ozonización de agua residual para reutilización en riego agrícola. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(1), 17–34. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000100017
- Villafuerte, M. S., & Romero, K. D. (2019). *Pruebas de tratabilidad para el tratamiento de los lodos de la planta potabilizadora convencional* [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/48901>
- Villena, J. A. (2018). Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2), 304–308. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>
- Vivanco, C. H. (2020). *Propuesta de diseño del Sistema de Ultrafiltración en el tratamiento de aguas residuales para el reúso del efluente en riego, en Apurímac 2020* [Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/25431>
- Vrsalović, L., Medvidović, N. V., Svilović, S., & Pavlinović, A. (2023). Taguchi method in the optimization of municipal wastewater treatment by electrocoagulation integrated with zeolite. *Energy Reports*, 9, 59–76. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.086>
- Woodard, & Curran. (2006). Waste characterization. In *Industrial Waste Treatment Handbook* (2nd ed., pp. 83–126). Butterworth-Heinemann. [https://doi.org/10.1016/S0713-2743\(06\)80087-5](https://doi.org/10.1016/S0713-2743(06)80087-5)
- Xu, H., Gao, Q., & Yuan, B. (2022). Analysis and identification of pollution sources of comprehensive river water quality: evidence from two river basins in China. *Ecological Indicators*, 135, 108561. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108561>
- Yadav, D., Karki, S., & Ingole, P. G. (2022). Current advances and opportunities in the development of nanofiltration (NF) membranes in the area of wastewater treatment, water desalination, biotechnological and pharmaceutical applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(4), 108109. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108109>

- Ye, C., Xian, X., Bao, R., Zhang, Y., Feng, M., Lin, W., & Yu, X. (2022). Recovery of microbiological quality of long-term stagnant tap water in university buildings during the COVID-19 pandemic. *Science of The Total Environment*, 806, 150616. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150616>
- Zafar, A. M., Naeem, A., Minhas, M. A., Hasan, M. J., Rafique, S., & Ikhtlaq, A. (2024). Removal of reactive dyes from textile industrial effluent using electrocoagulation in different parametric conditions of aluminum electrodes. *Total Environment Advances*, 9, 200087. <https://doi.org/10.1016/j.teadva.2023.200087>
- Zitácuaro, F. H., & Aparicio-Rentería, A. (2004). Variación de altura y diámetro de plántulas de *Pinus oaxacana* Mirov de tres poblaciones de México. *Foresta Veracruzana*, 6(1), 21–26. <https://www.redalyc.org/pdf/497/49760105.pdf>

ANEXOS

Anexo 1. Toma de muestras



Figura 33. Punto de monitoreo para la toma de muestras



Figura 34. Toma de muestras en los frascos rotulados para análisis en laboratorio

Anexo 2. Análisis de muestras en laboratorio



Figura 35. Análisis de la turbiedad

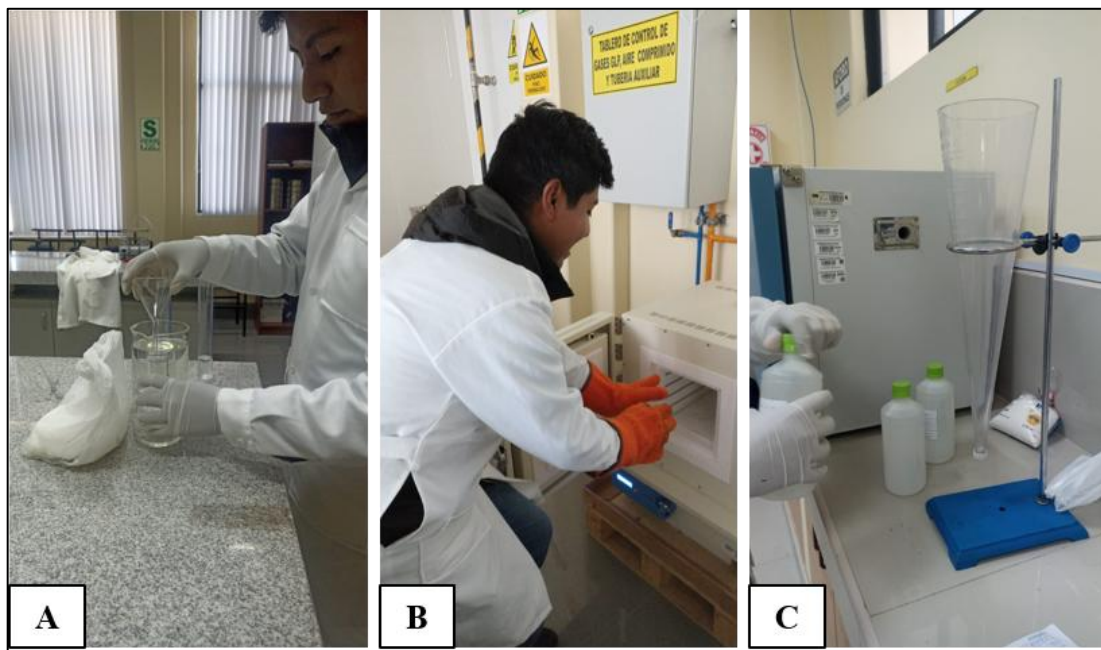


Figura 36. Determinación de sólidos A: Sólidos suspendidos B: Sólidos volátiles y fijos C: Sólidos sedimentables

Anexo 3. Proceso de electrocoagulación

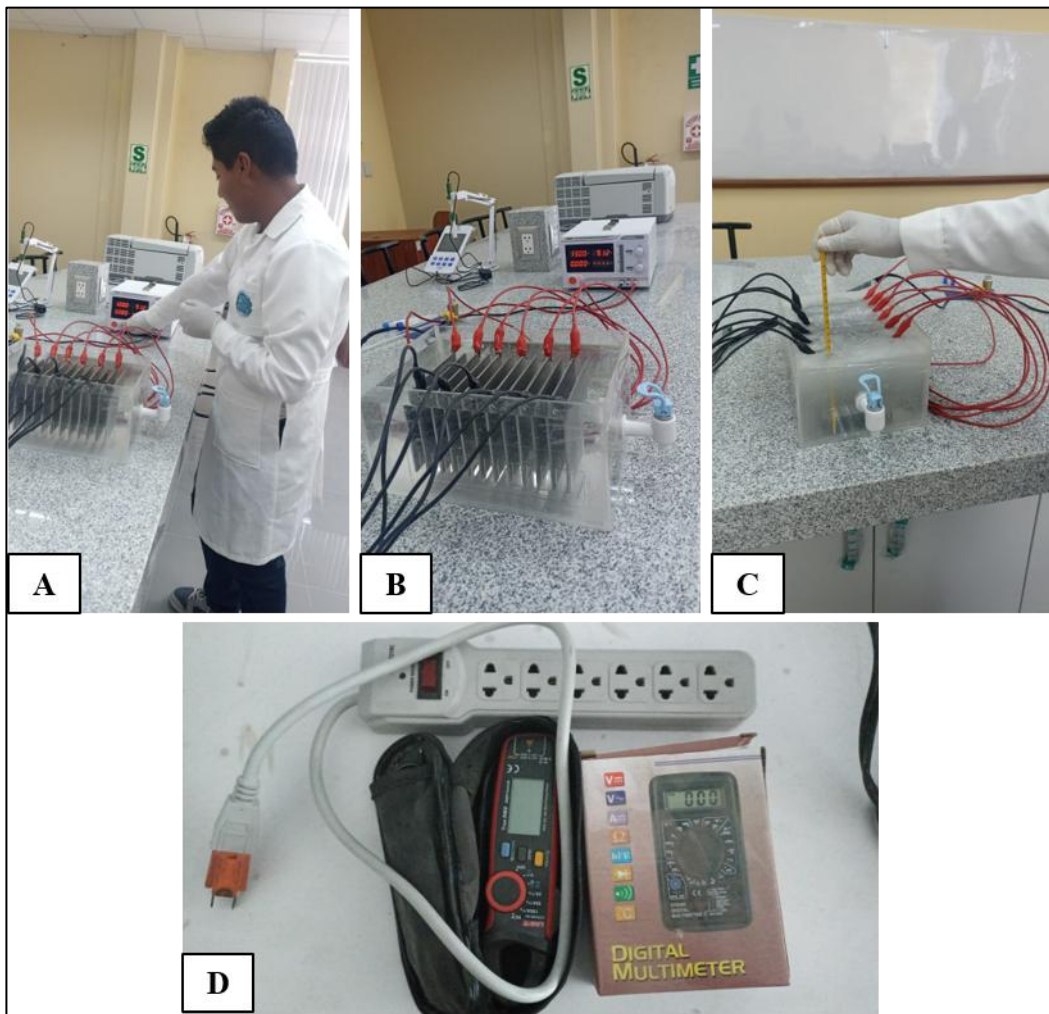


Figura 37. Experimentación del proceso de electrocoagulación A: Colocación de electrodos B: Funcionamiento del proceso C: Medición de la temperatura D: Pinza amperimétrica y multímetro para monitorear la intensidad de corriente

Anexo 4. Formación de lodos

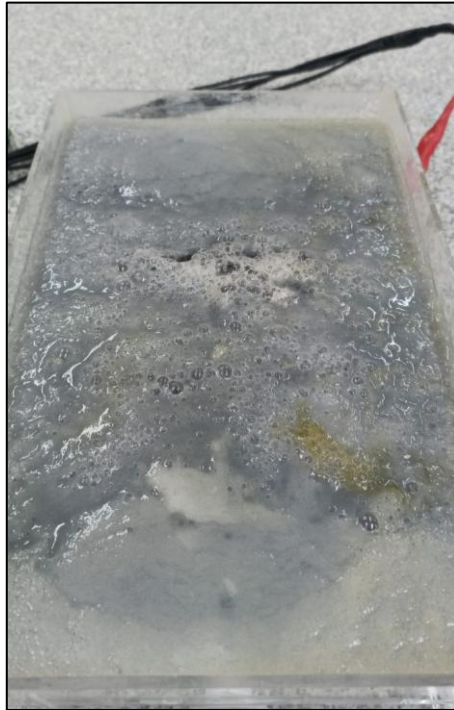


Figura 38. Flóculos aglomerados en la parte superficial

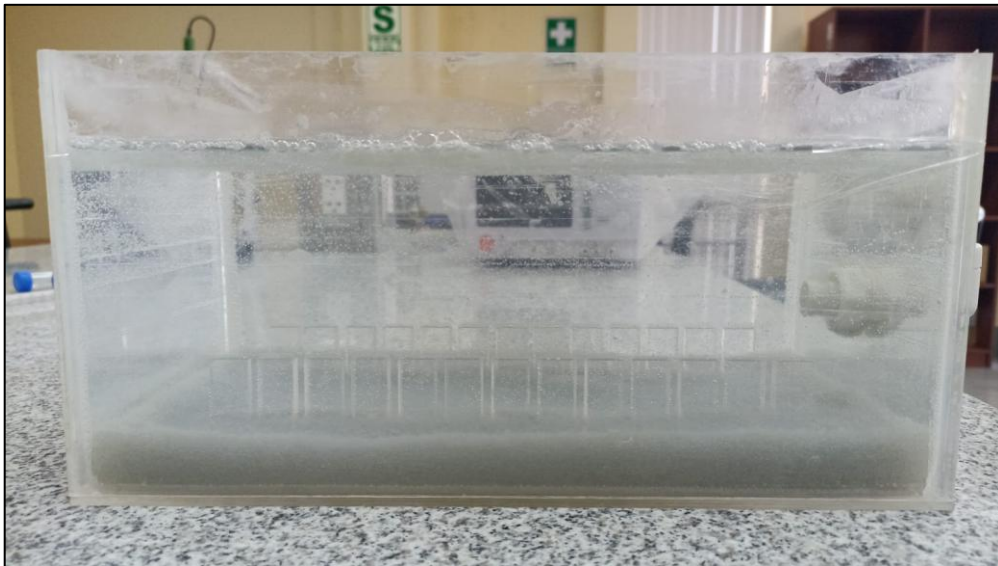


Figura 39. Lodos sedimentados

Anexo 5. Determinación de la DBO₅



Figura 40. Determinación de la DBO₅ de las muestras de agua después del proceso de electrocoagulación A: Muestras de agua B: Frascos Winkler C: Aireación del agua de dilución D: Adición de reactivos E: Frascos Winkler en incubadora a 5 días

Anexo 6. Fertilización de la quinua con los lodos generados del mejor tratamiento

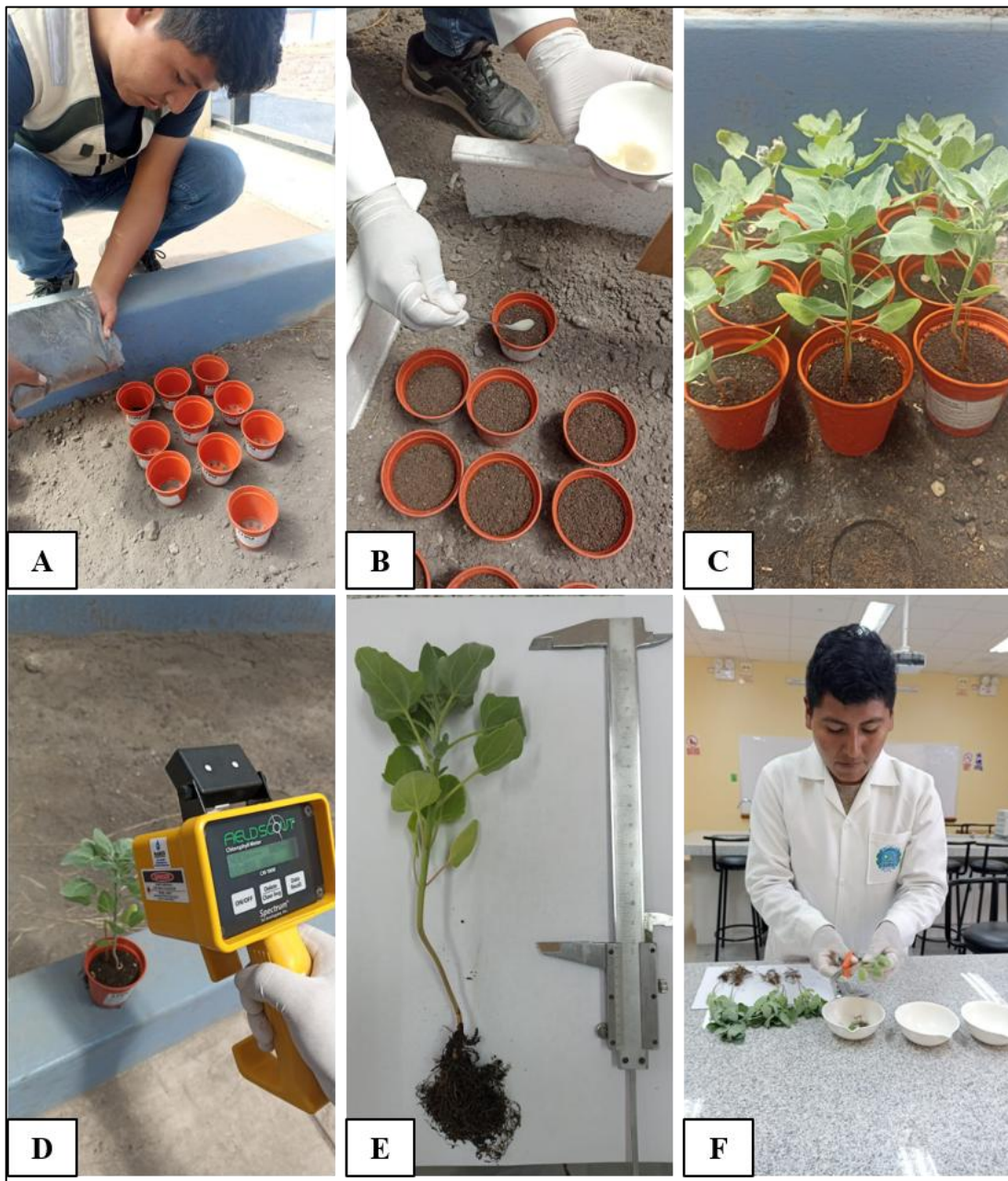
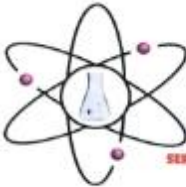


Figura 41. Evaluación de la fertilización con lodos A: Preparación del sustrato B: Adicionamiento de los lodos C: Plántulas en desarrollo D: Medición de clorofila E: Medición de parámetros morfológicos F: Medición de la materia seca

Anexo 7. Informe de laboratorio



RHLAB S.A.C.
SERVICIOS ANALÍTICOS QUÍMICO - METALÚRGICO

RH-M108-4268

INFORME DE ENSAYO

DATOS DEL CLIENTE	
A SOLICITUD DE	: Sr. LUIS MIGUEL TURPO CANAHUIRE
ASUNTO	: DETERMINACIÓN DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO) DETERMINACIÓN DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO)
PROCEDENCIA	: UNAJ-AYABACAS - SAN MIGUEL - SAN ROMAN - PUNO
CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE LA MUESTRA	
CANTIDAD DE MUESTRAS	: 02
RECEPCION DE MUESTRAS	: MUESTRAS DEBIDAMENTE REFRIGERADO Y CONSERVADO
FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO	: 14/08/2023 al 20/08/2023

RESULTADO DE ENSAYO


Estación de Muestreo		
Fecha de Muestreo	14/08/2023	
Tipo de Muestra	Muestra 11:00 a.m.	
Coordenadas UTM	E N	

Parámetro	Unidad	Resultados
Parámetros Orgánicos		
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	198.52
Demanda Química de Oxígeno	mg O ₂ /L	714.80

Los resultados obtenidos y que se consignan en el presente informe corresponden al ensayo solicitado en las muestras recibidas del cliente.

MÉTODOS DE REFERENCIA

* Demanda Bioquímica de oxígeno: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 22nd Ed.2012.Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test.
* Demanda Química de Oxígeno: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 22nd Ed.2012 Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method.



RHLAB S.A.C.
Ing. Edgar Huaymapata Loayza
GERENTE GENERAL
CIP: 187756

Figura 42. Informe de laboratorio del análisis de DBO₅ y DQO



LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO AMBIENTAL

INFORME DE RESULTADOS N°: LQ - 08223

I. DATOS DEL SERVICIO

Atención : Luis Miguel Turpo Canahuire

Motivo : TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO MEDIANTE LA ELECTROCOAGULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS LODOS GENERADOS COMO SUPLEMENTO PARA FERTILIZAR QUINUA

II. DATOS DEL ENSAYO

Producto : Lodo
Numero de muestras : 01
Fecha de ensayo : 04-06/09/2023
Muestreado por : El cliente
Ubicación, fecha y hora de muestreo:

Código	Dist./Prov./ Depart.	Ubicación	Fecha de muestreo	Hora de muestreo
LG - MT -01	Juliaca/San Román/Puno	E: 3895951 N: 382365	31/08/2023	8:00 a.m.

III. DATOS DEL RESULTADO

N°	PARAMETRO	UNIDAD	MÉTODO	M - 01
I	Aluminio	mg/kg	SM 3500 Al Absorción atómica	82.538

IV. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió

Juliaca, 08 de setiembre del 2023

LAQUAMEQ E.I.R.L.
LABORATORIO Y EQUIPOS
Karen Kelly Quispe Quispe
CIP. N°: 194084
GERENTE

Figura 43. Informe de laboratorio del análisis de contenido de aluminio de los lodos del mejor tratamiento

Anexo 8. Estándares de Calidad Ambiental para agua

Tabla 11

ECA para agua, en la categoría 1, subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable

Parámetros	Unidad de medida	A1	A2	A3
		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado
Físicos- químicos				
Conductividad	(μ S/cm)	1500	1600	**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	3	5	10
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	10	20	30
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 6	≥ 5	≥ 4
pH	Unidad de pH	6.5 – 8.5	5.5 – 9.0	5.5 – 9.0
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	1000	1000	1500
Temperatura	°C	$\Delta 3$	$\Delta 3$	**
Turbiedad	UNT	5	100	**

El símbolo ** significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría

Anexo 9. Diseño de experimentos

Tabla 12

Diseño factorial de 3 factores, con 3 niveles y 3 repeticiones

Repeticiones	a1									a2									a3								
	b1			b2			b3			b1			b2			b3			b1			b2			b3		
	c1	c2	c3	c1	c2	c3	c1	c2	c3	c1	c2	c3	c1	c2	c3	c1	c2	c3	c1	c2	c3	c1	c2	c3	c1	c2	c3
1ra repetición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
2da repetición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
3ra repetición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27

Siendo los valores de a1 = pH 6, a2 = pH 7 y a3 = pH 8; los valores de b1 = 20 A/m², b2 = 30 A/m² y b3 = 40 A/m², y los valores de c1 = 15 min, c2 = 25 min y c3 = 40 min respectivamente.

Anexo 10. Análisis estadístico

Tabla 13

Efectos principales y su análisis de varianza

Analysis of Variance Table					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
A	2	307	153	549.6	<2e-16 ***
B	2	4200	2100	7530.6	<2e-16 ***
C	2	64328	32164	115328.3	<2e-16 ***
A:B	4	453	113	405.8	<2e-16 ***
B:C	4	886	221	794.1	<2e-16 ***
A:C	4	1758	439	1575.8	<2e-16 ***
A:B:C	8	1021	128	457.7	<2e-16 ***
Residuals	54	15	0		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Tabla 14

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) a.b1 (efecto simple)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean	CV	MSD	
0.2788899	54	36.44556	1.449011	0.5999627	
\$parameters					
test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha	
Tukey	A	3	3.408232	0.05	
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
a1	36.49034	27.51644	9	7.808564	70.98237
a2	33.16541	35.09405	9	5.843829	80.35264
a3	39.68094	30.45654	9	4.030227	75.06297
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y	groups		
1	a3	30.49511	a		
2	a1	14.81856	b		
3	a2	12.94778	b		

Tabla 15

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) a.b2 (efecto simple)

\$statistics					
MSError	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	44.20935		1.194544	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	A	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
a1	40.65491	28.90841	9	10.226700	77.32997
a2	41.66247	31.25295	9	10.831234	81.86398
a3	50.31066	34.70438	9	4.785894	80.95718
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	a3	50.31066		a	
2	a2	41.66247		b	
3	a1	40.65491		c	

Tabla 16

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) a.b3 (efecto simple)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	54.04422		0.9771632	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	A	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
a1	53.01427	30.23288	9	17.32997	87.60705
a2	56.17128	29.57393	9	20.80605	89.87406
a3	52.94710	27.91299	9	18.53904	83.22418
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	a2	56.17128		a	
2	a1	53.01427		b	
3	a3	52.94710		b	

Tabla 17

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) a.c1 (efecto simple)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	11.48055		4.599957	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	A	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
a1	12.040302	4.226337	9	7.808564	17.48111
a2	13.031066	6.440092	9	5.843829	21.41058
a3	9.370277	7.150547	9	4.030227	19.29471
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	a2	13.031066		a	
2	a1	12.040302		b	
3	a3	9.370277		c	

Tabla 18

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) a.c2 (efecto simple)

\$statistics					
MSError	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	42.80437		1.233753	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	A	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
a1	34.39127	11.01750	9	30.62972	54.96222
a2	13.031066	19.54748	9	12.94710	58.58942
a3	54.08900	11.03657	9	39.84887	65.23929
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	a3	54.08900		a	
2	a1	39.93283		b	
3	a2	34.39127		c	

Tabla 19

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) a.c3 (efecto simple)

\$statistics					
MSError	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	80.41422		0.656725	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	A	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
a1	78.18640	7.250471	9	70.37783	87.60705
a2	83.57683	4.393282	9	79.44584	89.87406
a3	79.47943	3.777414	9	74.00504	83.22418
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	a2	83.57683		a	
2	a3	79.47943		b	
3	a1	78.18640		c	

Tabla 20

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) b.a1 (efecto simple)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	43.38651		1.217199	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	B	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
b1	36.49034	27.51644	9	7.808564	70.98237
b2	40.65491	28.90841	9	10.226700	89.87406
b3	53.01427	30.23288	9	17.329975	77.32997
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	b3	53.01427		a	
2	b2	40.65491		b	
3	b1	36.49034		c	

Tabla 21

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) b.a2 (efecto simple)

\$statistics					
MSError	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	43.66639		1.209398	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	B	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
b1	33.16541	35.09405	9	5.843829	80.35264
b2	41.66247	31.25295	9	10.831234	81.86398
b3	56.17128	29.57393	9	20.806045	89.87406
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	b3	56.17128		a	
2	b2	41.66247		b	
3	b1	33.16541		c	

Tabla 22

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) b.a3 (efecto simple)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	47.64624		1.108378	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	B	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
b1	39.68094	30.45654	9	4.030227	75.06297
b2	50.31066	34.70438	9	4.785894	80.95718
b3	52.94710	27.91299	9	18.539043	83.22418
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	b3	52.94710		a	
2	b2	50.31066		b	
3	b1	39.68094		c	

Tabla 23

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) b.c1 (efecto simple)

\$statistics					
MSError	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	11.48055		4.599957	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	B	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
b1	6.263644	1.648287	9	4.030227	8.110831
b2	9.034425	3.126167	9	4.785894	12.342569
b3	19.143577	1.622487	9	17.329975	21.410579
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	b3	19.143577		a	
2	b2	9.034425		b	
3	b1	6.263644		c	

Tabla 24

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) b.c2 (efecto simple)

\$statistics					
MSError	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	42.80437		1.233753	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	B	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
b1	28.02687	11.87523	9	12.94710	40.45340
b2	43.89589	15.99639	9	31.68766	65.23929
b3	56.49034	1.68031	9	53.90428	58.58942
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	b3	56.49034		a	
2	b2	43.89589		b	
3	b1	28.02687		c	

Tabla 25

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) b.c3 (efecto simple)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	80.41422		0.656725	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	B	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
b1	75.04618	3.960191	9	70.37783	80.35264
b2	79.69773	2.381252	9	75.51637	81.86398
b3	86.49874	2.821384	9	82.77078	89.87406
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	b3	86.49874		a	
2	b2	79.69773		b	
3	b1	75.04618		c	

Tabla 26

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) c.a1 (efecto simple)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	43.38651		1.217199	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	C	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
c1	12.04030	4.226337	9	7.808564	17.48111
c2	39.93283	11.017495	9	30.629723	54.96222
c3	78.18640	7.250471	9	70.377834	87.60705
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	c3	78.18640		a	
2	c2	39.93283		b	
3	c1	12.04030		c	

Tabla 27

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) c.a2 (efecto simple)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	43.66639		1.209398	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	C	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
c1	13.03107	6.440092	9	5.843829	21.41058
c2	34.39127	19.547476	9	12.947103	58.58942
c3	83.57683	4.393282	9	79.445844	89.87406
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	c3	83.57683		a	
2	c2	34.39127		b	
3	c1	13.03107		c	

Tabla 28

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) c.a3 (efecto simple)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	47.64624		1.108378	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	C	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
c1	9.370277	7.150547	9	4.030227	19.29471
c2	54.089001	11.036569	9	39.848866	65.23929
c3	79.479429	3.777414	9	74.005038	83.22418
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	c3	79.479429		a	
2	c2	54.089001		b	
3	c1	9.370277		c	

Tabla 29

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) c.b1 (efecto simple)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	36.44556		1.449011	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	C	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
c1	6.263644	1.648287	9	4.030227	8.110831
c2	28.026868	11.875232	9	12.947103	40.453401
c3	75.046180	3.960191	9	70.377834	80.352645
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	c3	75.046180		a	
2	c2	28.026868		b	
3	c1	6.263644		c	

Tabla 30

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) c.b2 (efecto simple)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	44.20935		1.194544	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	C	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
c1	9.034425	3.126167	9	4.785894	12.34257
c2	43.895886	15.996390	9	31.687657	65.23929
c3	79.697733	2.381252	9	75.516373	81.86398
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	c3	79.697733		a	
2	c2	43.895886		b	
3	c1	9.034425		c	

Tabla 31

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) c.b3 (efecto simple)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	54.04422		0.9771632	0.5999627
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	C	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
c1	19.14358	1.622487	9	17.32997	21.41058
c2	56.49034	1.680310	9	53.90428	58.58942
c3	86.49874	2.821384	9	82.77078	89.87406
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	c3	86.49874		a	
2	c2	56.49034		b	
3	c1	19.14358		c	

Tabla 32

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) A (efecto principal)

\$statistics					
MSError	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	44.89971		1.176177	0.3463886
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	A	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
a1	43.38651	28.67888	27	7.808564	87.60705
a2	43.66639	32.28454	27	5.843829	89.87406
a3	47.64624	30.49390	27	4.030227	83.22418
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	a3	47.64624		a	
2	a2	43.66639		b	
3	a1	43.38651		b	

Tabla 33

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) B (efecto principal)

\$statistics					
MSError	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	44.89971		1.176177	0.3463886
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	B	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
b1	36.44556	30.07800	27	4.030227	80.35264
b2	44.20935	30.78574	27	4.785894	81.86398
b3	54.04422	28.15024	27	17.329975	89.87406
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	b3	54.04422		a	
2	b2	44.20935		b	
3	b1	36.44556		c	

Tabla 34

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) C (efecto principal)

\$statistics					
MSError	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	44.89971		1.176177	0.3463886
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	C	3		3.408232	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
c1	11.48055	6.039207	27	4.030227	21.41058
c2	42.80437	16.242962	27	12.947103	65.23929
c3	80.41422	5.655715	27	70.377834	89.87406
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	c3	80.41422		a	
2	c2	42.80437		b	
3	c1	11.48055		c	

Tabla 35

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) A:B (efecto principal)

\$statistics					
MSError	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	44.89971		1.176177	0.8042911
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	A:B	9		4.568968	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
a1:b1	36.49034	27.51644	9	7.808564	70.98237
a1:b2	40.65491	28.90841	9	10.226700	77.32997
a1:b3	53.01427	30.23288	9	17.329975	87.60705
a2:b1	33.16541	35.09405	9	5.843829	80.35264
a2:b2	41.66247	31.25295	9	10.831234	81.86398
a2:b3	56.17128	29.57393	9	20.806045	89.87406
a3:b1	39.68094	30.45654	9	4.030227	75.06297
a3:b2	50.31066	34.70438	9	4.785894	80.95718
a3:b3	52.94710	27.91299	9	18.539043	83.22418
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	a2:b3	56.17128		a	
2	a1:b3	53.01427		b	
3	a3:b3	52.94710		b	
4	a3:b2	50.31066		c	
5	a2:b2	41.66247		d	
6	a1:b2	40.65491		e	
7	a3:b1	39.68094		f	
8	a1:b1	36.49034		g	
9	a2:b1	33.16541		h	

Tabla 36

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) B:C (efecto principal)

\$statistics					
MSError	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	44.89971		1.176177	0.8042911
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	B:C	9		4.568968	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
b1:c1	6.263644	1.648287	9	4.030227	89.874055
b1:c2	28.026868	11.875232	9	12.947103	58.589421
b1:c3	75.046180	3.960191	9	70.377834	21.410579
b2:c1	9.034425	3.126167	9	4.785894	81.863980
b2:c2	43.895886	15.996390	9	31.687657	65.239295
b2:c3	79.697733	2.381252	9	75.516373	81.863980
b3:c1	19.143577	1.622487	9	17.329975	21.410579
b3:c2	56.490344	1.680310	9	53.904282	58.589421
b3:c3	86.498741	2.821384	9	82.770781	89.874055
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	b3:c3	86.498741		a	
2	b2:c3	79.697733		b	
3	b1:c3	75.046180		c	
4	b3:c2	56.490344		d	
5	b2:c2	43.895886		e	
6	b1:c2	28.026868		f	
7	b3:c1	19.143577		g	
8	b2:c1	9.034425		h	
9	b1:c1	6.263644		i	

Tabla 37

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) A:C (efecto principal)

\$statistics					
MSError	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	44.89971		1.176177	0.8042911
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	A:C	9		4.568968	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
a1:c1	12.040302	4.226337	9	7.808564	17.48111
a1:c2	39.932830	11.017495	9	30.629723	54.96222
a1:c3	78.186398	7.250471	9	70.377834	87.60705
a2:c1	13.031066	6.440092	9	5.843829	21.41058
a2:c2	34.391268	19.547476	9	12.947103	58.58942
a2:c3	83.576826	4.393282	9	79.445844	89.87406
a3:c1	9.370277	7.150547	9	4.030227	19.29471
a3:c2	54.089001	11.036569	9	39.848866	65.23929
a3:c3	79.479429	3.777414	9	74.005038	83.22418
\$comparison					
NULL					
\$groups					
	T	Y		groups	
1	a2:c3	83.576826		a	
2	a3:c3	79.479429		b	
3	a1:c3	78.186398		c	
4	a3:c2	54.089001		d	
5	a1:c2	39.93283		e	
6	a2:c2	34.391268		f	
7	a2:c1	13.031066		g	
8	a1:c1	12.040302		h	
9	a3:c1	9.370277		i	

Tabla 38

Análisis estadístico Tukey ($\alpha = 0.05$) A:B:C (efecto principal)

\$statistics					
MSerror	Df	Mean		CV	MSD
0.2788899	54	44.89971		1.176177	1.680529
\$parameters					
test	name.t	ntr		StudentizedRange	alpha
Tukey	A:B:C	27		5.511759	0.05
\$means					
	Y	std	R	Min	Max
a1:b1:c1	7.959698	0.1511335	3	7.808564	8.110831
a1:b1:c2	30.780856	0.1511335	3	30.629723	30.93199
a1:b1:c3	70.730479	0.31460947	3	70.377834	70.982368
a1:b2:c1	10.730479	0.53076341	3	10.2267	11.284635
a1:b2:c2	34.609572	1.67160302	3	33.047859	36.372796
a1:b2:c3	76.624685	0.97165247	3	75.516373	77.329975
a1:b3:c1	17.43073	0.08725697	3	17.329975	17.481108
a1:b3:c2	54.40806	0.53076341	3	53.904282	54.962217
a1:b3:c3	87.20403	0.46172047	3	86.700252	87.607053
a2:b1:c1	6.549118	0.6814987	3	5.843829	7.20403
a2:b1:c2	13.148615	0.23086024	3	12.947103	13.400504
a2:b1:c3	79.798489	0.48582623	3	79.445844	80.352645
a2:b2:c1	11.435768	0.79972332	3	10.831234	12.342569
a2:b2:c2	31.939547	0.23086024	3	31.687657	32.141058
a2:b2:c3	81.612091	0.23086024	3	81.410579	81.86398
a2:b3:c1	21.108312	0.302267	3	20.806045	21.410579
a2:b3:c2	58.085642	0.53076341	3	57.531486	58.589421
a2:b3:c3	89.319899	0.48582623	3	88.967254	89.874055
a3:b1:c1	4.282116	0.23086024	3	4.030227	4.483627
a3:b1:c2	40.151134	0.302267	3	39.848866	40.453401
a3:b1:c3	74.609572	0.54491959	3	74.005038	75.062972
a3:b2:c1	4.937028	0.1511335	3	4.785894	5.088161
a3:b2:c2	65.138539	0.17451394	3	64.937028	65.239295
a3:b2:c3	80.856423	0.08725697	3	80.806045	80.957179
a3:b3:c1	18.891688	0.3803443	3	18.539043	19.29471
a3:b3:c2	56.97733	0.23086024	3	56.775819	57.229219
a3:b3:c3	82.972292	0.23086024	3	82.770781	83.224181

Tabla 38 (Continuación)

\$comparison			
NULL			
\$groups			
	T	Y	groups
1	a2:b3:c3	89.319899	a
2	a1:b3:c3	87.20403	b
3	a3:b3:c3	82.972292	c
4	a2:b2:c3	81.612091	cd
5	a3:b2:c3	80.856423	de
6	a2:b1:c3	79.798489	e
7	a1:b2:c3	76.624685	f
8	a3:b1:c3	74.609572	g
9	a1:b1:c3	70.730479	h
10	a3:b2:c2	65.138539	i
11	a2:b3:c2	58.085642	j
12	a3:b3:c2	56.97733	j
13	a1:b3:c2	54.40806	k
14	a3:b1:c2	40.151134	l
15	a1:b2:c2	34.609572	m
16	a2:b2:c2	31.939547	n
17	a1:b1:c2	30.780856	n
18	a2:b3:c1	21.108312	o
19	a3:b3:c1	18.891688	p
20	a1:b3:c1	17.43073	p
21	a2:b1:c2	13.148615	q
22	a2:b2:c1	11.435768	r
23	a1:b2:c1	10.730479	r
24	a1:b1:c1	7.959698	s
25	a2:b1:c1	6.549118	st
26	a3:b2:c1	4.937028	tu
27	a3:b1:c1	4.282116	u



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

UNW