

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL CAMAL CONCHUCOS
MEDIANTE COAGULACION QUIMICA SEGUIDO DE
ELECTROCOAGULACION”**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO
QUIMICO**

LESLY EMPERATRIZ ARAUJO VILLANUEVA

LESLY JOHANA CAMPOS FLORES

MIGUEL ANGEL CHAVARRIA CALDAS

Callao, 2021

PERU.

Handwritten signature of Lesly Emperatriz Araujo Villanueva.

Handwritten signature of Lesly Johana Campos Flores.

Handwritten signature of Miguel Angel Chavarria Caldas.

Handwritten signature of Lesly Emperatriz Araujo Villanueva.

PRÓLOGO DEL JURADO

La presente tesis fue Sustentada por los Bachilleres **MIGUEL ANGEL CHAVARRIA CALDA, LESLY EMPERATRIZ ARAUJO VILLANUEVA Y LESLY JOHANA CAMPOS FLORES** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

Ing. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA	Presidente
Ing. SONIA ELIZABETH HERRERA SANCHEZ	Secretaria
Ing. CESAR GUTIERREZ CUBA	Vocal
Ing. LUIS AMÉRICO CARRASCO VENEGAS	Asesor

Tal como está asentado en el Libro 02 de Tesis Folio N° 141 y Acta N°322 de fecha 27 de Marzo de 2021 para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación de Tesis sin Ciclo de Tesis de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 245-2018- CU de fecha 30 de octubre de 2018.

DEDICATORIA

A mis padres y mi hermano que siempre me apoyaron en mi carrera profesional y a Dios por estar conmigo en cada momento de mi vida para darme ánimos e inspirarme para seguir en el camino de la superación.

Lesly Johana Campos Flores

A Dios, por haberme dado la vida y permitirme por haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional, a mis padres por ser los pilares más importantes y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional.

Lesly Emperatriz Araujo Villanueva

A mis padres, por el apoyo incondicional que me brindaron a lo largo de toda mi carrera profesional, a mi hermano por alentarme en cumplir mis sueños y a Dios por haberme dado la sabiduría y paciencia para que fuera posible alcanzar esta meta

Miguel Angel Chavarría Caldas

AGRADECIMIENTO

A nuestra casa de estudio la Universidad Nacional del Callao por habernos permitido formarnos profesionalmente y a nuestros profesores de la carrera, por todos los conocimientos compartidos.

A nuestro asesor de tesis y Decano de la facultad de Ingeniería Química, Ing. Luis Américo Carrasco Venegas por la orientación y colaboración brindada durante la elaboración de la tesis.

A nuestro presidente de tesis, Ing. Juan Medina Collana, por el apoyo y los recursos brindados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias

Al ingeniero Francisco Canales, jefe de planta del Camal Conchucos

A la licenciada Roxana Valenzuela jefa del laboratorio químico Servicios Analíticos Generales (S.A.C)

A todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de este proyecto.

INDICE

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCION.....	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION.....	11
1.1. Determinación del problema.....	11
1.2. Formulación del problema.....	13
1.2.1 Problema general.....	13
1.2.2 Problemas específicos.....	13
1.3. Objetivos de la investigación	13
1.3.1 Objetivo general	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
1.4 Limitantes de la investigación	14
II. MARCO TEORICO	15
2.1. Antecedentes	15
2.2. Marco Teórico	19
2.3 Marco Conceptual	23
2.3.1. Agua residual	23
2.3.2. Componentes del agua residual del camal	24
2.3.3. Coagulación química	30
2.3.4. Electrocoagulación	34
2.3.5. Mecanismo y Reacciones en la electrocoagulación.	36
2.3.6. Factores que afectan la electrocoagulación.....	39
2.3.7. Reactores para procesos de electrocoagulación.....	42
2.3.8. Aplicaciones de la electrocoagulación	47
2.3.9. Marco legal de los límites permisibles del agua residual de un camal.....	49
2.4. Definiciones de términos básicos.....	51

III. HIPOTESIS Y VARIABLES	53
3.1. Hipótesis	53
3.1.1. Hipótesis General.....	53
3.1.2. Hipótesis específicas	53
3.2. Definición conceptual de variables.....	54
3.3. Operacionalización de las variables.....	55
IV. DISEÑO METODOLOGICO	56
4.1. Tipo y diseño de investigación.....	56
4.2. Método de investigación	58
4.3. Población y muestra	62
4.4. Lugar del estudio.....	62
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	63
4.6. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información de campo.....	89
4.7. Análisis y procedimiento de datos	93
V. RESULTADOS	94
5.1 Características fisicoquímicas del agua residual del afluente	94
5.2 Resultados del Test de Jarras.....	94
5.3 Resultado de la Curva de Sedimentación	101
5.4 Resultado de la Electrocoagulación	103
5.5. Resultados del análisis estadístico de las pruebas experimentales.....	109
5.6. Resultados de los valores para los parámetros óptimos encontrados.....	119
5.7. Calculo del diseño del electrocoagulador.....	119
VI. DISCUSION DE RESULTADOS.....	121
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	121
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	122
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	123
VII. CONCLUSIONES.....	124
VIII. RECOMENDACIONES	126
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	127
ANEXOS	130

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condición general del Agua Residual...	25
Tabla 2. Escala de clasificación de la calidad del Agua: DBO ₅	27
Tabla 3. Comparación de DBO/DQO	29
Tabla 4. Valores Máximos Admisibles(VMA) para la descarga de Aguas Residuales no Domesticas en el sistema de Alcantarillado Sanitario.....	50
Tabla 5. Operacionalización de variables.....	55
Tabla 6. Toma de muestra, preservación y tiempo de conservación para el análisis.....	91
Tabla 7. Caracterización del Agua residual... ..	94
Tabla 8. Curva de Calibración del análisis del DQO.....	95
Tabla 9. Resultado de prueba De Análisis de DQO después de la coagulación	96
Tabla 10. Resultado de prueba De Análisis de DBO ₅ después de la coagulación	97
Tabla 11. Resultado de prueba De Análisis de TSS después de la coagulación	98
Tabla 12. Resultado del análisis de Turbiedad después de la coagulación.....	99
Tabla 13. Resumen de los resultados de análisis en la prueba de Test de Jarras.....	99
Tabla 14. Concentración vs Porcentaje de remoción de contaminantes... ..	100
Tabla 15. Resultado de la altura de sedimento de cada concentración vs tiempo.....	102
Tabla 16. Resultado de la prueba De Análisis de DQO después de la electrocoagulación.....	103
Tabla 17. Resultado de prueba De Análisis de DBO ₅ después de la electrocoagulación.....	104
Tabla 18. Resultado de prueba De Análisis de TSS después de la electrocoagulación.....	105
Tabla 19. Resumen del resultado de los análisis después de la Electrocoagulación	106
Tabla 20. Voltaje vs Porcentaje de remoción de contaminantes de diferentes Concentraciones.....	107

Tabla 21. Análisis de Varianza en el %DQO.....	109
Tabla 22. Resumen del Modelo en el %DQO.....	110
Tabla 23. Coeficientes en el %DQO.....	111
Tabla 24. Parámetros Experimentales en el %DQO.....	111
Tabla 25. Análisis de Varianza en el %DBO.....	113
Tabla 26. Resumen del Modelo en el %DBO.....	114
Tabla 27. Coeficientes en el %DBO.....	114
Tabla 28. Parámetros Experimentales en el %DBO.....	115
Tabla 29. Análisis de Varianza en el %TSS.....	116
Tabla 30. Resumen del Modelo en el %TSS.....	117
Tabla 31. Coeficientes en el %TSS.....	117
Tabla 32. Parámetros Experimentales en el %TSS.....	118
Tabla 33. Condiciones óptimas de los parámetros operacionales.....	119

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fuerza de interacción sobre una partícula en suspensión.....	32
Figura 2. Mecanismos de coagulación de partículas coloidales	33
Figura 3. Sistemas de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro	35
Figura 4. Unidades de Electrocoagulación de flujos horizontal y vertical.....	43
Figura 5. Unidades de electrocoagulación con disposición de canales múltiples y de canal único	44
Figura 6. Reactores para procesos de electrocoagulación.....	46
Figura 7. Diseño de la investigación	56
Figura 8. Diagrama de tratamiento por coagulación química	59
Figura 9. Diagrama del tratamiento por electrocoagulación	60
Figura 10. Toma de muestra.....	63
Figura 11. Traslado de muestra al laboratorio.....	64
Figura 12. Incubadora.....	64
Figura 13. Oxímetro.....	65
Figura 14. Termoreactor.....	68
Figura 15. Espectrofotómetro UV-Visible	69
Figura 16. Equipo de filtración	72
Figura 17. Estufa	73
Figura 18. Filtración de la muestra.....	74
Figura 19. Secado de filtros en mufla.....	75
Figura 20. Pesado de filtros	75
Figura 21. Medición de pH de muestra	77
Figura 22. Medición de la turbiedad	78
Figura 23. Coagulante policloruro de aluminio (PAC).....	79
Figura 24. Mezclado rápido a 180 rpm.....	80
Figura 25. Mezclado lento a 100 rpm.....	81
Figura 26. Sedimentación de las muestras.....	81
Figura 27. Sedimentación secundaria al inicio	82
Figura 28. Sedimentación secundaria al final.....	82
Figura 29. Adición de coagulante.....	83
Figura 30. Muestra en sedimentación	84
Figura 31. Decantación de la muestra	84
Figura 32. Electrocoagulación al inicio.....	85
Figura 33. Electrocoagulación al final.....	85

Figura 34. Extracción de muestras para análisis	86
Figura 35. Muestras para análisis	86
Figura 36. Tanque de agitación	87
Figura 37. Reactor con electrodo de acero.....	88
Figura 38. Fuente de poder.....	89
Figura 39. Punto de muestreo.....	90
Figura 40. Curva de Calibración del análisis del DQO	95
Figura 41. Curva de Concentración vs Turbiedad.....	100
Figura 42. Efecto de la dosis de coagulante en la remoción de Contaminantes	101
Figura 43. Curva de sedimentación a diferentes dosis de coagulantes...102	
Figura 44. Voltaje vs Porcentaje de remoción de contaminantes de C1 (130,7 mg/L).....	108
Figura 45. Voltaje vs Porcentaje de remoción de contaminantes de C2(261,4 mg/L).....	108
Figura 46. Voltaje vs Porcentaje de remoción de contaminantes de C3(392,1 mg/L)	109
Figura 47. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados en %DQO...110	
Figura 48. Grafica de contorno del % Remoción DQO.....112	
Figura 49. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados en %DBO...113	
Figura 50. Grafica de contorno del % Remoción DBO.....115	
Figura 51. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados en %TSS....116	
Figura 52. Grafica de contorno del % Remoción TSS.....118	

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad desarrollar un proceso de tratamiento combinado del agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química con polímero de aluminio(PAC), seguido de un proceso de electrocoagulación en un reactor electroquímico de acrílico con 6 electrodos de acero inoxidable de 10 x 10 cm de dimensión y distancia de 1 cm entre electrodos, se realizó 9 corridas experimentales en donde se determinó los parámetros óptimos: concentración de coagulante 261,4 ppm, tiempo de agitación 25 minutos, en la coagulación química; caída de tensión 12 Voltios y tiempo de reacción 30 minutos en la electrocoagulación.

Inicialmente se caracterizó mediante análisis fisicoquímicos el efluente obteniendo como respuestas: DQO (8050 mg/L), DBO₅ (3565 mg/L) y TSS (1260 mg/L), y mediante el proceso de tratamiento combinado de coagulación y electrocoagulación química, se logró la eliminación de DQO, DBO₅ y TSS con porcentajes de remoción de 78.5% (296,3 mg/L), 79.04% (134,3 mg/L) y 51.31% (40,9 mg/L) respectivamente.

Cumpliendo así con la normativa vigente en el D.S. N°010-2019-VIVIENDA.

Palabras clave: Electrocoagulación, DQO, DBO₅, TSS

ABSTRACT

The purpose of this research work is to develop a process of combined treatment of the residual water of the Conchucos slaughterhouse through chemical coagulation with aluminum polymer (PAC), followed by an electrocoagulation process in an electrochemical acrylic reactor with 6 stainless steel electrodes. 10 x 10 cm in dimension and 1 cm distance between electrodes, it was done 9 experimental runs were performed where the optimal parameters were determined: coagulant concentration 261.4 ppm, stirring time 25 minutes, in chemical coagulation; voltage drop 12 Volts and reaction time 30 minutes in electrocoagulation.

Initially, the effluent was characterized by physicochemical analysis obtaining responses: COD (8050 mg / L), BOD₅ (3565 mg / L) and TSS (1260 mg / L), and through the combined treatment process of coagulation and chemical electrocoagulation, it was achieved the elimination of COD, BOD₅ and TSS with removal percentages of 78.5% (296.3 mg / L), 79.04% (134.3 mg / L) and 51.31% (40.9 mg / L) respectively.

Complying with current regulations in D.S. N°010-2019-HOUSING.

Keywords: electrocoagulation, COD, BOD₅, TSS

INTRODUCCION

Desde muchos años atrás el Perú es productor de carne porcina y en los últimos años se han creado en Lima algunos mataderos formales como lo indica las autorizaciones realizadas por Senasa bajo el decreto supremo N°015-2012-AG y otros informales que vierten sus aguas residuales directamente al alcantarillado sin un previo tratamiento que disminuya el impacto ambiental en la zona. El objetivo del tratamiento del agua residual de camal es de disminuir los parámetros ambientales en este caso DBO₅, DQO y solidos totales, así apoyar en disminuir el impacto ambiental en la zona y plantear un sistema de tratamiento barato y eficiente para las empresas que vierten estos efluentes.

El tratamiento de estos efluentes implica la caracterización del agua residual que ingresa al proceso y las condiciones óptimas de cada uno de los pasos del tratamiento; este proceso tiene que ser eficiente y trasladar los conceptos de electroquímica y ciencias relacionadas a los procesos de tratamiento de aguas, montajes y componentes operativos.

La compilación de numerosas investigaciones en el campo de la tecnología electroquímica ha integrado esta ciencia y han ayudado a la implementación de procesos electroquímicos para su aplicación a nivel industrial.

Esta implementación requiere la construcción de un tanque dosificador, un reactor electroquímico y un sedimentador, así obtener resultados que lo conviertan en un proceso aplicativo a los camales nacionales.

El presente trabajo se aboca en realizar pruebas de jarras para encontrar la dosificación optima en la coagulación del agua residual de camal para así disminuir el parámetro de sólidos totales, seguido de una electrocoagulación para disminuir el DBO₅ y DQO, luego un tanque sedimentador para separar por gravedad los flóculos formados. Este tratamiento de efluentes de camal el cual tiene amplios beneficios en el campo de la ingeniería química y ambiental, complementando una serie de investigaciones sobre el proceso de tratamiento del efluente de la industria en el Perú, asimismo la aplicación de este sistema hibrido coagulación – electrocoagulación significa un apoyo a estas empresas en el cumplimiento de normas ambientales nacionales e internacionales.

Se pretende demostrar que el proceso hibrido coagulación - electrocoagulación puede ser aplicado al tratamiento de efluentes de la industria agropecuaria, contribuyendo de esta manera con disminuir el impacto ambiental que genera estas empresas en el Perú. Además de esto se convierte en un diseño guía para el tratamiento en otros efluentes de esta industria.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Determinación del problema.

La contaminación es un factor de gran importancia dentro de la problemática mundial en torno al agua, ya que los contaminantes generados por la actividad industrial y doméstica pueden ser acumulados y transportados tanto por las aguas superficiales como por las subterráneas, deteriorando la calidad del recurso hídrico.

La industria de los mataderos es una actividad muy antigua y, a pesar de que todavía es un sector industrial de pequeña escala, su impacto ambiental ha aumentado, esta industria consta de varias etapas para obtener la carne fresca de los cerdos y requiere un gran consumo de agua. El agua residual contiene un alto nivel de materia orgánica, incluyendo sangre, grasa, pelo, así como detergentes, conservantes, etc., que presentan una alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno, fósforo, sólidos totales que deterioran el medio ambiente y amenazan la salud humana.

Por lo mencionado nos vemos en la necesidad de proponer una tecnología para tratamiento de las aguas residuales de camal para su vertimiento adecuado, cumpliendo las normas ambientales emitidas en el **DECRETO SUPREMO N°010-2019-VIVIENDA**

“Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para la descarga de Aguas Residuales No Domésticas en el Sistema de Alcantarillado Sanitario”; evitando la contaminación ambiental y del agua

Durante los últimos años, las investigaciones han revelado la electrocoagulación como un método atractivo y adecuado para el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales, debido a diversas ventajas, como la compatibilidad ambiental, la eficiencia energética, la seguridad, y la rentabilidad. Este proceso se caracteriza por un equipo simple, una operación fácil, un período de retención reactivo acortado, una reducción o ausencia de equipos para agregar productos químicos y una reducción de la cantidad de precipitados que sedimenta rápidamente. La electrocoagulación ha sido probado con éxito para tratar varias aguas residuales como; aguas residuales textiles, aguas residuales urbanas, aguas residuales petroquímicas, aguas residuales de restaurantes, entre otros.

Por esa razón se plantea la electrocoagulación como una alternativa tecnológica para el tratamiento de aguas residuales, haciendo énfasis en su aplicación para la remoción de materia orgánica, grasas y aceite.

1.2. Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo es el tratamiento del agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación?

1.2.2 Problemas específicos

- a. ¿Cuáles son las características físicas y químicas del agua residual del camal Conchucos al inicio del tratamiento?
- b. ¿Cuáles son las condiciones más favorables del tratamiento de agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación?
- c. ¿Cuáles son las características físicas y químicas del agua residual del camal Conchucos al final del tratamiento?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar el proceso de tratamiento del agua residual de camal mediante coagulación química seguido de electrocoagulación.

1.3.2 Objetivos específicos

- a. Identificar las características físicas y químicas del agua residual de camal al inicio del tratamiento.

- b. Determinar las condiciones más favorables del tratamiento de agua residual de camal mediante coagulación química seguido de electrocoagulación.
- c. Identificar las características físicas y químicas del agua residual de camal al final del tratamiento.

1.4 Limitantes de la investigación

a) Teórica

Se tiene poca información relacionado a tratamientos de aguas residuales de camal con electrocoagulación, debido a que es una tecnología muy poca estudiada a nivel nacional e internacional.

b) Espacial

La disponibilidad del laboratorio para realizar los análisis pertinentes de las corridas experimentales, escases de reactivos y equipos necesarios para el desarrollo de la electrocoagulación.

c) Temporal

En el traslado de las muestras del afluente al laboratorio, ya que hay ciertos parámetros perecibles y puede generar resultados erróneos en el análisis.

II. MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes

Existe una serie de trabajos relacionados al tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación, las cuales son:

- a) Aguilar, (2015) construye un reactor de electrocoagulación para evaluar la eficiencia en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) de aguas residuales provenientes de la industria de pintura; así como determinar las mejores condiciones de pH, conductividad, intensidad de corriente y tiempo de tratamiento. En base a los resultados obtenidos al realizar el tratamiento del efluente con electrocoagulación, se determinó una eficiencia promedio del 87 % en la remoción de la DQO. Estos valores óptimos de operación se obtuvieron con una intensidad de corriente $I = 5$ amperios, con el pH natural del efluente de 7,12 y un tiempo de tratamiento de 15 minutos, con lo cual se cumple la normativa ambiental vigente en el país. Otro aspecto importante observado en este estudio fue la calidad del lodo producido en el tratamiento, de aspecto mucho más compacto que un lodo físico químico o biológico.
- b) Tezcan y otros, (2008) realizó un estudio donde se centra principalmente en el tratamiento por electrocoagulación de aguas residuales de matadero de ganado para determinar los efectos del funcionamiento básico tomando los parámetros tales como densidad de corriente y dosis de electrolitos de soporte usando electrodos de hierro. El rendimiento del reactor electroquímico

cilíndrico fue evaluado en experimentos por lotes. Mientras que un polo de la fuente de alimentación era conectando al reactor como un ánodo, el otro se conectó a un agitador para operación como un cátodo. Los experimentos se llevaron a cabo introduciendo las aguas residuales de matadero en el reactor y aplicando una cierta cantidad de corriente al circuito. La eficiencia de eliminación de la DQO aumentó con la densidad de corriente. Las eficiencias de eliminación de 51.3%, 53.8%, 59.9% y 61.2% se obtuvieron para las densidades actuales de 5, 10, 15, 20 mA / cm² con el consumo de energía de 15, 48, 91 y 168 kWh / m³ respectivamente, sin embargo, aumentando la dosificación de Na₂SO₄, que se añadió como electrolito de soporte, de 0.1 a 0.2 M tiene un efecto adverso en la eliminación de DQO. Se puede concluir de este estudio que el tratamiento de aguas residuales de matadero se puede lograr mediante electrocoagulación.

- c) Bazrafshan y otros, (2012) realiza una investigación de la viabilidad del tratamiento de aguas residuales de matadero de ganado por combinación de sustancias químicas proceso de coagulación y electrocoagulación para alcanzar los estándares requeridos. Se evaluó la influencia de las variables de operación tales como dosis de coagulante, el potencial eléctrico y el tiempo de reacción en las eficiencias de eliminación de los principales contaminantes. La tasa de eliminación de contaminantes aumentó linealmente con dosis crecientes de Policloruro de Aluminio(PAC) y voltaje aplicado. La eliminación

del más del 99% del DQO y DBO₅ se obtuvo mediante la adición de 100 mg/L de Policloruro de Aluminio(PAC) y el voltaje aplicado 40 V. Los experimentos demostraron la efectividad de las técnicas químicas y electroquímicas para el tratamiento de aguas residuales de mataderos. En consecuencia, se deduce que los procesos combinados son superiores a la electrocoagulación sola para la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos del agua residual del matadero de ganado.

- d) Barboza, (2011) realizó una investigación que consistió en la aplicación del método de electrocoagulación con electrodos de sacrificio de aluminio para reducir la carga de contaminantes de las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Totorá” – Ayacucho. El trabajo de investigación comprendió dos etapas: (a) determinación de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas efluentes y receptoras de la PTAR – “La Totorá”, (b) aplicación de la técnica de electrocoagulación para el tratamiento de las aguas del efluente de la PTAR. La aplicación del método permitió la remoción de turbidez, sólidos totales, sólidos disueltos, alcalinidad, dureza total, coliformes fecales y materia orgánica expresada como disminución de DBO₅. La aplicación de 25 minutos de electrocoagulación a las muestras de agua, utilizando una densidad de corriente de 12,5 mA/cm² y 21 – 23 V, con pH de trabajo regulado a 7,33 - 7,34 permitió obtener 94,65% de remoción de turbidez, 65,1 % de remoción de coliformes fecales y 64,8 %

de disminución de DBO_5 , logrando mejorar la calidad del agua al reducir la turbidez y disminuir el valor de DBO_5 a $14,75 \text{ mgO}_2/\text{L}$, valor que se encuentra dentro de los límites permisibles según los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de categoría 3. El porcentaje de remoción de coliformes fecales puede aumentar hasta un valor de 93% para un tiempo de proceso de 45 minutos.

- e) Pantoja, (2014) presenta un trabajo que tiene como objetivo la reducción de concentración del Hierro en agua mediante la electrocoagulación, para ver tal efecto, se ha usado el método experimental, de 3 variables con 3 niveles de estudio, y el promedio de los resultados obtenidos en términos de reducción de concentración de hierro, han sido analizados estadísticamente utilizando el análisis de varianza.

Entonces de acuerdo a los resultados de la experimentación podemos concluir que a $\text{pH}=8$, y a densidades de corriente de 30 A/m^2 , en un tiempo de 4 min se obtuvo un descenso de concentración desde 16 ppm de Fe, hasta 1.81 ppm de Fe, lo que indica una reducción 88% para el hierro total. En relación a la concentración de aluminio observamos que el aluminio, incrementa su concentración desde 0 ppm de "Al" hasta 4,76 ppm a los 4 minutos.

2.2. Marco Teórico

a) Análisis de DBO

Uno de los ensayos más importantes para determinar la concentración de la materia orgánica de aguas residuales es el ensayo de DBO a cinco días. Esencialmente, la DBO es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas, en un periodo de cinco días a 20 °C. (SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 22nd Ed. 2012. Biochemical Oxygen Demand(BOD). 5-Day BOD Test.)

$$DBO_5, mg/L = \frac{(D1 - D2) - (S)V_s}{P}$$

Donde:

D1 =OD de muestra diluida inmediatamente después de la preparación, mg/L

D2 =OD de muestra diluida después de 5 días de incubación a 20 °C, mg/L

S= Consumo de oxígeno de la semilla, Δ OD/mL suspensión de semilla agregada por botella(S=0 si las muestras no se siembran)

V_s = Volumen de semilla en la botella de prueba respectiva, mL

P = Fracción volumétrica de la muestra utilizada; 1/P = factor de dilución

b) Análisis de DQO

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo.

Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujo cerrado en solución fuertemente ácida (H_2SO_4) con un exceso de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en presencia de sulfato de plata (Ag_2SO_4) que actúa como agente catalizador, y de sulfato mercurico (HgSO_4) adicionado para eliminar la interferencia de los cloruros. Esto da como resultado el cambio de cromo del estado hexavalente (VI) al estado trivalente (III). Ambas especies de cromo son de color y absorben en la región visible del espectro. (SMEWW- APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 22nd Ed. 2012.

Chemical Oxygen Demand(COD). Closed Reflux, Colorimetric Method)

$$DQO_{(mg/L)} = \frac{mg \ DQO}{L} * fd$$

(Obtenido directamente desde la curva de calibración)

Donde:

fd = factor de dilucion

c) Análisis de TSS

La determinación de los sólidos suspendidos totales se basa en el incremento de peso que experimenta un filtro de fibra de vidrio tras la filtración al vacío, de una muestra que posteriormente es secada a peso constante a 103-105°C. El aumento de peso del filtro representa los sólidos totales en suspensión.

$$\left(\frac{mg}{L}\right)_{SST} = \frac{(B - A)}{V_m} \times 1000$$

Donde:

A: peso del filtro seco antes de la filtración (mg)

B: peso del filtro + residuo seco (mg)

V_m: volumen de muestra (mL)

d) Análisis de Turbiedad

Este método se basa en la comparación entre la intensidad de la luz dispersada por la muestra bajo condiciones definidas y la intensidad de luz dispersada por una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones; a mayor dispersión de luz corresponde una mayor turbiedad. Las lecturas son realizadas empleando un turbidímetro calibrado con una suspensión de referencia de formacina preparada bajo condiciones específicas

$$Turbidez, NTU = \frac{A \times B}{T}$$

A: NTU de la muestra diluida

V: volumen del matraz de dilución, mL

T: volumen de muestra tomado para diluir, mL

e) Determinación de las dimensiones del electrocoagulador

A continuación, se detalla los cálculos de las dimensiones del electrocoagulador. (Sillanpaa, 2017)

- ✓ El largo del sistema de electrodos (b_{st})

$$b_{st} = N_{EC} \delta + (N_{EC} - 1)l$$

N_{EC} = Numero de plato de electrodos

δ = Espesor de electrodo

l = Distancia entre electrodos

- ✓ El volumen del electrocoagulador (V_r, m^3)

$$V_{r,EC} = Q \tau_{EC}$$

τ_{EC} = Tiempo de residencia del agua residual en el reactor(h)

Q = Caudal del agua residual (m^3/h)

- ✓ El largo del reactor (B)

$$B = b_{st} + 2b^l$$

b^l = Espacio entre el sistema de electrodo y la pared del reactor

- ✓ El ancho del reactor (L)

$$L = b + 2b^l$$

b = Ancho del plato

- ✓ Area ocupada por el reactor (A, m^2)

$$A = B \times L$$

2.3 Marco Conceptual

2.3.1. Agua residual

Las aguas residuales provienen de su utilización en las diversas actividades domésticas e industriales del ser humano. Si son de origen domestico presentan características diferenciadas con las aguas residuales provenientes de la actividad industrial, aunque en algunas ocasiones puntuales pueden ser semejantes. Esto ocasiona un problema ambiental, por lo cual es necesario tratarlas con diversos procesos para evitar la contaminación de los cuerpos de agua. Así, de acuerdo con su origen, las aguas residuales pueden ser clasificadas como: (Aguilar, 2015)

A. Aguas residuales domésticas:

Las aguas residuales domesticas provienen de áreas residenciales y de actividades de tipo doméstico, de establecimientos comerciales y de instituciones tales como hospitales, escuelas, universidades, edificios, etc. Estas se originan básicamente en la cocina, baños y la lavandería, independientemente hay actividades en estos establecimientos e instituciones que generan aguas residuales catalogables como industriales y hasta tóxicos. (Aguilar, 2015)

B. Aguas residuales industriales:

Las aguas residuales industriales las constituyen los desechos líquidos provenientes de una fábrica o empresa que produce cualquier clase de material o artículo sometido a oferta y demanda en el mercado y son diferentes de las aguas de suministros utilizadas por el establecimiento en sus procesos

de producción. Aquí pueden incluirse algunas corrientes generadas en el comercio y los hospitales o similares. (Aguilar, 2015)

2.3.2. Componentes del agua residual del camal.

De acuerdo a los efluentes generados en el camal se tiene en cuenta el análisis de las siguientes sustancias como: DBO, DQO, pH, Sólidos suspendidos, Sólidos sedimentables, Aceites y grasas, color, otros.

A. Componentes físicos

a) Turbiedad.

La turbiedad es una medida de las propiedades de la luz de las aguas, su principal función es conocer la cantidad de luz que es absorbida o disipada por el material suspendido en el agua.

La causa de la turbiedad es por la desintegración de materiales arcillosos, por restos de plantas y microorganismos además también por presencia de detergentes y jabones utilizados en el camal. Los resultados de las mediciones de turbiedad se dan en unidades nefelométricas de turbiedad (UNT)

b) Color

El color de agua es ocasionado por el sólido suspendido, material coloidal o sustancias en solución; el color aparente es causado por sólidos suspendidos y el color verdadero se obtiene mediante una muestra filtrada. (Tchobanoglous, 2000)

Una unidad de color corresponde al color generado por 1mg/L de platinato, de acuerdo a esto existe una tabla para estimar la condición general del agua residual. (ver Tabla 1)

Tabla 1

Condición General Del Agua Residual

COLOR	DESCRIPCIÓN
Café claro	El agua lleva 6 horas después de la descarga.
Gris Claro	Aguas que han sufrido algún grado de descomposición o que han permanecido un tiempo corto en los sistemas de recolección.
Gris Oscuro o Negro	Aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición bacterial bajo condiciones anaerobias.

Fuente: Tchobanoglous, 2000

B. Componentes químicos

a) El pH

El pH es la medida de la intensidad ácida o básica de una solución, y se mide con los parámetros de esta ecuación:

$$pH = -\log_{10}(H^+)$$

es decir, representa la alcalinidad y acidez, la capacidad amortiguadora de un agua y la contribución de OH^- , CO_3^{2-} y HCO_3^- (Barrera, 2014)

b) Sólidos

Los sólidos estiman la cantidad de materia sólida, suspendida o disuelta, presente en el agua, entre la que se encuentra la materia flotante, coloidal y en solución. (Barrera, 2014)

En términos generales, los sólidos se clasifican en:

- Sólidos totales (ST): el agua se evapora y se seca a una temperatura (103-105 °C), y es la suma de sólidos suspendidos totales, de las sales disueltas y de la materia orgánica. (Barrera, 2014)
- Sólidos suspendidos totales (SST): material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro y secados a una temperatura de 103 a 105 °C. (Barrera, 2014)
- Sólidos disueltos totales (SDT): material soluble constituido por materia orgánica e inorgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar una muestra filtrada a través de un filtro a una temperatura de 103 °C. (Barrera ,2014)

C. Componentes biológicos

Los parámetros biológicos son indicativos de la contaminación orgánica y biológica, actividad natural como la humana, contribuyen a la contaminación orgánica de las aguas: la descomposición animal y vegetal, los residuos domésticos, los detergentes y otros. (Barrera, 2014)

a) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)

Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua durante un periodo de cinco días; es decir, es un parámetro que expresa la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación bioquímica de los compuestos orgánicos degradables existentes en el líquido residual, fijando condiciones de tiempo y temperatura (5 días y temperatura de 20 °C). Se expresa en función de la demanda de oxígeno de los microorganismos participantes en la degradación de la materia orgánica presente a 20 °C en 5 días. (Barrera, 2014)



Tabla 2

Escala De Clasificación De La Calidad Del Agua: DBO₅

CRITERIO	CLASIFICACION	COLOR
$\text{DBO}_5 \leq 3$	Excelente No contaminada Buena calidad	Azul
$3 < \text{DBO}_5 \leq 6$	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable Aceptable Con indicio de contaminación.	Verde
$6 < \text{DBO}_5 \leq 30$	Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	Amarillo

30 < DBO ₅ ≤ 120	Contaminada Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen Municipal	Naranja
DBO ₅ > 120	Fuertemente contaminada Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales	Rojo

Fuente: Barrera, 2014

b) Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno es un parámetro que se utiliza para estimar la contaminación orgánica del agua. Se mide a partir de la cantidad de oxígeno disuelto necesario para la degradación química de los contaminantes orgánicos que contiene; es decir, es la estimación de la materia oxidable, en términos de oxígeno equivalente presente en el agua, independientemente de su origen orgánico o mineral. Se entiende como “degradación química” la reacción de un oxidante químico, bien dicromato potásico o permanganato potásico, que consume materia orgánica. La determinación de la DQO no presenta interferencias por amonio, sustancias nitrogenadas, pero tiene limitaciones ya que oxida la materia orgánica sin que importe su biodegradabilidad. (Barrera, 2014)



Las aguas no contaminadas tienen valores de DQO de 1 a 5 ppm. Las aguas residuales domésticas contienen entre 260 y 600 ppm. Hay un índice que indica qué tipo de aguas se están analizando y se obtiene con la relación de DBO/DQO; si es menor de 0.2, el vertido será de tipo inorgánico y, si es mayor de 0.6, se interpretará como un vertido orgánico. (Barrera, 2014)

c) Relaciones entre DBO Y DQO.

A continuación, se presenta un cuadro de comparación de parámetros como “DBO Y DQO”.

Tabla 3

Comparación De DBO/DQO

TIPO DE AGUA RESIDUAL	DBO/DQO
No tratada	0,3-0,8
Después de sedimentación primaria	0,4-0,6
Efluente final	0,1-0,3

Fuente: Tchobanoglous 2000.

D. Componentes bacteriológicos

La bacteria *Escherichia coli* y el grupo coliformes son los organismos utilizados como indicadores de la contaminación fecal. Las bacterias coliformes son microorganismos de forma cilíndrica, capaces de fermentar la glucosa y la lactosa. Otros organismos utilizados como indicadores de contaminación son los estreptococos fecales y los clostridios, estos últimos son anaerobios, formadores de esporas; éstas son formas resistentes de las bacterias capaces de sobrevivir largo tiempo. El análisis del agua se realiza con el método de los tubos múltiples y se expresa en términos del número más probable (índice NMP) en 100mL de agua. Las aguas con un NMP inferior a 1 son potables. (Barrera, 2014)

2.3.3. Coagulación química.

La coagulación se lleva a cabo generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de dos fenómenos:

El primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.

El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua.

(Barrenechea, 2004)

Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos, de acuerdo con las demás características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etc. Se lleva a cabo en una unidad de tratamiento denominada mezcla rápida.

En una suspensión coloidal no se puede conseguir, de forma efectiva, la separación de las partículas directamente por técnicas de separación sólido-líquido (decantación, flotación), como consecuencia del pequeño tamaño de las mismas, que se traduce en una muy pequeña velocidad de sedimentación y/o flotación. Tampoco se produce la agregación de las partículas, debido a la existencia de cargas eléctricas en la superficie de las partículas coloidales. (Martínez, 2008)

Esta carga superficial origina la atracción de iones de signo contrario presentes en el seno de la disolución, que se concentran alrededor de las partículas, dando lugar a la formación de una capa difusa de iones, que provoca que las fuerzas de repulsión entre las partículas predominen sobre las fuerzas de atracción másica que existen entre las mismas. Por este motivo, una suspensión coloidal es un sistema estable (ver Figura 1), es decir, sin tendencia a cambios que posibiliten la agregación de las partículas. (Martínez, 2008)

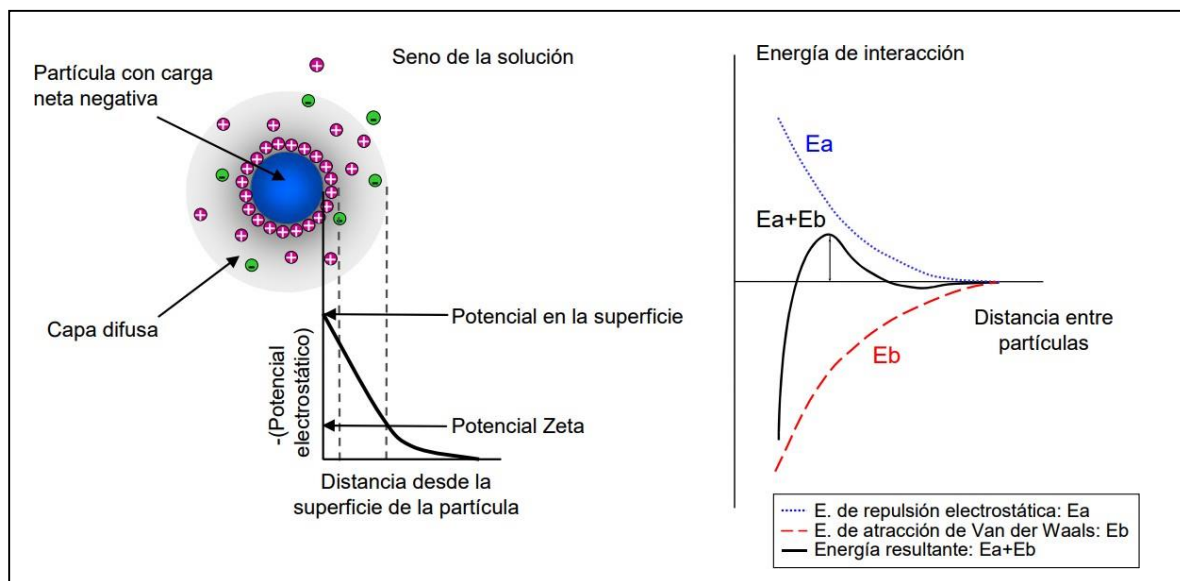


Figura 1. Fuerzas de Interacción sobre una partícula en suspensión

Fuente: Martínez (2008)

La coagulación puede ser definida como la desestabilización de las partículas para conseguir que las fuerzas de atracción tipo Van der Waals que existen entre dos partículas predominen sobre las de repulsión electrostática, de manera que las partículas se unan y den lugar a la formación de sólidos de mayor tamaño. Como consecuencia del mayor tamaño, la velocidad de sedimentación de las partículas se incrementa, posibilitando el uso de la decantación como tecnología de tratamiento. (Martínez, 2008)

La coagulación es un proceso químico complejo que implica la combinación de numerosos procesos sencillos. Comienza con la adición a una dispersión coloidal de un reactivo químico (normalmente una sal de catión polivalente) que activa simultáneamente varios mecanismos de desestabilización coloidal,

siendo los más importantes (ver Figura 2) la compresión de la doble capa eléctrica (como consecuencia del aumento en la fuerza iónica del medio que provoca este nuevo reactivo) y la neutralización de la carga superficial de las partículas coloidales (que está asociada a la adsorción de iones sobre la superficie de las partículas coloidales). (Martínez, 2008)

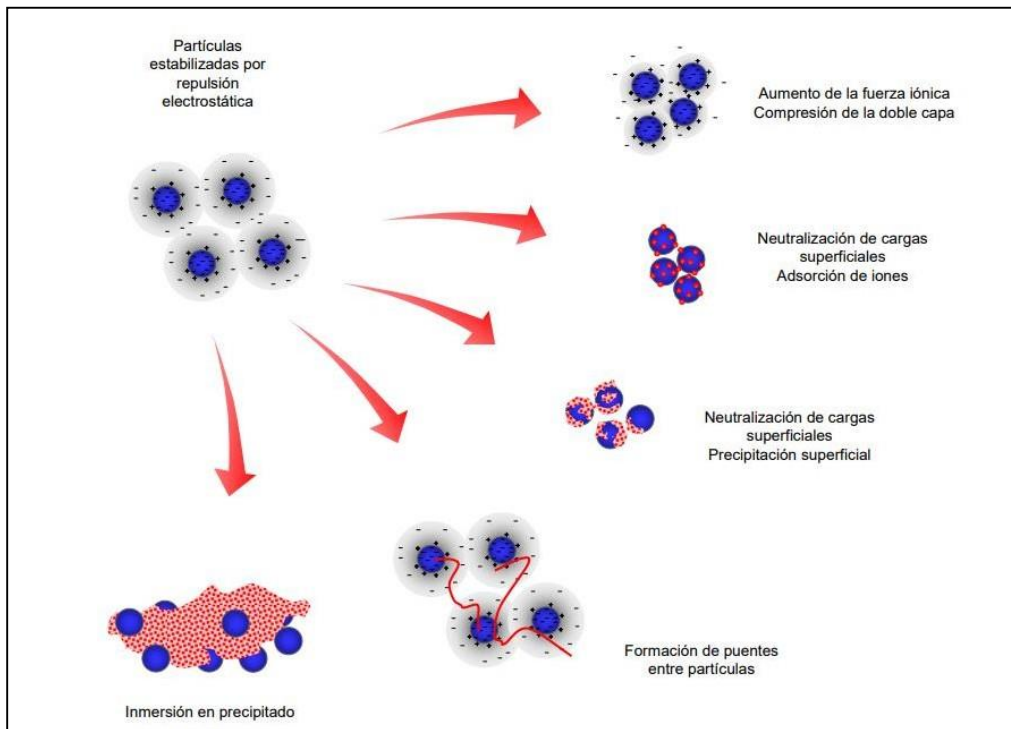


Figura 2. Mecanismos de coagulación de partículas coloidales

Fuente: Martínez (2008)

Asimismo, la adsorción de grupos activos de un mismo agente coagulante sobre diferentes partículas coloidales permite la formación de enlaces tipo puente entre partículas. Este mecanismo puede ser conseguido por polímeros

formados de forma natural tras la hidrólisis de sales de aluminio o hierro, pero su eficacia aumenta notablemente si se añaden polímeros orgánicos especiales (iónicos o no) con una cadena de gran tamaño. (Martínez, 2008)

Como consecuencia del proceso de coagulación por aumento de la fuerza iónica o por neutralización, las fuerzas de repulsión electrostáticas se hacen menores que las correspondientes fuerzas de atracción de Van der Waals, y cuando las partículas coloidales chocan se unen para formar partículas de mayor tamaño. Al proceso físico mediante el que se favorece que estas partículas choquen se le denomina floculación. Normalmente, en el tratamiento de un agua el proceso de floculación se consigue agitando suavemente el agua residual para favorecer el movimiento interno de las partículas coloidales. (Martínez, 2008)

2.3.4. Electrocoagulación

La electrocoagulación es una técnica utilizada para el tratamiento de las aguas residuales. Los contaminantes de muy diversos efluentes son removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico, cuya función es llevada a cabo por corriente eléctrica que es aplicada al medio líquido contaminado. Podemos entonces definir la electrocoagulación como un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua

a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados. (ver Figura 3) (Holt, 2005)

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados. (Holt, 2005)

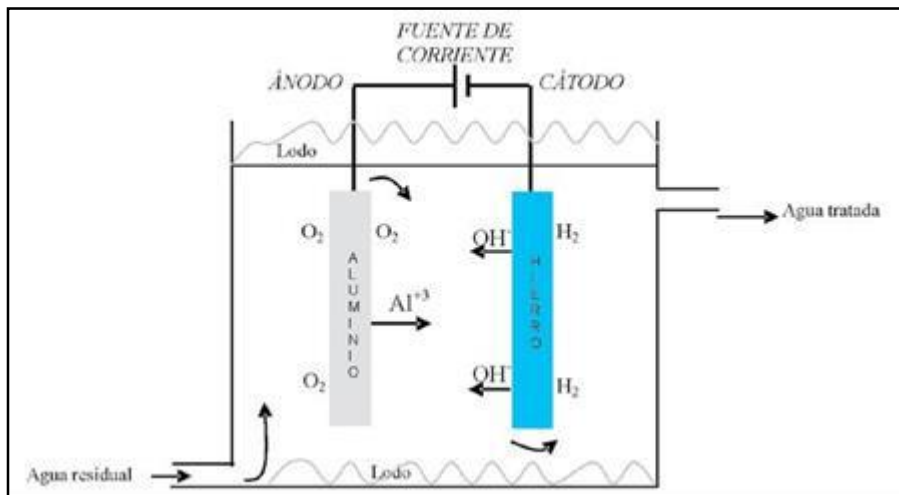


Figura 3. Sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro.

Fuente: Holt (2005).

2.3.5. Mecanismo y Reacciones en la electrocoagulación.

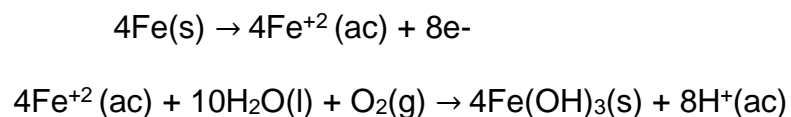
Se considera que en el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas: inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la desestabilización de los contaminantes y emulsiones y finalmente, se produce la formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de éstas en el coagulante. Mollah (2001)

Los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son hierro y aluminio. Por esta razón se tratarán de manera especial las reacciones que se desarrollan manteniendo electrodos de estos dos metales en la celda. (Laure, 2003)

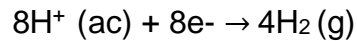
Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$ o hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$. (Mollah, 2001)

Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico

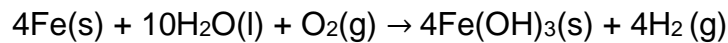
En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo ocurre la reacción:

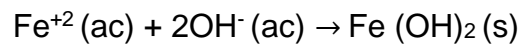
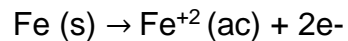


Reacción global:

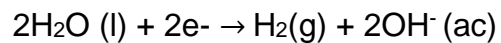


Mecanismo dos: Formación del hidróxido ferroso

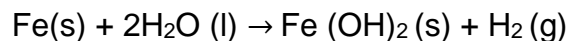
En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:



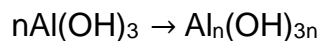
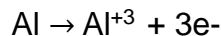
Reacción global:



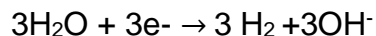
Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas. (Laure, 2003)

Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes.

En el ánodo:



En el cátodo:



Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^- reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{+2}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, y otras poliméricas, tales como $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ y $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$, como se muestra en la reacción de ánodo. El $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes. (Laure, 2003)

2.3.6. Factores que afectan la electrocoagulación

Existen muchos factores que participan en el proceso de electrocoagulación y algunos de estos factores tienen mayor influencia sobre el proceso.

a) pH

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. (Ge, 2004)

Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH, e incluso este rango puede ser amplio. En términos generales las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7. Ejemplos de esta situación se

pueden ver en la remoción de arsénico en aguas de consumo, donde el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da en pH entre 6 y 8, y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil se dan en un pH de 7. (Ge, 2004)

b) Densidad de Corriente

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

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierros Fe^{+2} , liberados por los respectivos electrodos. (Restrepo, 2006)

En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura. (Restrepo, 2006)

c) Conductividad

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado. (Restrepo, 2006)

La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o CaCl₂ genera un aumento en la conductividad del agua residual. Además, se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO³⁻ y SO₄²⁻, pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca⁺² y Mg⁺² produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl⁻ alrededor del 20%. (Restrepo, 2006)

d) Temperatura

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

2.3.7. Reactores para procesos de electrocoagulación

En comparación con un reactor químico convencional, el reactor electroquímico (o celda electroquímica) puede ser tremendamente interesante desde el punto de vista de su concepción, ya que, en él, tanto la transferencia de carga, como los procesos químicos derivados de la misma y como, especialmente, la transferencia de materia, juegan un papel fundamental. Asimismo, las condiciones operativas empleadas en el tratamiento tienen una enorme importancia. (Martínez, 2008)

Existen muchos tipos de celdas electroquímicas empleadas en el proceso de electrocoagulación, y pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios:

- ✓ dirección del flujo de agua residual
- ✓ modo de circulación – tipo de conexión electródica
- ✓ finalidad de la celda.

De esta forma, en función de la dirección del flujo en la celda, los reactores se pueden clasificar en unidades de flujo horizontal y vertical. (Martínez, 2008)

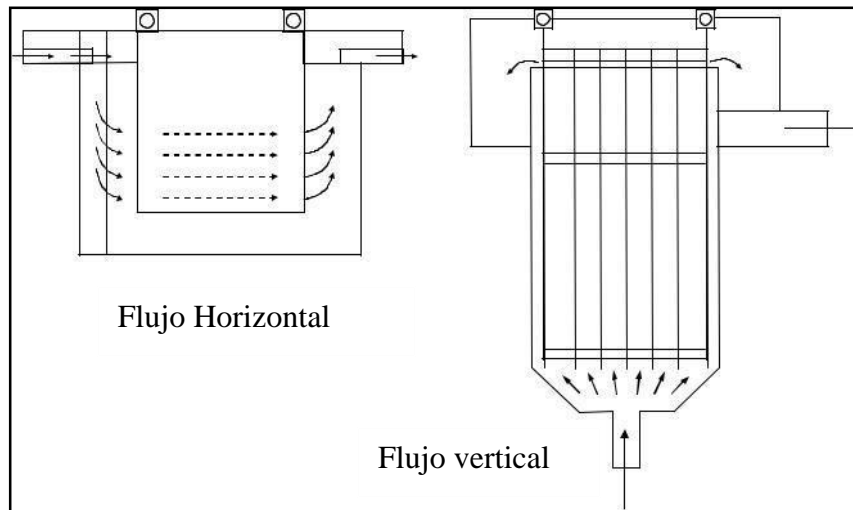


Figura 4. Unidades de electrocoagulación de flujos horizontal y vertical
 Fuente: Martínez (2008)

Esta disposición puede tener importancia cuando se pretende aprovechar el movimiento provocado por el oxígeno y el hidrógeno generados en los procesos anódicos y catódicos de oxidación y reducción del agua, respectivamente. En función del modo de circulación del agua a tratar entre los electrodos, se pueden encontrar celdas de canales múltiples o bien de un sólo canal, tal y como se observa en la Figura 5a). La ventaja de las celdas de canales múltiples se encuentra en la sencillez de su disposición. Sin embargo, debido al pequeño caudal de electrolito en cada uno de los canales, esta disposición puede favorecer el fenómeno de pasivación de los electrodos. (Martínez, 2008)

Por otra parte, de acuerdo con el tipo de conexión eléctrica, los reactores pueden ser clasificados en monopolares y bipolares (ver Figura 5b).

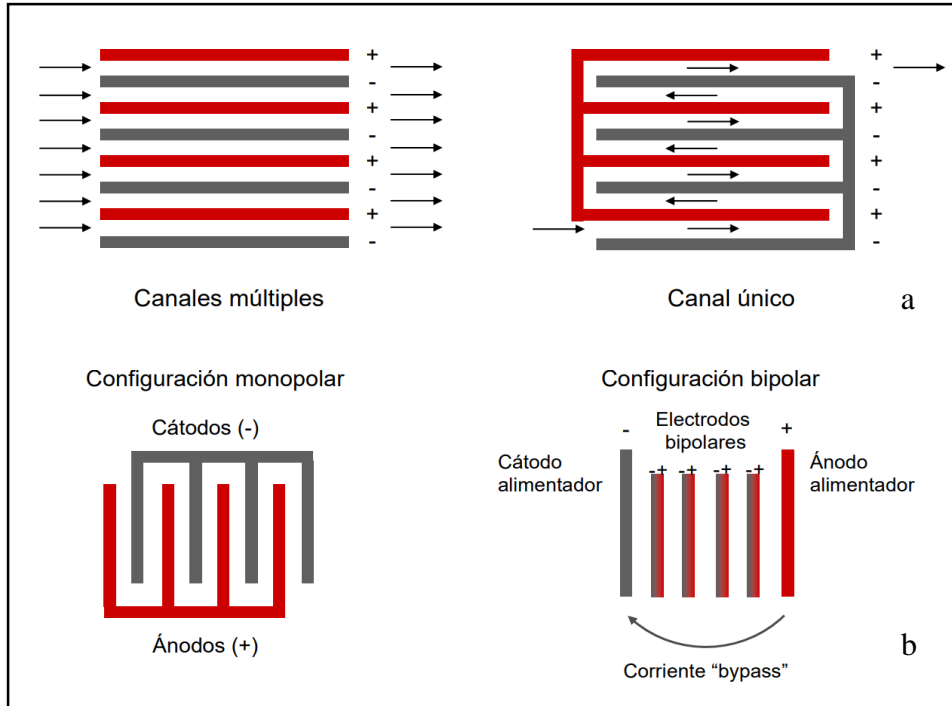


Figura 5. Unidades de electrocoagulación con disposición de canales múltiples y de canal único. a) unidades de electrocoagulación con disposición de canales múltiples y de canal único. b) disposición de electrodos en modo monopolar y bipolar.

Fuente: Martínez (2008)

La configuración bipolar trabaja a menor intensidad y mayor voltaje que la monopolar. Las celdas bipolares tienen la ventaja de la sencillez de su disposición, ya que sólo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño. Sin embargo, el elevado potencial entre los electrodos alimentadores también origina que una parte de corriente fluya a través de la disolución causando un bypass de corriente a los electrodos bipolares, (Martínez, 2008)

y produciendo por tanto pérdidas de corriente, lo que debe ser tenido en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de electrodos. (Martínez, 2008)

Un último elemento discriminatorio en el diseño de procesos de electrocoagulación (y tal vez sea el más característico dentro de esta aplicación, ya que los demás son comunes al del resto de tecnologías electroquímicas) es la finalidad del reactor. Esta puede ser simplemente la dosificación de agente coagulante, o bien puede ser más ambiciosa e incluir el movimiento de contaminantes (electrofloculación) o incluso llegar a favorecer el proceso de flotación mediante la utilización del oxígeno y el hidrógeno generados respectivamente en los ánodos y cátodos de la instalación (electroflotación). Con estos requisitos, existen numerosos prototipos de reactor de electrocoagulación, tales como los mostrados en la Figura 6. La celda de la Figura 6a) utiliza un diseño de tipo cilíndrico. Este consta de cuchillas raspadoras dentro del cilindro con objeto de evitar problemas de atascamiento, y los electrodos se sitúan en los espacios abiertos entre los dientes del peine rascador. Una alternativa al diseño cilíndrico se muestra en la Figura 6b) donde los electrodos consisten en barras, y un venturi se sitúa en el centro del cilindro para conseguir una buena mezcla entre el agua residual y el agente coagulante generado. (Martínez, 2008)

Por su parte, la Figura 6c) muestra un prototipo en el que se favorece la electroflotación mediante el uso apropiado de las microburbujas generadas en los electrodos. (Chen, 2000)

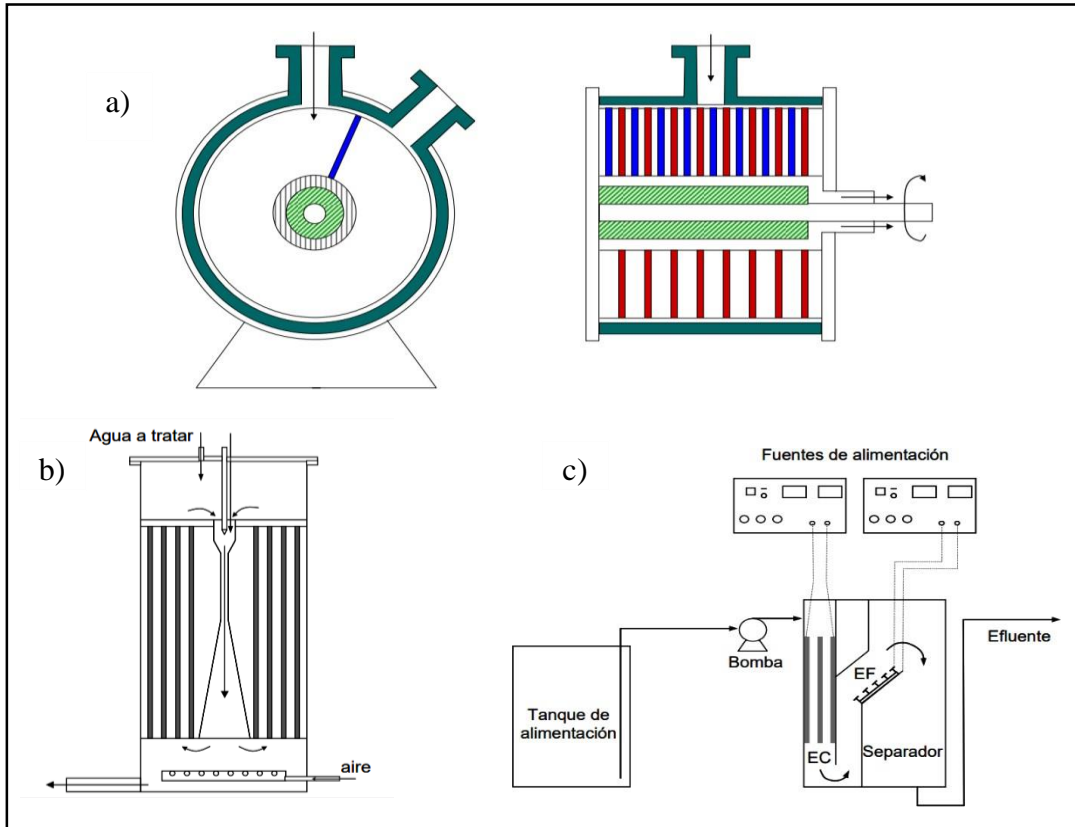


Figura 6. Reactores para procesos de electrocoagulación. a) Unidad de electrocoagulación con electrodos cilíndricos. b) Unidad de electrocoagulación cilíndrica con electrodos en forma de varillas. c) Unidad de electrocoagulación (EC) y de electroflotación (EF) de aguas residuales. Fuente: Martínez (2008)

2.3.8. Aplicaciones de la electrocoagulación

Una de las aplicaciones más conocidas y populares de la electrocoagulación ha sido el tratamiento de aguas residuales de la industria de galvanoplastia y electroplateado metálico. (Restrepo y otros, 2006)

La industria metalúrgica, la de producción de cromo, las curtiembres y la industria de fertilizantes, utilizan en sus procesos cromo (+VI), elemento de una alta toxicidad. La electrocoagulación combinada con electroflotación ha sido probada como alternativa para la remoción del cromo en esta agua residual. Este tratamiento ha permitido obtener aguas tratadas con concentraciones de cromo por debajo de 0.5ppm. (Restrepo y otros, 2006)

La industria mecánica, las refinerías, los talleres de reparación automotriz, el transporte y la distribución y almacenamiento de aceites, producen aguas residuales con altos contenidos de elementos propiamente aceitosos y grasos. La electrocoagulación ha mostrado alta efectividad en desestabilizar dichas emulsiones y la consecuente remoción de los aceites y grasas.

La electrocoagulación también ha sido utilizada en el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria, estas aguas se caracterizan por altos contenidos de DBO y DQO además de altos porcentajes de grasas.

(Restrepo y otros, 2006)

El tratamiento de las aguas residuales de lavanderías, tintorerías e industria textil, obteniendo eficiencias importantes en la remoción de materia orgánica, turbiedad y color. (Holt, 2005)

La electrocoagulación también ha sido probada en la potabilización de aguas. Es importante resaltar que el paso de la corriente eléctrica a través del agua a tratar tiene efecto desinfectante en cuanto que destruye en porcentajes por encima del 99%, los microorganismos presentes en el agua. En esta misma aplicación se ha venido estudiando la electrocoagulación con buenos resultados en el tratamiento de aguas para consumo humano contaminadas con arsénico, contaminación ésta que puede afectar la salud de la población mundial ya que puede ocurrir en cualquier región o país. Otras posibles aplicaciones de la electrocoagulación están dadas en la remoción de nitratos en aguas superficiales y subterráneas contaminadas por nitratos lixiviados, procedentes de los fertilizantes artificiales usados en los cultivos. (Holt, 2005)

Finalmente, la electrocoagulación también ha sido probada en el tratamiento de aguas cuyos contaminantes son materia orgánica, como DBO en aguas residuales domésticas y efluentes de la industria de los colorantes.
(Holt, 2005)

2.3.9. Marco legal de los límites permisibles del agua residual de un camal

Organismos que se encargan de fiscalizar todo lo concerniente al agua las cuales son la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Ministerio del ambiente (MINAM) y el Ministerio de Salud (MINSa) con las Direcciones regionales de salud.

Algunos decretos, reglamentos y leyes sobre los estándares de calidad del agua y los límites máximos permisibles se presentan a continuación:

- a) La ley N° 29338, ley de recursos hídricos con el D.S.N°001-2010-AG, “REGLAMENTO DE LA LEY DE RECURSOS HIDRICOS”, en el Título V; capítulo VII donde nos menciona sobre la reutilización de aguas residuales siempre que cumplan con los estándares de calidad ambiental para agua y el límite máximo permisible (LMP) en los artículos 147° al 152°.
- b) Se aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para La descarga de Aguas Residuales No Domésticas en el Sistema de Alcantarillado Sanitario, mediante D.S. N°010-2019-VIVIENDA.

(ver Tabla 4)

Tabla 4

Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para la descarga de Aguas Residuales No Domésticas en el Sistema de Alcantarillado Sanitario.

	Parámetros	Unidad	LMP
1	Ph	-	6,0 – 9,0
2	Solidos suspendidos totales	mg/L	500
3	Demanda bioquímica de oxígeno-DBO ₅ , 20°C	mg/L	500
4	Demanda química de oxígeno-DQO	mg/L	1000
5	Aceite y Grasas	mg/L	100
6	Nitrógeno Amoniacal	mg/L	80

Fuente: D.S. N°010-2019- VIVIENDA

2.4. Definiciones de términos básicos

a) Beneficio

Es el sacrificio de animales para la producción de carne de consumo humano.

b) Camal

Es un establecimiento destinado al beneficio de ganado (vacuno, ovino, etc.) y aves (pollo) para consumo humano y donde se realiza la clasificación de la carne (extra, primera, segunda).

c) Contaminantes

Sustancias sólidas, líquidas o gaseosas que al incorporarse al cuerpo receptor o al actuar sobre él, degradan o alteran la calidad que tenía antes de dicha acción, en niveles no adecuados para la salud y el bienestar humano.

d) Electroquímica

Es una rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química.

e) LMP

Es el valor de la concentración de ciertos elementos, sustancias o aspectos físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a las emisiones, efluentes y que al ser excedida causa daños al bienestar humano y al medio ambiente.

f) Materia Orgánica

Conjunto de células animales y vegetales descompuestas total o parcialmente por la acción de microorganismos.

g) Muestra

Es una o más porciones de un volumen o masa representativa definida, colectadas en cuerpos receptores de efluentes industriales, efluentes domésticos, redes de abastecimiento público, estaciones de tratamiento de aguas, etc., con el fin de determinar sus características físicas, químicas y/o biológicas.

h) Parámetro

Cualquier elemento, sustancia o propiedad física, química o biológica de un efluente que define su calidad.

i) Polímero

Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión mediante enlaces covalentes de una o más unidades simples llamadas monómeros.

j) Proceso electroquímico

Son aquellos procesos químicos que transcurren por la acción de la corriente eléctrica continua. Se pueden aplicar en la electrolisis de las soluciones acuosas, en la electrolisis de las masas o materias fundidas.

k) Reactor electroquímico

Es un recipiente específico donde se lleva a cabo una reacción por el paso de la corriente eléctrica, en la cual las especies migran a cada electrodo donde se lleva a cabo la oxidación y reducción.

III. HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis General

El proceso de tratamiento combinado de coagulación química con polímero de aluminio y proceso de electrocoagulación con electrodos de acero permite que el agua residual cumpla con la normativa vigente y puede ser vertido a los cuerpos de agua sin problemas al medio ambiente.

3.1.2. Hipótesis específicas

- a) Las características del agua residual del camal Conchucos superan los valores máximos admisibles de la normativa vigente.
- b) Las condiciones más favorables del tratamiento de agua residual mediante coagulación química seguido de electrocoagulación son:
 - Concentración de coagulante (mg/L):100-600
 - Tiempo de agitación (min):15-30
 - Tensión (V):10-14
 - Tiempo de reacción (min):20-40
- c) Las características del agua residual del camal Conchucos al final del tratamiento presenta valores inferiores a los valores máximos admisibles de la normativa vigente.

3.2. Definición conceptual de variables

3.2.1 Variable Dependiente

$Y(x)$ = Concentración de contaminantes en el agua residual del camal

Conchucos.

3.2.2 Variables independientes

$X1(x)$ = Características físicas y químicas del agua residual de camal al inicio del tratamiento.

$X2(x)$ = Proceso optimizado de tratamiento de agua residual del camal

Conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación.

$X3(x)$ = Características físicas y químicas del agua residual de camal al final del tratamiento.

3.3. Operacionalización de las variables

Tabla 5
Operacionalización de las variables

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
Y= Concentración de contaminantes en el agua residual del camal Conchucos	DBO ₅ DQO SST	mg/L mg/L mg/L	Análisis cuantitativo de laboratorio y comparando los resultados con los límites máximos permisibles de la normativa vigente para agua
VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
X1= Características físicas y químicas del agua residual de camal Conchucos al inicio del tratamiento.	DBO ₅ DQO SST Acidez	mg/L mg/L mg/L pH	Análisis cuantitativo de laboratorio
X2 = Proceso optimizado de tratamiento de agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación	Concentración de coagulante Tiempo de agitación Tensión Tiempo de reacción	mg/L minutos V minutos	Revisión bibliográfica. Corridas experimentales
X3 =Características físicas y químicas del agua residual de camal Conchucos al final del tratamiento.	DBO ₅ DQO SST	mg/L mg/L mg/L	Análisis cuantitativo de laboratorio

Fuente: elaboración propia

IV. DISEÑO METODOLOGICO

4.1. Tipo y diseño de investigación

Los tipos de investigación que se realizó en el presente trabajo de tesis son:

a) Por su finalidad

Es aplicada, puesto que mediante el tratamiento de agua residual del camal de Conchucos se reduce los parámetros fisicoquímicos que cumplan con los estándares de calidad ambiental para agua y los valores máximos admisibles (VMA)

b) Por su diseño interpretativo

Es experimental porque permite manejar el factor causal y así determinar el efecto deseado

c) Por el énfasis de la naturaleza de los datos manejados

Es del tipo cualicuantitativo porque las variables que se utilizó en la investigación son cualitativas y cuantitativas.

d) Por el nivel de estudio

Es del tipo exploratorio, puesto que busca identificar nuevos rumbos para la investigación en campos del conocimiento no estudiado o poco estudiados.

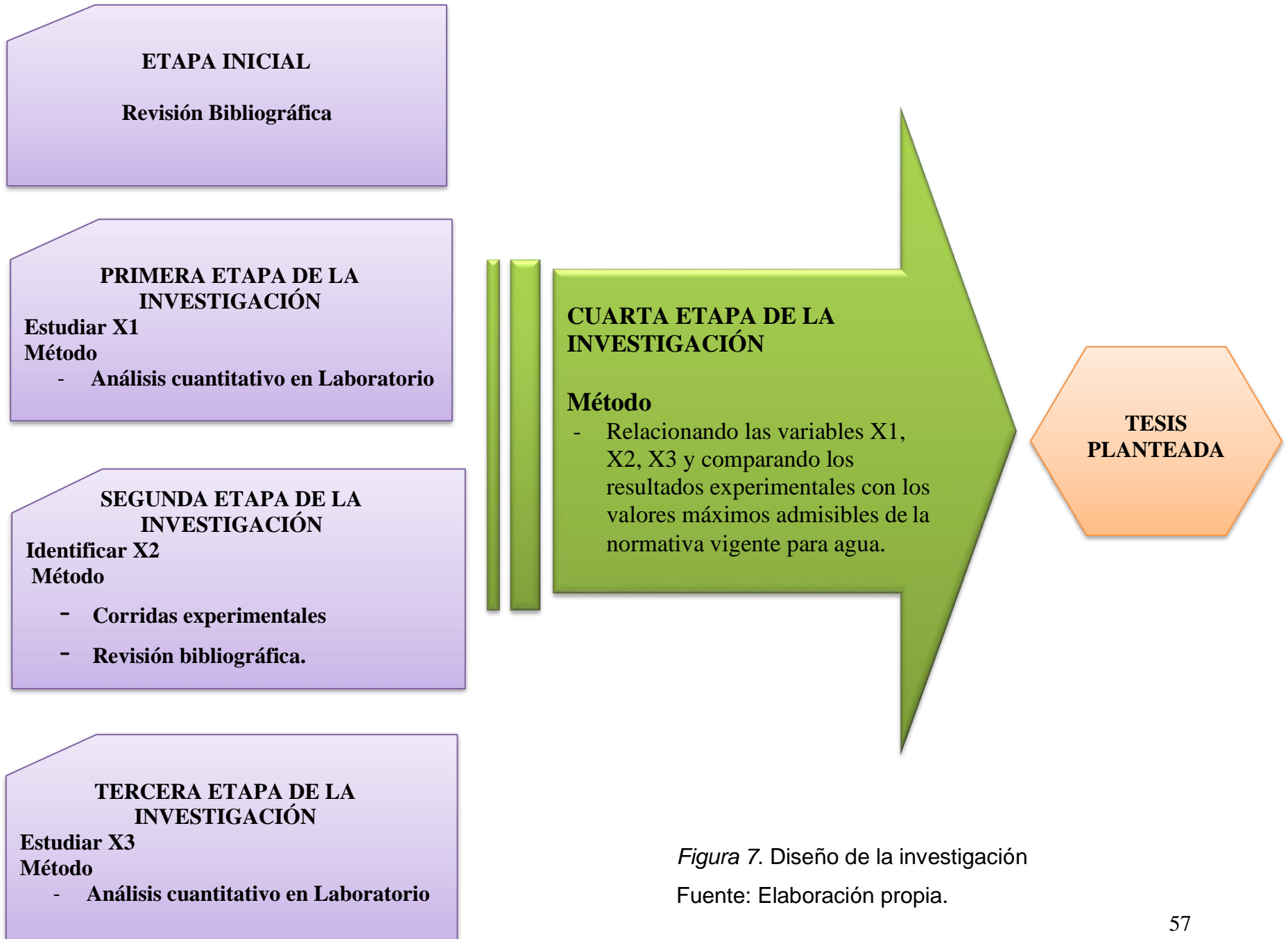


Figura 7. Diseño de la investigación

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Método de investigación

ETAPA 1:

En la primera etapa de la investigación se recurrió al análisis cuantitativo de laboratorio de la variable de investigación. Que en este será la variable X1, con la finalidad de identificar las características físicas y químicas del agua residual del camal de Conchucos al inicio del tratamiento.

- ✓ Determinación de DBO₅
- ✓ Determinación de DQO
- ✓ Determinación de TSS
- ✓ Determinación de pH

ETAPA 2:

En la segunda etapa de la investigación se realizó la revisión de bibliografía sobre el tratamiento de aguas residuales mediante coagulación química seguido de electrocoagulación y condiciones de operación a nivel laboratorio vinculada a la variable de investigación. En esta etapa la variable será X2, con el propósito de identificar las condiciones más favorables del tratamiento se realizaron pruebas experimentales descritas a continuación:

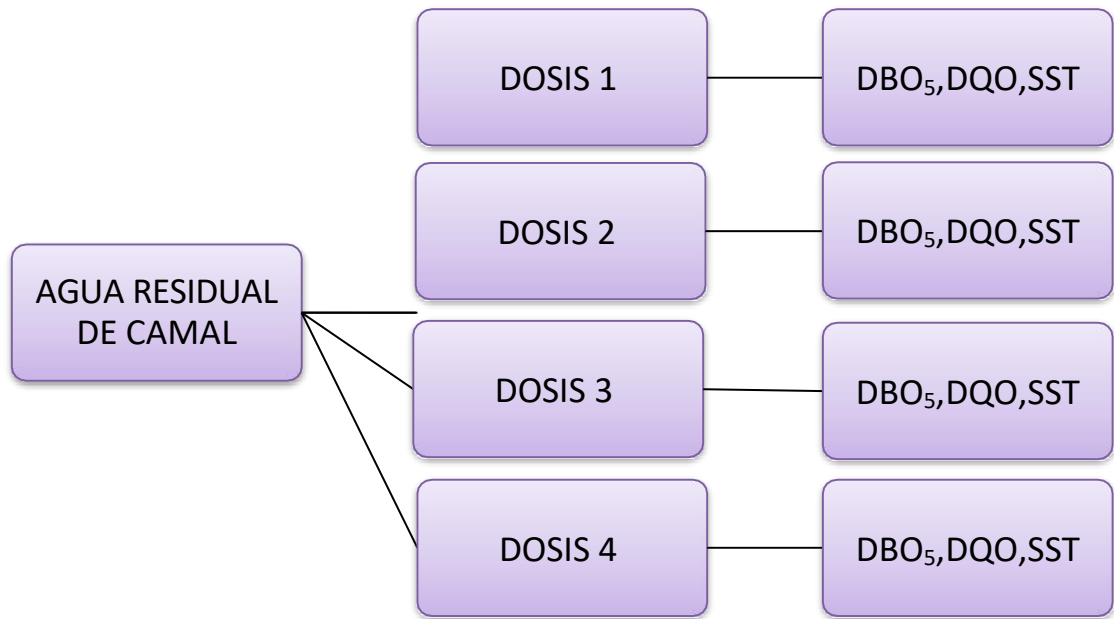


Figura 8. Diagrama del tratamiento por coagulación química.

Fuente: elaboración propia.

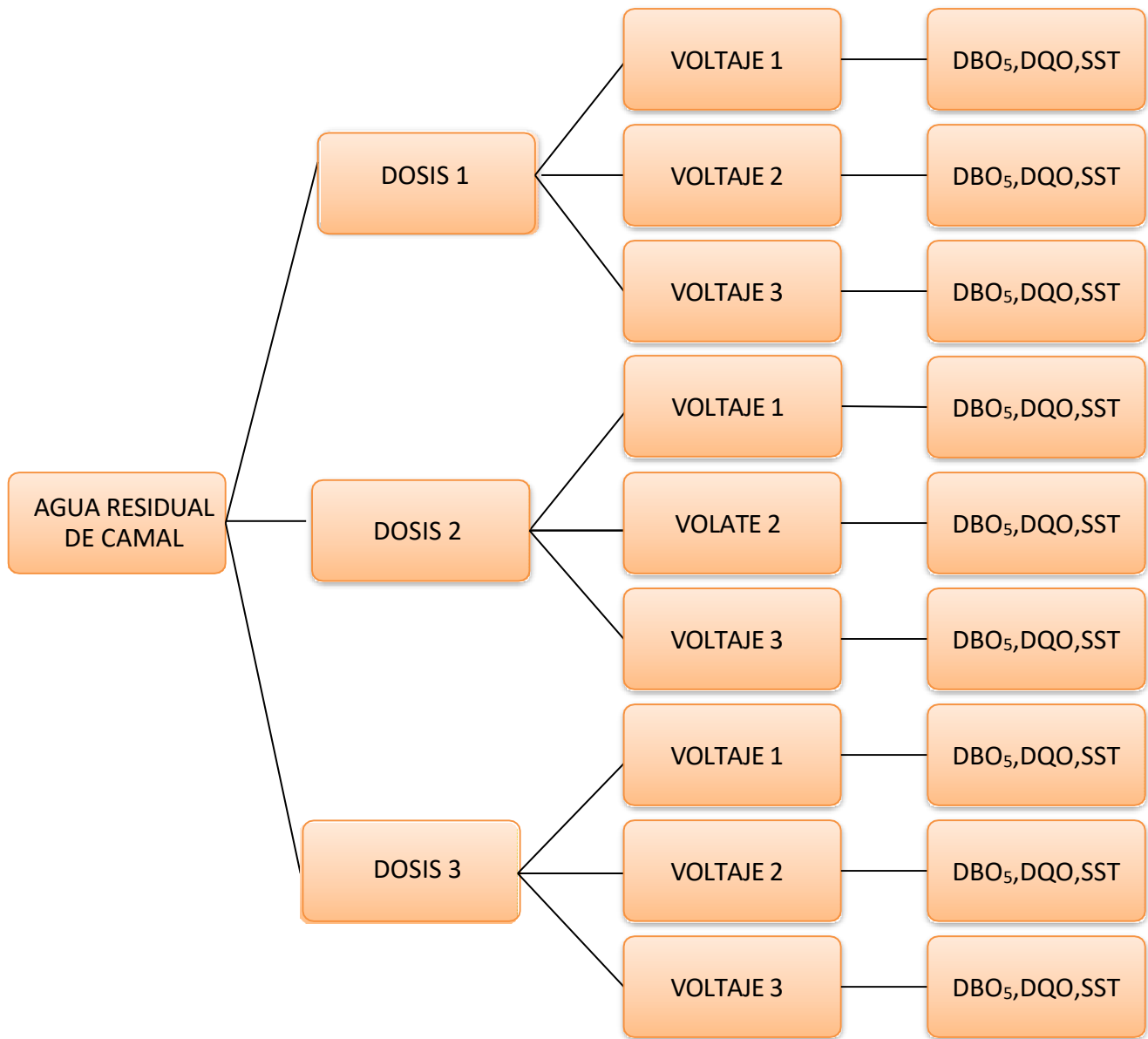


Figura 9. Diagrama del tratamiento por electrocoagulación

Fuente: elaboración propia

ETAPA 3:

En la tercera etapa de la investigación se recurrió al análisis cuantitativo de laboratorio de la variable de investigación. Que en este será la variable X3, con la finalidad de identificar las características físicas y químicas del agua residual del camal de Conchucos al final del tratamiento

- ✓ Determinación de DBO₅
- ✓ Determinación de DQO
- ✓ Determinación de TSS

ETAPA 4:

En la cuarta etapa de la investigación se realizó la revisión de normas de estándares de calidad ambiental para aguas y los valores máximos admisibles (VMA); y con la información lograda tanto en la primera, segunda y tercera etapa, se realizó un riguroso análisis de la información.

- ✓ D.S. N°010-2019- VIVIENDA. “Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para la descarga de Aguas Residuales No Domesticas en el Sistema de Alcantarillado Sanitario”.

4.3. Población y muestra

La población está determinada por las aguas residuales del proceso de sacrificio de porcinos y bovinos del camal de Conchucos, situado en Jirón Jose de Rivera y Davalos N° 405, El agustino - Lima.

Las muestras recogidas fueron tomadas a las 10:00 am del jueves porque es un día donde hay mayor sacrificio de porcinos, en Diciembre del 2018 para la caracterización del afluente, en Enero del 2019 para la prueba de Test de Jarras y en Febrero del 2019 para la prueba en el Sistema de tratamiento de Coagulación-Electrocoagulación, el tamaño de muestra total utilizada fue de 65 L.

Se recogieron las muestras después de un pre-tratamiento por desbaste que elimina sólidos gruesos y sedimentables por intercepción, obteniendo una muestra de agua homogénea, sin materiales que interfieran en el proceso.

4.4. Lugar del estudio

La investigación experimental se desarrolló en el Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios; y en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao, mientras que la caracterización tanto del efluente y del agua tratada se analizó en ENVIROTEST S.A.C., laboratorio acreditado.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

A. Toma de muestra: Se realizó la toma de muestra del agua residual proveniente del camal de Conchucos, en el cuerpo de agua después del proceso de desbaste cumpliendo los protocolos de toma de muestra, posteriormente se analizó en un laboratorio sus características fisicoquímicas que presenta esta agua.



Figura 10. Toma de muestra

Fuente: elaboración propia

B. Traslado de muestra inicial a laboratorio: Se trasladó en cooler de laboratorio, almacenado en frascos de PVC y con la ayuda de un refrigerante se mantuvo la temperatura a 5°C.



Figura 11. Traslado de muestra al laboratorio
Fuente propia

C. Análisis de laboratorio del afluente: Se realizó en un laboratorio externo, en menos de 24 horas. Todos los análisis se basó en las normas APHA.

a. Determinación de DBO

(SMEWW- APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 22nd Ed. 2012. Biochemical Oxygen Demand(BOD). 5-Day BOD Test.)

✓ Equipos

- Balanza analítica de cuatro cifras decimales.
- Incubadora.



Figura 12. Incubadora

Fuente: elaboración propia

- Medidor de oxígeno.



Figura 13. Oxímetro

Fuente: elaboración propia

✓ Reactivos

- Agua destilada y Ultrapura
- Solución tampón de fosfato
- Solución de sulfato de magnesio
- Solución de cloruro de calcio
- Solución de cloruro de hierro (III)
- Ácido Sulfúrico 1 M
- Hidróxido de Sodio 1M
- Solución de glucosa - ácido glutámico
- Cepa o Semilla (Cultivo heterogéneo de microorganismos)

✓ Materiales

- Botellas de Polipropileno de 2000 mL.
- Botellas Winkler de aproximadamente 300 mL de capacidad
- Garrafa con llave de 20 L de capacidad y con dispensador o mangueras.
- Microespátula metálica.
- Balón aforado de 1L Clase A

- Balones aforados de 100 mL Clase A o Clase B
 - Pipetas graduadas de 10 mL. Clase B
 - Pipetas graduadas de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 50, 100 mL boca ancha.
 - Probetas de 250, 500 mL.
- ✓ Procedimiento
- Preparación del agua de dilución.
 - Llene la garrafa con agua destilada, la necesaria para el análisis, teniendo en cuenta que el gasto aproximado es de 300 mL por botella winkler y van a utilizar, 3 botellas para blanco, 3 botellas para cepa más agua de dilución, 3 botellas para estándar, 4 botellas para muestras y 1,5 L adicionales.
 - Reserve el volumen de agua destilada desde el día anterior.
 - Airee el agua por dos horas mínimo, utilizando la bomba de los acuarios, que se encuentra disponible en el lugar de trabajo.
 - Verifique que la temperatura del agua de dilución sea de $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$.
 - Controle la temperatura, midiendo con el oxímetro a una muestra que se toma en una botella Winkler, repita el proceso hasta llegar a 19°C
 - Agregue 1 mL de cada una de las siguientes soluciones, por cada litro de agua de dilución a preparar: Solución tampón de fosfatos, Solución de sulfato de magnesio, Solución de cloruro de calcio, Solución de cloruro de hierro (III).
 - Alistamiento general
 - Aliste 3 botellas por cada muestra, blanco, blanco con cepa y estándar a procesar.
 - Registre en el formato el valor de 293 mL que corresponde al valor promedio de las botellas del laboratorio (293 ± 4 mL), registre

también el volumen de la alícuota que se tomará de la muestra y la dilución previa realizada en balón aforado.

- Adicione 2 mL de la Cepa o Semilla tomando las precauciones

- Procesamiento de la muestra
 - Después de establecer la cantidad de muestra que necesita de acuerdo a las diluciones a realizar, agite la muestra para homogenización completa y sirva en un vaso de precipitados la muestra, ajuste el pH de la muestra entre 6,5 y 7,5 con ácido sulfúrico 1 M o hidróxido de sodio 1 M, según sea el caso, dosificando estos reactivos con una pipeta Pasteur que dosifique gotas muy pequeñas. (Punta en buen estado)
 - Aliste cuatro botellas Winkler.
 - Rotule las botellas con el número de muestra, la dilución correspondiente y la fecha de análisis. Para determinar la dilución aproximada siga los criterios de dilución de muestras.
 - Registre el volumen real de la botella Winkler impreso en la botella usada.
 - Adicione a cada botella la cantidad de muestra que se ha establecido, si se requiere hacer dilución realícela en un balón aforado clase A ó B agite y sirva en la botella la cantidad requerida.
 - Adicione 2 mL de cepa.
 - Adicione agua solamente hasta la mitad del cuello de la botella, para que al introducir el electrodo no haya pérdida de muestra.
 - Lea el oxígeno inicial de las cuatro botellas de muestra, llene totalmente dejando el sello hidráulico (pequeña película de agua para impedir el intercambio de oxígeno entre la botella y el ambiente)
 - Si al medir el oxígeno disuelto inicial, ha descendido a menor de 6, preparar otra botella utilizando un volumen de muestra menor.

- Registre los datos e incube a $20^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$ por cinco días. Al quinto día lea el Oxígeno disuelto residual
- Calcule la DBO_5 con los resultados obtenidos.

b. Determinación de DQO

(SMEWW- APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 22nd Ed. 2012. Chemical Oxygen Demand(COD). Closed Reflux, Colorimetric Method)

✓ Aparatos

- Balanza analítica con aproximación de 0.0001 g.
- Microdigestor para micro DQO, diseñado para mantener una temperatura constante de operación de 150°C .
- Termoreactor para DQO, diseñado para mantener una temperatura constante de operación de 150°C .



Figura 14. Termoreactor

Fuente: elaboración propia

-Espectrofotómetro para uso a 600 nm o 420 nm de longitud de onda



Figura 15. Espectrofotómetro UV-Visible

Fuente: elaboración propia

✓ Reactivos

- Agua Ultrapura
- Solución de digestión, rango alto
- Reactivo de ácido sulfúrico
- Ácido sulfámico
- Biftalato Acido ácido de potasio (KHP) estándar.
- Solución de digestión, rango bajo

✓ Materiales

- Balones aforados clase A de 50 mL.
- Pipetas aforadas clase A, de 2, 2.5, 5, 6, 10, 20 y 25 mL.
- Pipetas graduadas de 5 y 10 mL
- Probetas vidrio de 50 mL.
- Micropipeta de 1000 μ L

- Tubos de digestión, de vidrio borosilicato, de 16 × 100 mm, con tapa rosca con empaque de Teflón y que soporten temperaturas hasta de 200°C.
 - Tubos de digestión, de vidrio borosilicato, de 25 × 150 mm, con tapa rosca con empaque de Teflón y que soporten temperaturas hasta de 200°C.
- ✓ Procedimiento
- Digestión de la muestra
 - Precaliente conectando el digestor una hora antes de colocar las muestras para que éste alcance los 150 °C.
 - Preparación de blancos: Transfiera una alícuota de 2,5 mL de agua ultrapura en un tubo de digestión, adicione 1,5 mL de solución de digestión y 3,5 mL de reactivo de ácido sulfúrico (este reactivo debe ser dispensado gota a gota por la pared del tubo). Tape herméticamente los tubos, agite varias veces, sin invertir.
 - Prepare 6 tubos como blancos, 3 de ellos colóquelos en digestión junto con las muestras y los otros 3 déjelos sin digerir.
 - Tratamiento de la muestra. Agite vigorosamente la muestra, transfiera a un tubo de digestión, 2,5 mL de muestra, agregue cuidadosamente 1.5 mL de solución de digestión y 3,5 mL de reactivo de ácido sulfúrico por la pared del tubo de tal manera que se forme una capa de ácido debajo de la mezcla de muestra y solución digestora. Tape herméticamente y agite, si la muestra presenta coloración verdosa o azul, indica que se encuentra fuera de rango de lectura, repita el procedimiento utilizando dicromato de potasio 0,25 N.

- Coloque los tubos con las muestras, los blancos para digestión y los estándares de control (distribuya aleatoriamente en cada uno de los bloques los blancos y los estándares de control), en el microdigestor precalentado a 150°C. Espere a que se estabilice la temperatura en 150°C y deje en digestión por 2 horas.
- Después de este tiempo saque los tubos y colóquelos en una gradilla a enfriar.

➤ **Determinación de la reducción de dicromato**

Enfriar la muestra a temperatura ambiente lentamente para evitar la formación de precipitados. Una vez las muestras se enfrían, ventile, si es necesario, para aliviar cualquier presión generada durante la digestión. Mezcle el contenido de los recipientes de reacción para combinar agua condensada y desaloje la materia insoluble. Dejar la materia suspendida se asienta y asegurar que la trayectoria de la luz del espectrofotómetro esté limpia. Mida la absorción de cada muestra en blanco y estándar a la longitud de onda seleccionada (420 nm o 600 nm). A 600 nm, use un blanco sin digerir como solución de referencia. Analizar un blanco digerido para confirmar buenos reactivos analíticos y para determinar el blanco de DQO; reste la DQO en blanco de la DQO de la muestra. Alternativamente, use un blanco digerido como la solución de referencia una vez que se establece que el blanco tiene un DQO bajo.

➤ Preparación de la curva de calibración

Prepare al menos cinco patrones de solución de la solución biftalato hidrógeno de potasio con DQO equivalentes para cubrir cada rango de concentración. Complétese el volumen con agua destilada; use los mismos volúmenes de reactivo, tubo o tamaño de ampolla y procedimiento de digestión que para las muestras. Preparar curva de calibración para cada nuevo lote de tubos o ampollas o cuando los estándares preparados difieren mayor a un 5% de la curva de calibración.

c. Determinación de TSS

(SMEWW- APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 21th Ed.2005.Solids, Suspended Solids Dried at 103-105 °C.)

✓ Equipos y materiales:

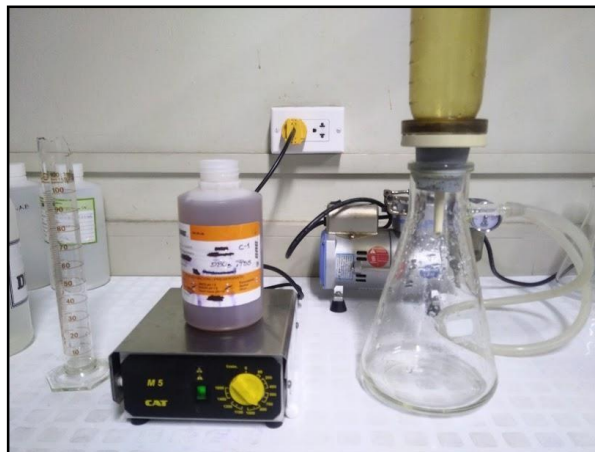


Figura 16. Equipo de filtración

Fuente: elaboración propia

- Filtros para análisis gravimétrico: AP40 Millipore o equivalente (como GF 1822047 ó 934AH Whatman)

- Estufa



Figura 17. Estufa

Fuente: elaboración propia

- Desecador con sílica azul como indicador colorimétrico de humedad
- Balanza analítica
- Agitador magnético
- Probetas de diferentes volúmenes

✓ Procedimiento:

Las condiciones ambientales no son críticas para la realización de este ensayo.

➤ Preparación del filtro de fibra de vidrio:

- Alistar la estufa a una temperatura entre 103-105 °C.
- Empleando grafito, marcar el filtro de forma inequívoca (ej.: mediante numeración consecutiva). - Colocar el filtro (con la cara rugosa hacia arriba), en el equipo de filtración. - Aplicar vacío y lavar el filtro con 3 porciones sucesivas de 20 mL de agua destilada.
- Mantener la filtración hasta la remoción total de las trazas de agua. Desechar el filtrado.

- Retirar el filtro, colocarlo en un papel de aluminio y secarlo en estufa a 103-105°C durante una hora.
 - Enfriar en el desecador hasta su empleo, pesar el filtro, y registrar los datos.
 - Repetir hasta que la variación del peso sea $< 4\%$ ó de 0.5 mg (lo que resulte menor). Anotar el peso del filtro (peso A).
- Análisis de la muestra:
- Esperar a que la muestra se encuentre a temperatura ambiente.
 - En función del aspecto de la muestra, seleccionar el volumen a filtrar (ver nota).
 - Coger el filtro previamente tarado del desecador, llevarlo al equipo de filtración e iniciar la succión.
 - Agitar la muestra adecuadamente y depositar el volumen seleccionado sobre el filtro.



Figura 18. Filtración de la muestra

Fuente: elaboración propia

- Una vez que la muestra haya terminado de filtrar, lavar 3 veces sucesivas con volúmenes de 10 mL de agua destilada dejando secar entre lavados.

- Retirar el filtro y llevarlo al papel de aluminio (al mismo donde se guardó en el desecador) y secarlo en la estufa a 103-105 °C durante una hora.



Figura 19. Secado de filtros en mufla

Fuente: elaboración propia

A criterio del analista, el secado puede extenderse (incluida toda la noche), cuando la apariencia física de la muestra denote presencia de grasa o alto contenido de sales.

- Enfriar en desecador, pesar el filtro y registrar los datos.

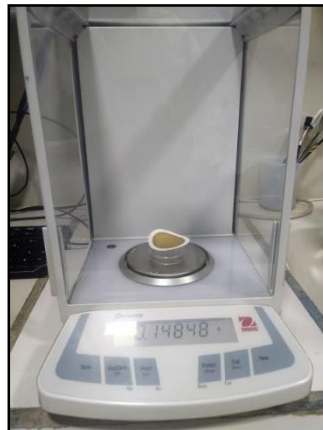


Figura 20. Pesado de filtros

Fuente: elaboración propia

- Repetir el ciclo de secado, enfriamiento, desecado y pesado, hasta que la variación del peso sea < 4% ó de 0.5 mg (lo que resulte menor). Anotar los pesos del filtro (peso B).

d. Determinación de pH

(SMEWW- APHA-AWWA-WEF Part 4500-H⁺, 21th Ed. 2005.pH Value. Electrometric Method)

- ✓ Equipos y materiales:
 - Sondeas multiparamétricas o pHmetros
- ✓ Reactivos:
 - Soluciones buffer o tampón de diferentes pH, preferiblemente 4, 7 y 10. Estas pueden estar ya listas o deben ser convenientemente diluidas según instrucciones del fabricante. En todo caso, deben ser trazables.
- ✓ Procedimiento:

Las condiciones ambientales no son críticas para la realización de este ensayo.

- Para mediciones in situ, el pH debe medirse en contacto directo con el cuerpo de agua. Si esta operación se complica y se obtenga una muestra con un dispositivo de muestreo (frasco, botella o balde), debe medirse lo más pronto posible directamente en dicho dispositivo para así reducir cualquier variación en la lectura.



Figura 21. Medición de pH de muestra

Fuente: elaboración propia

- Operar el equipo que resumidamente consiste en: conectar el aparato, verificar o realizar su ajuste, introducir el electrodo en la muestra de agua, agitar ésta suavemente para garantizar su homogeneidad y facilitar el equilibrio entre electrodo y muestra, presionar el botón de medida, esperar que se establezca el valor y leerlo. La agitación debe ser suave para minimizar entrada de dióxido de carbono que pudiera alterar el resultado.

e. Determinación de la turbiedad

(SMEWW- APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 21th Ed. 2005. Nephelometric Method)

✓ Equipos y materiales:

-Turbidímetro

-Tubos para la muestra: de vidrio transparente y limpio.

-Matraces aforados de 100 mL

-Pipetas aforadas de 5 y 10 mL

-Balanza analítica de 1 mg de precisión.

✓ Reactivos

- Sulfato de hidrazina grado reactivo.
- Hexametilentetramina grado reactivo
- Suspensión patrón primario de 4000 NTU.
- Suspensiones diluidas de turbiedad.

✓ Procedimiento:

- Deje que las muestras lleguen a temperatura ambiente.
- Agite las muestras en sus recipientes.
- Adicione cuidadosamente la muestra en la celda de tal manera que no forme burbujas. Tape la celda, enjuáguela, séquela y límpiela de tal manera que no quede suciedad, ni motas en sus paredes externas.
- Coloque la celda con muestra en el portacelda, asegúrese que la celda entre hasta el fondo del portacelda.
- Espere respuesta después de 6 segundos.
- Registre el dato en el formato respectivo

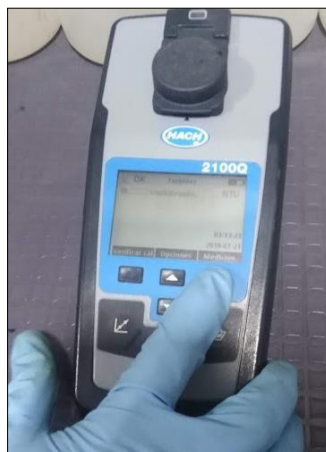


Figura 22. Medición de la turbiedad

Fuente: elaboración propia

D. Prueba de test de jarras: Se realizó con la adición de un polímero de aluminio (PAC), para encontrar la dosificación óptima a diferentes concentraciones y tiempo de agitación.



Figura 23. Coagulante policloruro de aluminio (PAC)

Fuente: elaboración propia

✓ PAC

$$\rho = 1.33 \text{ g/mL}$$
$$\%W/W = 19.66$$

Se tomaron diferentes volúmenes del concentrado y se adicionaron al recipiente de 1 L de la prueba de jarras, se procedió a determinar las concentraciones del coagulante

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

➤ $V=0.5 \text{ mL}$

$$1.33 \text{ g/mL} \times 0.1966 \times 0.5 \text{ mL} = C_1 \times 1000 \text{ mL}$$

$$C_1 = 0.0001307 \text{ g/mL}$$

$$C_1 = 130.7 \text{ mg/L}$$

➤ V=1 mL

$$1.33\text{g/mL} \times 0.1966 \times 1\text{ mL} = C_2 \times 1000\text{ mL}$$

$$C_2 = 0.0002614\text{ g/mL}$$

$$C_2 = 261.4\text{ mg/L}$$

➤ V=1.5 mL

$$1.33\text{g/mL} \times 0.1966 \times 1.5\text{ mL} = C_3 \times 1000\text{ mL}$$

$$C_3 = 0.0003922\text{ g/mL}$$

$$C_3 = 392.2\text{ mg/L}$$

➤ V=2 mL

$$1.33\text{g/mL} \times 0.1966 \times 2\text{ mL} = C_4 \times 1000\text{ mL}$$

$$C_4 = 0.0005229\text{ g/mL}$$

$$C_4 = 522.9\text{ mg/L}$$

Se realizó un mezclado rápido a 180 rpm por 10 min.



Figura 24. Mezclado rápido a 180 rpm

Fuente: elaboración propia

Luego una mezcla lenta de 100 rpm por 15 min.



Figura 25. Mezclado lento a 100 rpm

Fuente: elaboración propia

Por último, se dejó sedimentar la solución por 1 hora.



Figura 26. Sedimentación de las muestras

Fuente: elaboración propia

E. Simulación de la Sedimentación secundaria: Se realizó una prueba de sedimentación que nos permitió obtener una curva de sedimentación del agua residual tratada después de la coagulación química para ver la variación del sedimento con el tiempo.



Figura 27. Sedimentación secundaria al inicio

Fuente: elaboración propia



Figura 28. Sedimentación secundaria al final

Fuente: elaboración propia

F. Traslado de muestra después de la coagulación a laboratorio: Se trasladó en cooler de laboratorio, almacenado en frascos de PVC y con la ayuda de un refrigerante se mantuvo la temperatura a 5°C, se analizó parámetros fisicoquímicos como TSS, DQO y DBO₅ para así conocer la dosis óptima de coagulante

G. Diseño y construcción del equipo: Luego de conocer los parámetros óptimos mediante las pruebas y análisis de laboratorio se procedió a diseñar el equipo mediante cálculos matemáticos para así poder realizar los planos y finalmente mandar construir el equipo.

H. Pruebas en el equipo: Se realizó pruebas de todo el tratamiento iniciando con la toma de muestra y continuamente todas las pruebas anteriormente mencionadas para el tratamiento en sí.

➤ Coagulación química

Se realizó en un reactor batch de capacidad de 10 L, equipo del Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la Universidad del Callao, se trabajó a diferentes dosis de coagulante con un tiempo de 25 minutos de agitación



Figura 29. Adición de coagulante

Fuente: elaboración propia

Luego se dejó sedimentar por un tiempo de 1 hora



Figura 30. Muestra en sedimentación

Fuente: elaboración propia

Posteriormente se procedió a decantar la solución



Figura 31. Decantación de la muestra

Fuente: elaboración propia

➤ Electrocoagulación química

Se realizó en un reactor electroquímico tipo batch, a diferentes voltajes ($V=10V$, $12V$ y $14V$) y a diferentes concentraciones por un tiempo de reacción de 30 minutos.

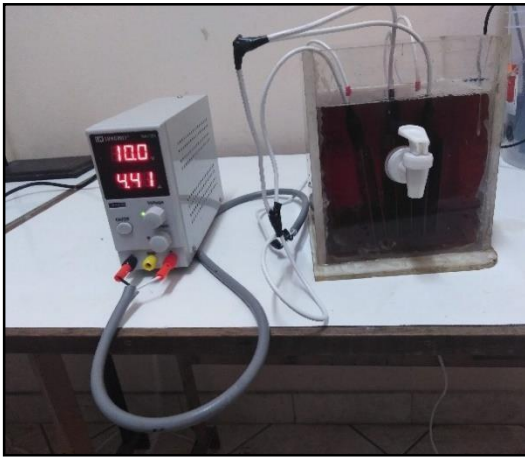


Figura 32. Electrocoagulación al inicio *Figura 33.* Electrocoagulación al final

Fuente: elaboración propia

Fuente: elaboración propia

- I. **Análisis de laboratorio de agua tratada:** Luego de finalizar todo el tratamiento, se tomó una muestra y de la misma manera se trasladó al laboratorio en unos coolers refrigerados a $5^{\circ}C$ para su análisis inmediato.



Figura 34. Extracción de muestras para análisis

Fuente: elaboración propia



Figura 35. Muestras para análisis

Fuente: elaboración propia

4.5.1. Descripción de la planta de tratamiento coagulación - electrocoagulación a escala laboratorio.

La planta consta de las siguientes etapas:

- 1) Tanque colector
- 2) Sedimentador primario
- 3) Tanque de agitación para la coagulación con policloruro de aluminio



Figura 36. Tanque de agitación

Fuente: elaboración propia

- 4) Sedimentador secundario

5) Reactor electroquímico con electrodos de acero

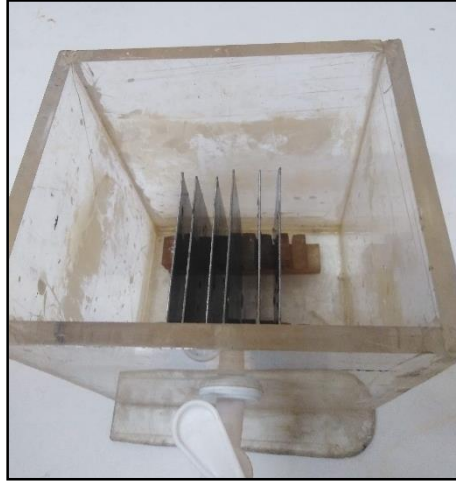


Figura 37. Reactor con electrodo de acero

Fuente: elaboración propia

6) Colector de agua tratada

Los materiales utilizados para la fabricación de los equipos y para el tratamiento coagulación - electrocoagulación son lo que a continuación se detalla:

- ✓ Tanque de plástico de 15L con válvula incluida.
- ✓ Acrílicos de 6mm de espesor para los sedimentadores, tanque de agitación de 7,5 L y el reactor electroquímico de 5L.
- ✓ Silicona para acrílico.
- ✓ Válvulas reguladoras de caudal.
- ✓ Electroodos de acero (10cm x 10cm)

- ✓ Fuente de 12 V CC



Figura 38. Fuente de poder
Fuente: elaboración propia

- ✓ Cables de conexión eléctrica

4.6. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información de campo

4.6.1. Actividades Pre-Muestreo

- ✓ Del cumplimiento de las guías de salud y seguridad

Tener ropa de protección, guantes, lentes de seguridad, botas, cascos; así como cualquier otro material o equipo que evite un accidente.

- ✓ Equipos y materiales
 - Potenciómetro (pH y Temperatura)
 - Envases para las muestras de acuerdo a los parámetros a evaluar
 - Preservantes.
 - Sistema de refrigeración (caja térmica con hielo o ice pack).

4.4.2. Procedimiento Del Muestreo

- ✓ Identificación del punto de muestreo

Se tomó la muestra en el cuerpo de agua después del proceso de desbaste del agua residual del camal Conchucos



Figura 39. Punto de muestreo

Fuente: elaboración propia

- ✓ La toma de muestra

Se revisó el tipo de recipiente a utilizar por parámetro a evaluar, así como el volumen mínimo de muestra necesario, los procedimientos de preservación y el tiempo que puede mantenerse la muestra preservada.

Los diferentes parámetros a evaluar se describen a continuación:

- pH, TSS DBO₅ y DQO

- ✓ Manipulación y preservación de la muestra

Tabla 6

Toma de muestra, preservación y tiempo de conservación para el análisis.

Parámetro por estudiar	Tipo de recipiente	Volumen de muestra	Técnica de preservación	Tiempo máximo de preservación recomendado antes del análisis
pH	P, V	50 mL	Analizar inmediatamente	15 min
Sólidos: TSS	P, V	1000 mL	Refrigerar a 4°C	7 días
DBO ₅	P, V	1000 mL	Refrigerar a 4°C	48 horas
DQO	P, V	100 mL	Analizar lo más pronto posible, o adicionar H ₂ SO ₄ hasta pH < 2. Refrigerar a 4°C	28 días (Si se preserva)

Fuente: (APHA,2012)

✓ Rotulación de la muestra

La muestra llegó al laboratorio con una identificación o etiquetado numerada. Los frascos y contenedores se rotularon correctamente; la rotulación se realizó en el frasco y no en la tapa.

4.4.3. Procedimientos De Post Muestreo

✓ Transporte Y Seguridad

Se transportó las muestras con cuidado, prestando atención que no se caigan o derramen. Las condiciones perfectas para transportar las muestras son: oscuridad y una temperatura entre 1 – 5 °C. Pero las muestras no deben estar congeladas. En circunstancias así las muestras son estables hasta 24 horas.

Se usaron bolsas de gel o paquetes fríos para conservar las muestras.

4.7. Análisis y procedimiento de datos

Se analizaron mediante el software MINITAB 19, el cual ayudó a identificar si los parámetros operacionales planteados influyeron significativamente en el tratamiento combinado de coagulación química y electrocoagulación

Los parámetros que se controlaron para el tratamiento fueron la dosis del coagulante (mg/L), el tiempo de reacción en la coagulación (min.), el voltaje del reactor electroquímico (V) y el tiempo de reacción en la electrocoagulación (min.), cuyos resultados de los análisis de los parámetros fisicoquímicos de DQO, DBO₅ y TSS se analizaron en la plataforma Excel, mediante representación gráficas de los datos

- a) Efecto de la dosis de coagulante en la remoción de contaminantes para DQO, DBO₅ y TSS
- b) Curva de sedimentación a diferentes dosis de coagulantes.
- c) Efecto del voltaje en la remoción de contaminantes para DQO, DBO₅ y TSS

V. RESULTADOS

5.1 Características fisicoquímicas del agua residual del afluente

Tabla 7
Caracterización del Agua residual

PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS
pH	6,89
DQO	mg/L	8050
DBO ₅	mg/L	3565
SST	mg/L	1260

Fuente: elaboración propia

Los análisis fueron realizados en el Laboratorio ENVIROTEST S.A.C., con fecha de entrega del 20 de Diciembre del 2018 y se entregó el informe el 02 de Enero de 2019.

5.2 Resultados del Test de Jarras

Se realizó un mezclado rápido a 180 rpm por 10 min. Luego un mezclado lento de 100 rpm por 15 min. y se dejó sedimentar la solución por 1 hora.

➤ Análisis de DQO

Se realizó la curva de calibración en Rango Alto para el análisis del DQO a diferentes concentraciones a partir de sal de Biftalato de potasio hidrogenado.

Tabla 8
Curva de Calibración del análisis del DQO

Std	Concentración(mg/L)	Absorbancia (600 nm)
Std-1	100	0,033
Std-2	200	0,059
Std-3	300	0,094
Std-4	400	0,121
Std-5	500	0,151
Std-6	700	0,213
Std-7	900	0,270

Fuente: elaboración propia

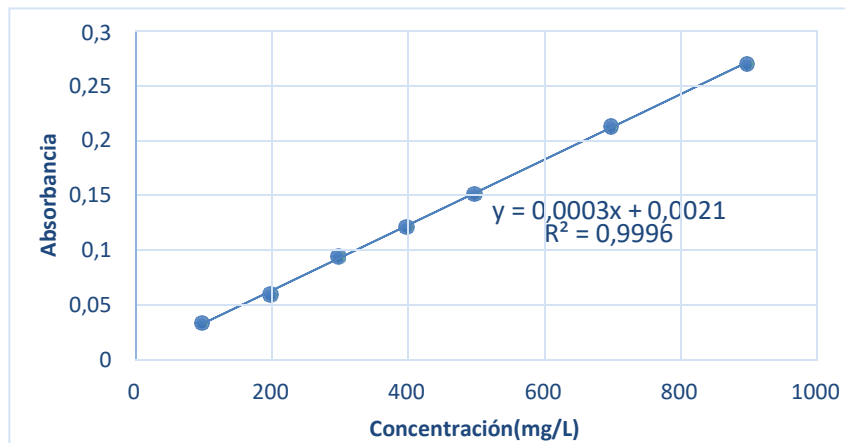


Figura 40. Curva de Calibración del análisis del DQO

Fuente: elaboración propia

De la Curva de calibración en la Figura 40 se sabe que:

$$Y = 0,0003X + 0,0021$$

Siendo:

$$X = \text{Concentracion (mg/L)}$$

$$Y = \text{Absorbancia}$$

Despejando

$$X = (Y - 0,0021)/0,0003$$

Considerando las absorbancias y las diluciones de la muestra inicial. Se determina el DQO para cada concentración de coagulante

$$DQO_{(mg/L)} = X * fd$$

Tabla 9

Resultado de prueba De Análisis de DQO después de la coagulación

Concentración de coagulante (ppm)	Volumen de alícuota(mL)	Volumen de aforo o total(mL)	Fd	Absorbancia (600 nm)	Resultado DQO mg O ₂ /L
130,7	20	100	5	0,1018	1662
261,4	20	100	5	0,0848	1378
392,2	20	100	5	0,0978	1595
522,9	20	100	5	0,1598	2628

Fuente: elaboración propia

➤ Análisis de DBO₅

Se realiza diferentes diluciones y por duplicado a la muestra inicial a diferentes concentraciones, se determina el Oxígeno disuelto al inicio y luego de la incubación por 5 días. Se determina el DBO₅ para cada concentración

$$DBO_{(mg/L)} = \frac{(OD)_f - (OD)_i}{V_a} \times V_t$$

Tabla 10

Resultado de prueba De Análisis de DBO₅ después de la coagulación

Concentración de coagulante (ppm)	Volumen de alícuota (mL)	Volumen de aforo total (mL)	Oxígeno Inicial (mg/L)	Oxígeno Final (mg/L)	Diferencia de Oxígeno	DBO ₅ (mg/L)	Resultado DBO ₅ (mg/L)
130,7	6	1000	8,40	3,62	4,78	796,7	796,7
	10	1000	8,23	0,75	7,48	
261,4	6	1000	8,60	4,60	4,00	666,67	640,8
	10	1000	8,20	2,05	6,15	615	
392,2	6	1000	8,25	4,17	4,08	680	656
	10	1000	8,31	1,99	6,32	632	
522,9	6	1000	8,19	3,13	5,06	843,33	740,7
	10	1000	8,35	1,97	6,38	638	

Fuente: elaboración propia

➤ Análisis de TSS

Se toma muestras representativas para cada concentración, por diferencia de peso de filtros se determina el TSS para cada concentración de coagulante.

$$TSS_{(mg/L)} = \frac{W_2 - W_1}{V_m} \times 1000$$

Tabla 11

Resultado de prueba De Análisis de TSS después de la coagulación

Concentración de coagulante (ppm)	Volumen de muestra (mL)	Peso inicial(g)	Peso final(g)	Resultado TSS mg/L
130,7	70	0,10807	0,10956	120,7
261,4	50	0,10956	0,11376	84
392,2	20	0,10883	0,11175	146
522,9	10	0,11012	0,11255	243

Fuente: elaboración propia

➤ Análisis de Turbiedad

Tabla 12

Resultado del análisis de Turbiedad después de la coagulación

Muestra	Concentración de coagulante (ppm)	Fd	NTU	Resultado NTU
1	130,7	1	19,6	20
2	261,4	1	10,3	10
3	392,2	1	128	128
4	522,9	1	330	330

Fuente: elaboración propia

➤ Resumen de los resultados de análisis en la prueba de Test de Jarras

Tabla 13

Resumen de los resultados de análisis en la prueba de Test de Jarras

Muestra	Concentración de coagulante (ppm)	DQO (ppm)	DBO ₅ (ppm)	TSS (ppm)	Turbiedad NTU
1	130,7	1662	796,7	120,7	20
2	261,4	1378	640,8	84	10
3	392,2	1595	656	146	130
4	522,9	2628	740,7	243	330

Fuente: elaboración propia

5.2.1. Análisis de Turbiedad a diferentes Concentraciones

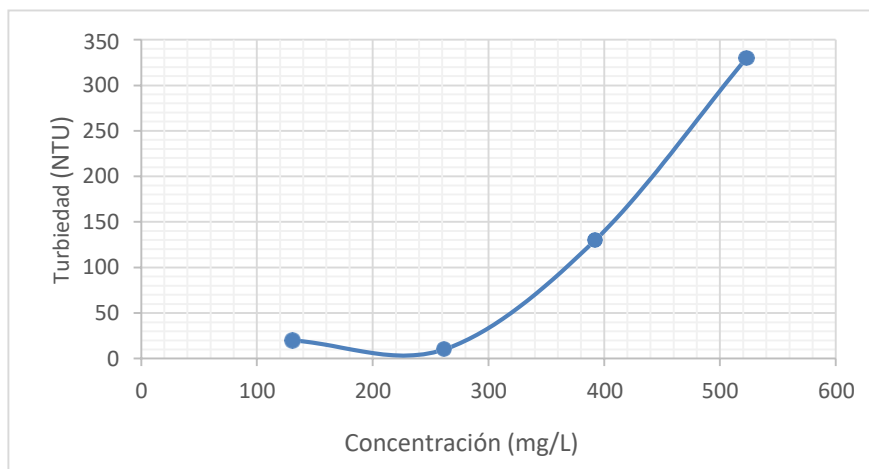


Figura 41. Curva de Concentración vs Turbiedad
Fuente: elaboración propia

5.2.2. Efecto de la dosis de coagulante en la remoción de contaminantes

$$\%R_c = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\%$$

Tabla 14

Concentración vs Porcentaje de remoción de contaminantes

Muestra	Concentración de coagulante (ppm)	$\%R_{DQO}$	$\%R_{DBO_5}$	$\%R_{TSS}$
1	130,7	79,35	77,65	90,42
2	261,4	82,88	82,03	93,33
3	392,2	80,19	81,6	88,41
4	522,9	67,35	79,22	80,71

Fuente: elaboración propia

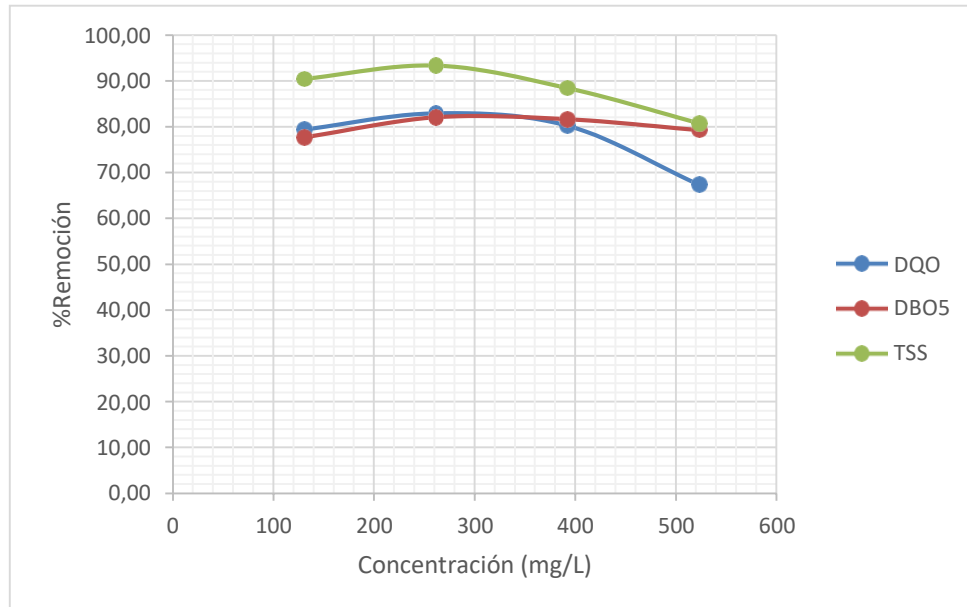


Figura 42. Efecto de la dosis de coagulante en la remoción de Contaminantes.

Fuente: elaboración propia

5.3 Resultado de la Curva de Sedimentación

Se tomaron datos de la altura del sedimento en la solución cada intervalo de 5 minutos para cada concentración

Tabla 15

Resultado de la altura de sedimento de cada concentración vs tiempo

T (min)	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	H4 (cm)
5	17,4	18,1	17,7	5,7
10	13,3	17,5	14,4	4,6
15	11,4	17,1	12,4	4,2
20	9,5	16,2	10,5	3,8
25	8,6	15,2	9,5	3,6
30	7,8	14,3	8,9	3,6
35	7,4	13,1	8,6	3,4
40	7	12,2	8,2	3,2
45	6,7	11,2	7,6	3,2
50	6,3	10,5	7,4	3
55	6,1	10,1	7,2	3
60	5,7	9,1	6,8	2,9

Fuente: elaboración propia

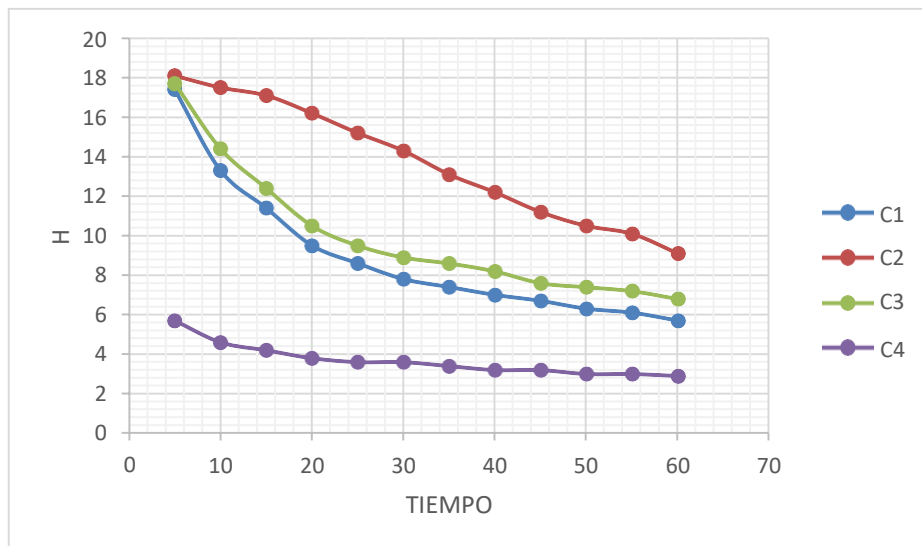


Figura 43. Curva de sedimentación a diferentes dosis de coagulantes

Fuente: elaboración propia

5.4 Resultado de la Electrocoagulación

➤ Análisis de DQO

Tabla 16

Resultado de la prueba De Análisis de DQO después de la electrocoagulación

Concentración de coagulante (ppm)	Voltaje (V)	Volumen de alícuota(mL)	Volumen de aforo o total(mL)	Fd	Absorbancia (600 nm)	Resultado DQO mg O ₂ /L
130,7	10	100	100	1	0,1198	392,3
130,7	12	100	100	1	0,1118	365,7
130,7	14	100	100	1	0,1188	389
261,4	10	100	100	1	0,1048	342,3
261,4	12	100	100	1	0,0910	296,3
261,4	14	100	100	1	0,0998	325,7
392,2	10	100	100	1	0,1144	374,3
392,2	12	100	100	1	0,1057	345,4
392,2	14	100	100	1	0,1066	348,2

Fuente: elaboración propia

➤ Análisis de DBO₅

Tabla 17
Resultado de prueba De Análisis de DBO₅ después de la electrocoagulación

Concentración de coagulante (ppm)	Voltaje (V)	Volumen de alícuota(mL)	Volumen de aforo total(mL)	Oxígeno Inicial (mg/L)	Oxígeno Final (mg/L)	Resultado DBO (mg/L)
130,7	10	30	1000	8,50	2,84	188,7
	12	30	1000	8,50	3,44	168,7
	14	30	1000	8,50	3,18	177,3
261,4	10	30	1000	8,50	3,71	159,7
	12	30	1000	8,50	4,47	134,3
	14	30	1000	8,50	3,87	154,3
392,2	10	30	1000	8,50	3,53	165,6
	12	30	1000	8,50	3,99	150,4
	14	30	1000	8,50	3,63	162,3

Fuente: elaboración propia

➤ Análisis de TSS

Tabla 18

Resultado de prueba De Análisis de TSS después de la electrocoagulación

Concentración de coagulante (ppm)	Voltaje (V)	Volumen de muestra (mL)	Peso inicial(g)	Peso final(g)	Resultado TSS mg/L
130,7	10	90	0,10821	0,11411	65,6
130,7	12	90	0,10843	0,11402	62,1
130,7	14	90	0,10911	0,11512	66,8
261,4	10	100	0,10865	0,11314	44,9
261,4	12	100	0,10876	0,11285	40,9
261,4	14	100	0,10903	0,11330	42,7
392,2	10	80	0,10875	0,11557	85,2
392,2	12	80	0,10921	0,11499	72,3
392,2	14	80	0,10844	0,11466	77,8

Fuente: elaboración propia

➤ Resumen del resultado de los análisis después de la Electrocoagulación

Tabla 19

Resumen del resultado de los análisis después de la Electrocoagulación

Concentración de coagulante (ppm)	Voltaje (V)	DQO (ppm)	DBO ₅ (ppm)	TSS (ppm)
	10	392,3	188,7	65,6
130,7	12	365,7	168,7	62,1
	14	389	177,3	66,8
	10	342,3	159,7	44,9
261,4	12	296,3	134,3	40,9
	14	325,7	154,3	42,7
	10	374,3	165,6	85,2
392,1	12	345,4	150,4	72,3
	14	348,2	162,3	77,8

Fuente: elaboración propia

5.4.1. Efecto del voltaje en la remoción de contaminantes

$$\%R_c = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\%$$

Tabla 20

Voltaje vs Porcentaje de remoción de contaminantes de diferentes Concentraciones

Concentración de coagulante (ppm)	Voltaje (V)	$\%R_{DQO}$	$\%R_{DBO_5}$	$\%R_{TSS}$
130,7	10	76,4	76,31	45,65
	12	78	78,83	48,55
	14	76,59	77,75	44,66
261,4	10	75,16	75,08	46,55
	12	78,50	79,04	51,31
	14	76,36	75,92	49,17
392,1	10	76,53	74,76	41,64
	12	78,34	77,07	50,48
	14	78,17	75,26	46,71

Fuente: elaboración propia

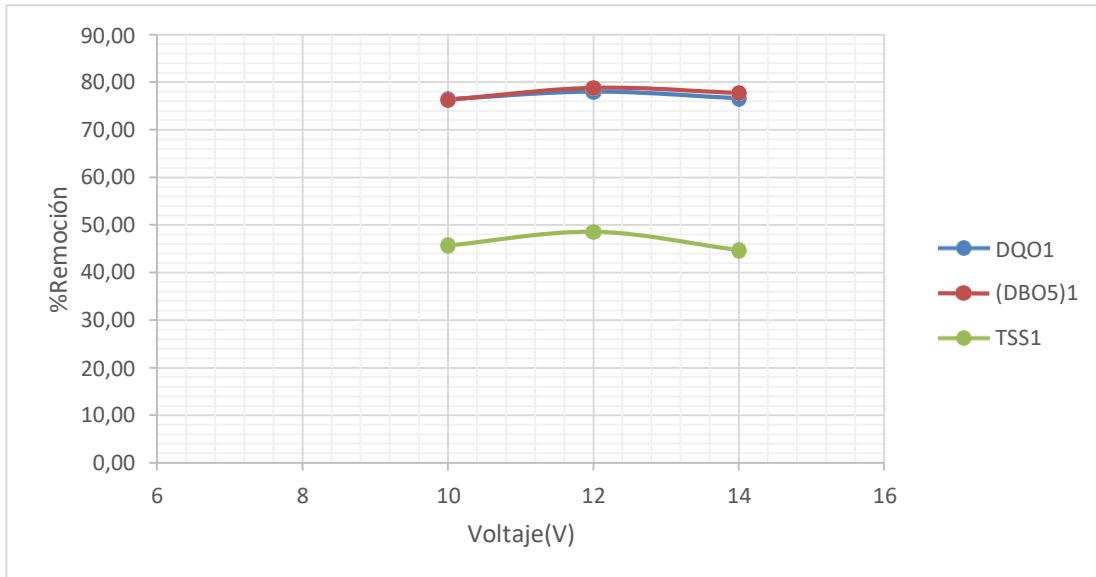


Figura 44. Voltaje vs Porcentaje de remoción de contaminantes de C1 (130,7 mg/L)

Fuente: elaboración propia

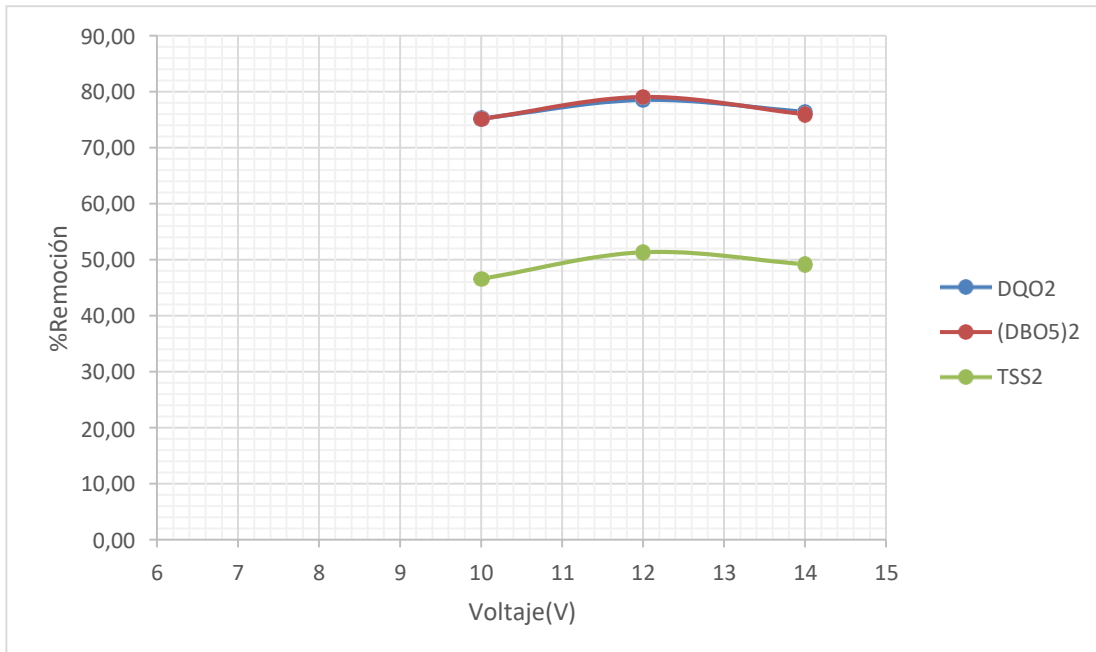


Figura 45. Voltaje vs Porcentaje de remoción de contaminantes de C2(261,4 mg/L)

Fuente: elaboración propia

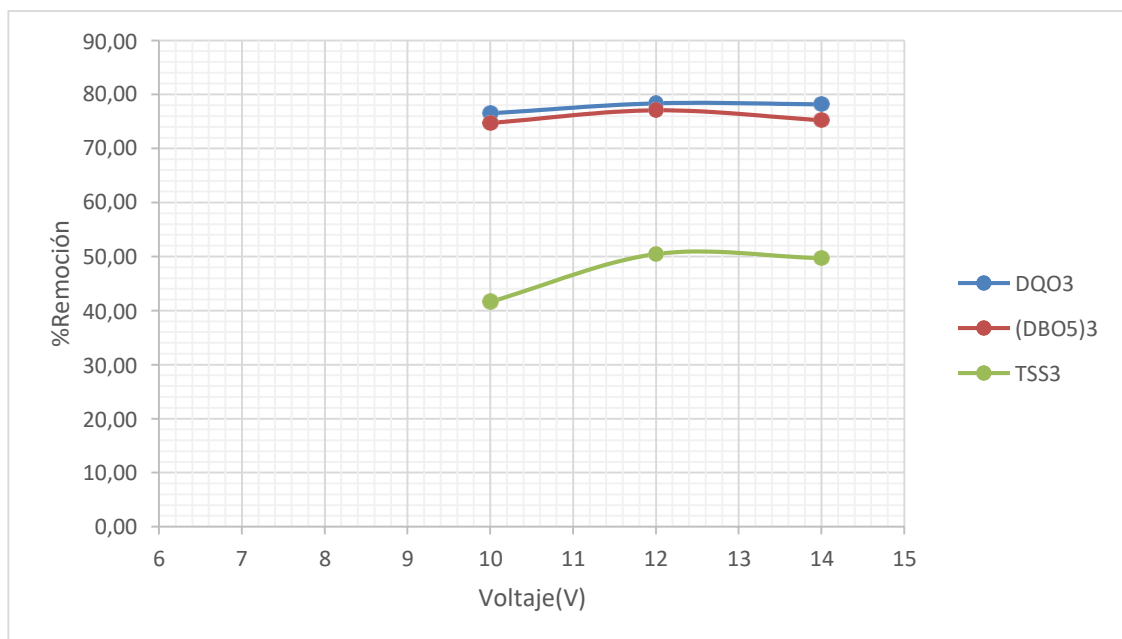


Figura 46. Voltaje vs Porcentaje de remoción de contaminantes de C3(392,1 mg/L)

Fuente: elaboración propia

5.5. Resultados del análisis estadístico de las pruebas experimentales

Regresión Factorial General

A) % DQO vs Concentración (ppm), Voltaje(V)

Tabla 21

Análisis de Varianza en el %DQO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Concentración	2	1.585	0.7924	1.94	0.257
Voltaje	2	7.620	3.8101	9.34	0.031
Error	4	1.631	0.4078		
Total	8	10.836			

Fuente: Programa estadístico Minitab 19

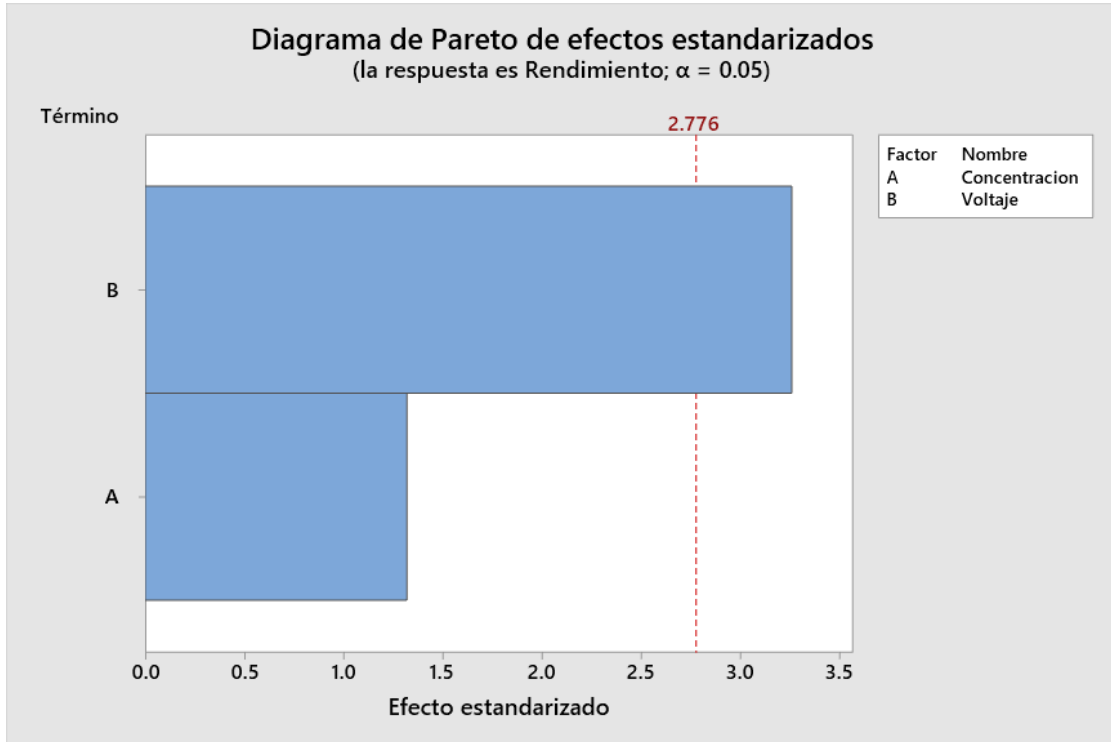


Figura 47. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados en el %DQO
Fuente: Programa estadístico Minitab 19

El efecto del Factor B (Voltaje) es estadísticamente significativo ya que cruza la línea de referencia obtenida a partir del nivel de significancia ($\alpha = 0.05$) en el software Minitab 19 y presenta un valor p ($0.031 < 0.05$), en cambio el Efecto A (Concentración) no es estadísticamente significativo ya que no cruza la línea de referencia y presenta un valor p ($0.257 > 0.05$)

Tabla 22
Resumen del Modelo en el %DQO

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.638579	84.95%	69.89%	23.80%

Fuente: Programa estadístico Minitab 19

Tabla 23
Coefficientes en el %DQO

Termino	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	77.117	0.213	362.29	0.000	
Concentracion					
130.7	-0.120	0.301	-0.40	0.711	1.33
261.4	-0.443	0.301	-1.47	0.215	1.33
Voltaje					
10	-1.087	0.301	-3.61	0.023	1.33
12	1.163	0.301	3.86	0.018	1.33

Fuente: Programa estadístico Minitab 19

Tabla 24
Parámetros Experimentales en el %DQO

Parámetros	Notación 1	Notación 2	Valores
Concentración(ppm)	X1	X11	130.7
		X12	261.4
		X13	392.1
Voltaje (V)	X2	X21	10
		X22	12
		X23	14

Fuente: Programa estadístico Minitab 19

Ecuación de Regresión

$$\%DQO = 77.117 - 0.120 \cdot X11 - 0.443 \cdot X12 + 0.563 \cdot X13 - 1.087 \cdot X21 + 1.163 \cdot X22 - 0.077 \cdot X23$$

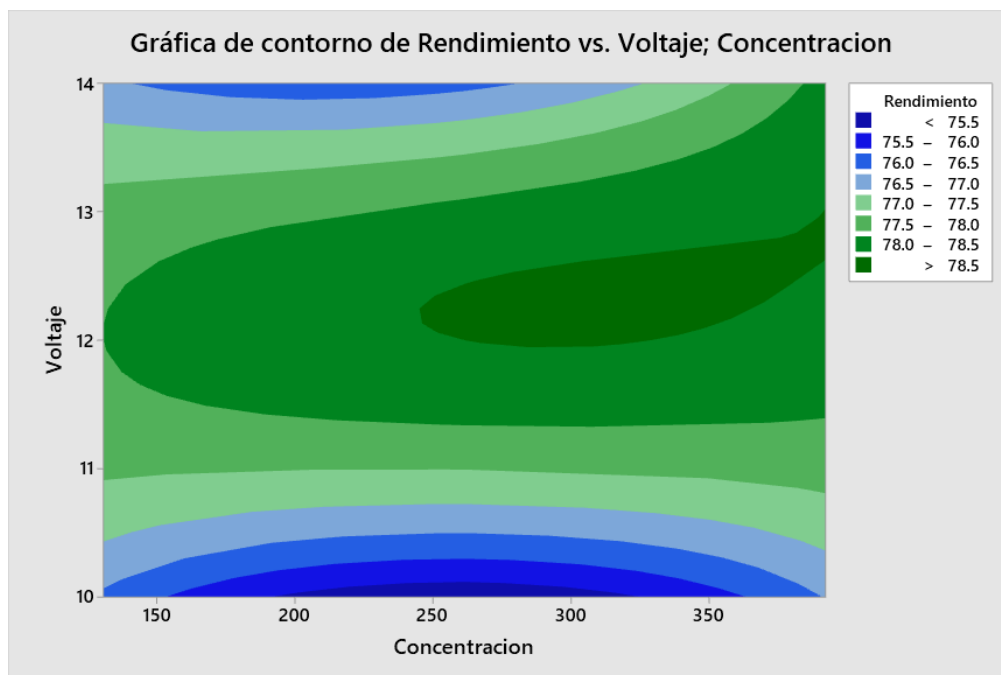


Figura 48. Gráfica de contorno del % Remoción DQO
 Fuente: Programa estadístico Minitab 19

Los valores más altos para el porcentaje de remoción de DQO se encuentran en la parte media derecha de la gráfica, que coincide con los valores altos de Concentración y valores medios en el Voltaje.

Los valores más bajos para el porcentaje de remoción de DQO se encuentran en la parte inferior media de la gráfica, que coincide con los valores medios de Concentración y bajos en el Voltaje.

B) % DBO vs Concentración (ppm), Voltaje(V)

Tabla 25
Análisis de Varianza en el %DBO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Concentración	2	5.607	2.8036	8.00	0.040
Voltaje	2	13.457	6.7285	19.21	0.009
Error	4	1.401	0.3503		
Total	8	20.465			

Fuente: Programa estadístico Minitab 19

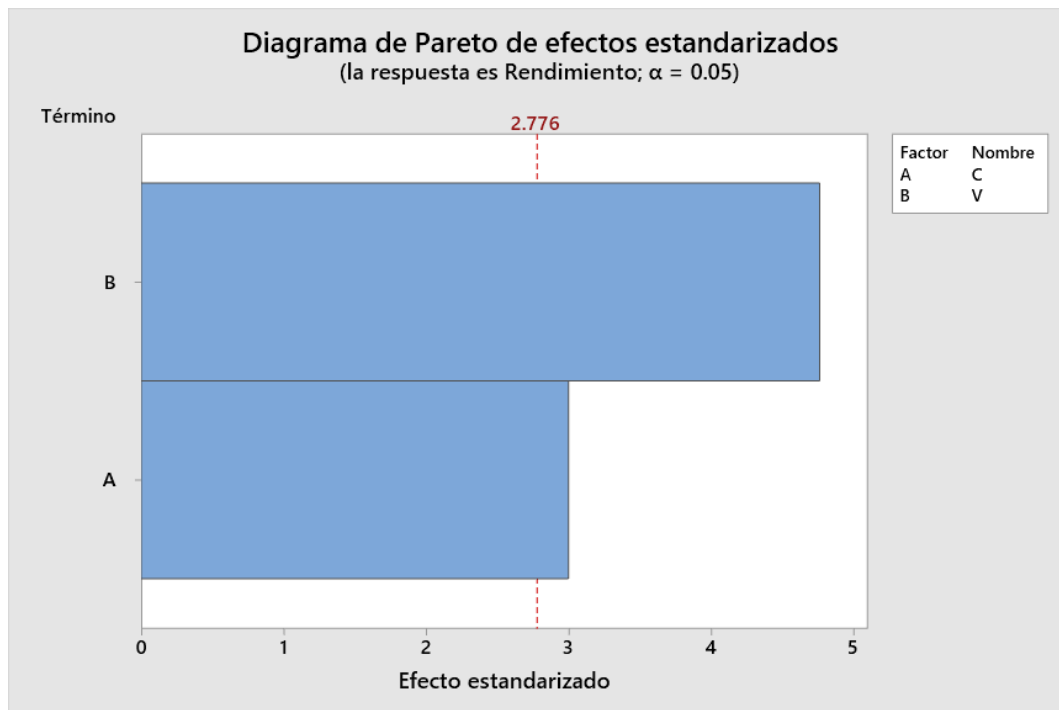


Figura 49. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados en el %DBO
Fuente: Programa estadístico Minitab 19

El efecto del Factor B (Voltaje) es estadísticamente significativo ya que cruza la línea de referencia obtenida a partir del nivel de significancia ($\alpha = 0.05$) en el software Minitab 19 y presenta un valor p ($0.009 < 0.05$), al igual que el Efecto A (Concentración) es significativo ya que cruza la línea de referencia y presenta un valor p ($0.040 < 0.05$)

Tabla 26
Resumen del Modelo en el %DBO

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.591843	93.15%	86.31%	65.34%

Fuente: Programa estadístico Minitab 19

Tabla 27
Coeficientes en el %DBO

Termino	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	76.669	0.197	388.63	0.000	
Concentración					
130.7	0.961	0.279	3.44	0.026	1.33
261.4	0.011	0.279	0.04	0.970	1.33
Voltaje					
10	-1.286	0.279	-4.61	0.010	1.33
12	1.644	0.279	5.89	0.004	1.33

Fuente: Programa estadístico Minitab 19

Tabla 28
Parámetros Experimentales en el %DBO

Parámetros	Notación 1	Notación 2	Valores
Concentración(ppm)	X1	X11	130.7
		X12	261.4
		X13	392.1
Voltaje (V)	X2	X21	10
		X22	12
		X23	14

Fuente: Programa estadístico Minitab 19

Ecuación de Regresión

$$\%DQO = 76.669 + 0.961 \cdot X_{11} + 0.011 \cdot X_{12} - 0.972 \cdot X_{13} - 1.286 \cdot X_{21} + 1.644 \cdot X_{22} - 0.359 \cdot X_{23}$$

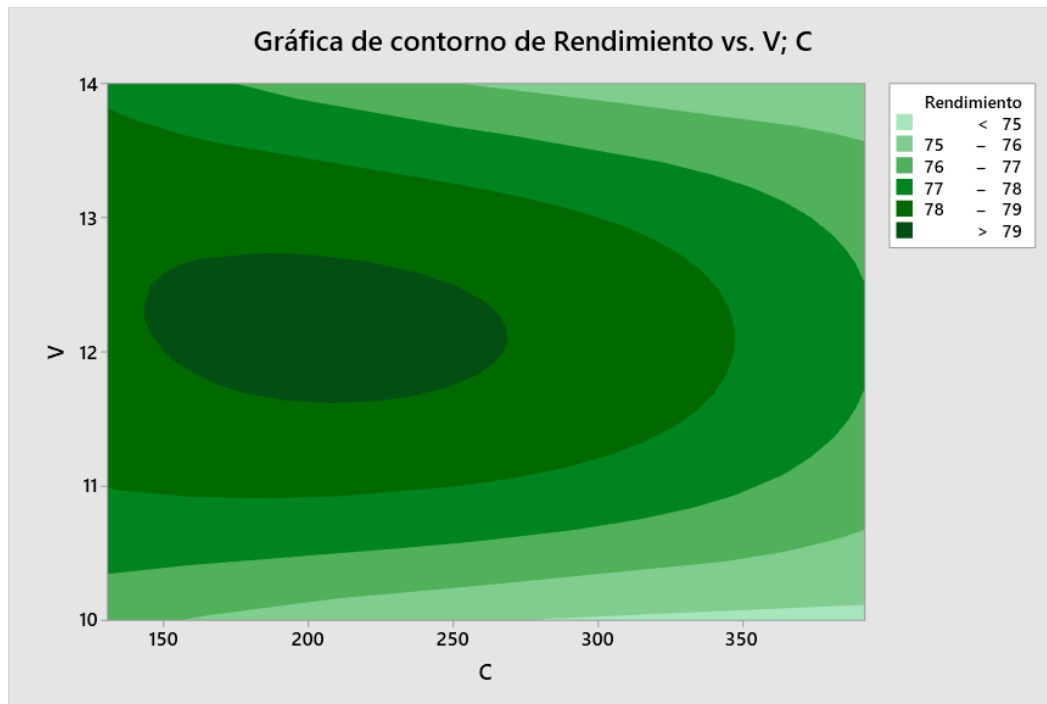


Figura 50. Grafica de contorno del % Remoción DBO
 Fuente: Programa estadístico Minitab 19

Los valores más altos para el porcentaje de remoción de DBO se encuentran en la parte media izquierda de la gráfica, que coincide con los valores bajos de Concentración y valores medios en el Voltaje.

Los valores más bajos para el porcentaje de remoción de DBO se encuentran en la parte inferior derecha de la gráfica, que coincide con los valores altos de Concentración y bajos en el Voltaje.

C) % TSS vs Concentración (ppm), Voltaje(V)

Tabla 29
Análisis de Varianza en el %TSS

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Concentración	2	14.89	7.444	2.29	0.217
Voltaje	2	45.91	22.954	7.07	0.049
Error	4	12.99	3.247		
Total	8	73.78			

Fuente: Programa estadístico Minitab 19

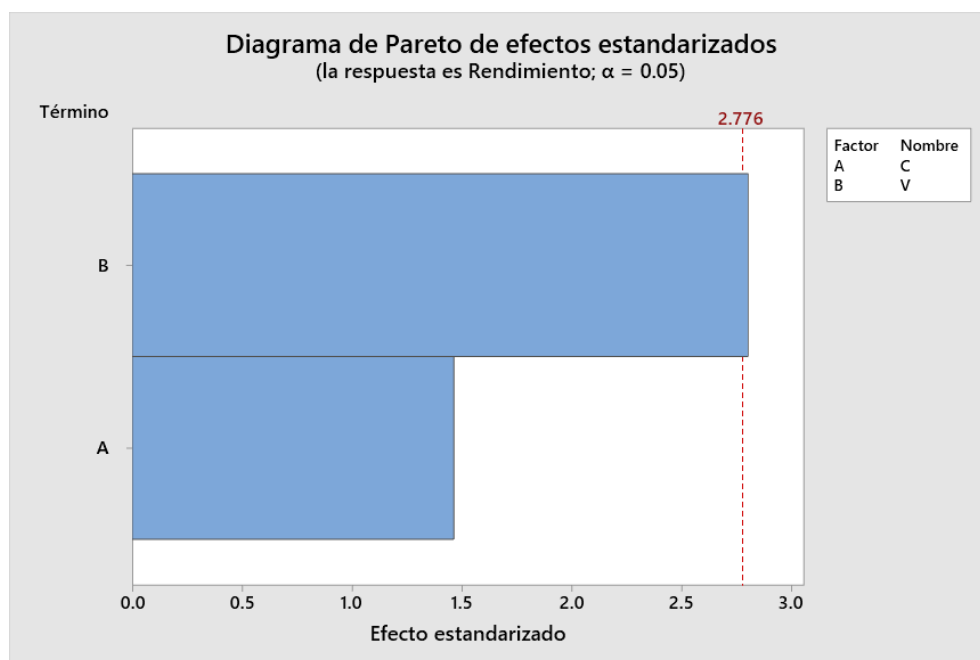


Figura 51. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados en el %TSS
Fuente: Programa estadístico Minitab 19

El efecto del Factor B (Voltaje es estadísticamente significativo ya que cruza la línea de referencia obtenida a partir del nivel de significancia ($\alpha = 0.05$) en el software Minitab 19 y presenta un valor p ($0.049 < 0.05$), en cambio el Efecto A (Concentración) no es significativo ya que no cruza la línea de referencia y presenta un valor p ($0.2,17 > 0.05$)

Tabla 30
Resumen del Modelo en el %TSS

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.591843	82.40%	64.80 %	10.89%

Fuente: Programa estadístico Minitab 19

Tabla 31
Coeficientes en el %TSS

Termino	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	47.191	0.601	78.57	0.000	
Concentracion					
130.7	-0.904	0.849	-1.06	0.347	1.33
261.4	1.819	0.849	2.14	0.099	1.33
Voltaje					
10	-2.578	0.849	-3.03	0.039	1.33
12	2.922	0.849	3.44	0.026	1.33

Fuente: Programa estadístico Minitab 19

Tabla 32
Parámetros Experimentales en el %TSS

Parámetros	Notación 1	Notación 2	Valores
Concentración(ppm)	X1	X11	130.7
		X12	261.4
		X13	392.1
Voltaje (V)	X2	X21	10
		X22	12
		X23	14

Fuente: Programa estadístico Minitab 19

Ecuación de Regresión

$$\%DQO = 47.191 - 0.904 \cdot X11 + 1.819 \cdot X12 - 0.914 \cdot X13 - 2.578 \cdot X21 + 2.922 \cdot X22 - 0.344 \cdot X23$$

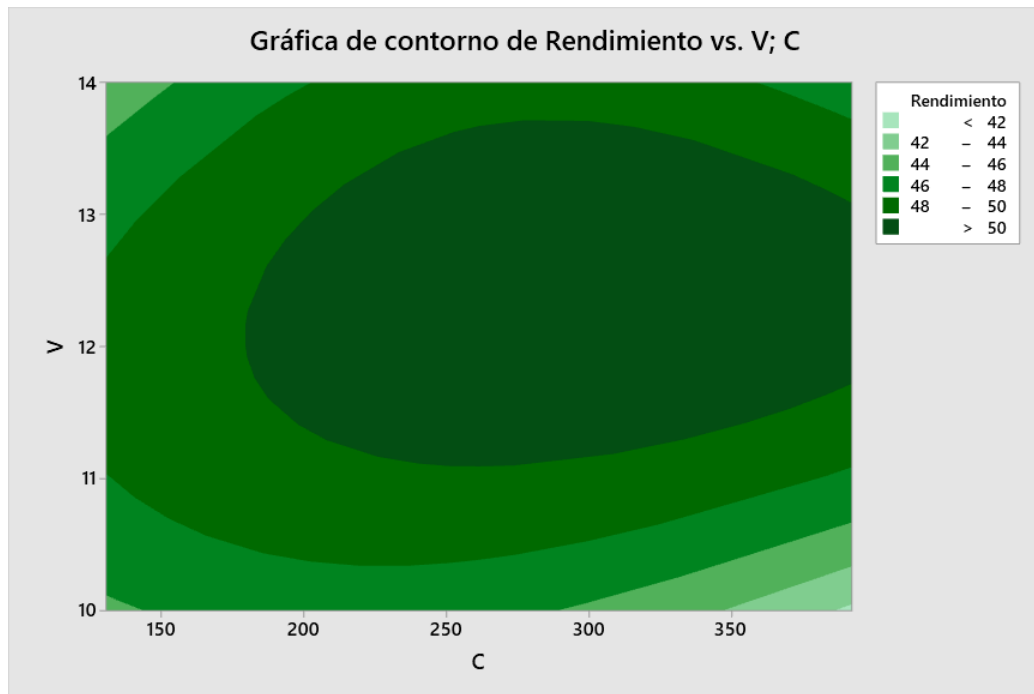


Figura 52. Grafica de contorno del % Remoción TSS
 Fuente: Programa estadístico Minitab 19

Los valores más altos para el porcentaje de remoción de TSS se encuentran en la parte media derecha de la gráfica, que coincide con los valores altos de Concentración y valores medios en el Voltaje.

Los valores más bajos el porcentaje de remoción de TSS se encuentran en la parte inferior derecha de la gráfica, que coincide con los valores altos de Concentración y bajos en el Voltaje.

5.6. Resultados de los valores para los parámetros óptimos encontrados.

Tabla 33

Condiciones óptimas de los parámetros operacionales

Parámetros óptimos	Valores
Concentración(ppm)	261.4
Voltaje (V)	12

Fuente: elaboración propia a partir de los análisis estadístico

5.7. Calculo del diseño del electrocoagulador

Se realizó el diseño para una celda con 8 placas de acero inoxidable de dimensiones de (10 x 10) cm

$$N_{EC} = 8$$

$$\delta = 2,5 \text{ mm}$$

$$l = 1 \text{ cm}$$

δ = Espesor de electrodo

l = Distancia entre electrodos

- ✓ El largo del sistema de electrodos (b_{st})

$$b_{st} = N_{EC} \delta + (N_{EC} - 1)$$

$$b_{st} = 8 \times 2,5mm + (8 - 1)1cm$$

$$b_{st} = 9 \text{ cm}$$

- ✓ El largo del reactor (B)

$$B = b_{st} + 2b^l$$

b^l = Espacio entre el sistema de electrodo y la pared del reactor

$$\text{Asumiendo } b^l = 3cm$$

$$B = 9 \text{ cm} + 2 \times 3cm$$

$$B = 15 \text{ cm}$$

- ✓ El ancho del reactor (L)

$$L = b + 2b^l$$

b = Ancho del electrodo

Asumiendo b = 10 cm

$$L = 10 \text{ cm} + 2 \times 3cm$$

$$L = 16 \text{ cm}$$

- ✓ Área ocupada por el reactor (A, m²)

$$A = B \times L$$

$$A = 15cm \times 16cm$$

$$A = 240 \text{ cm}^2$$

- ✓ Volumen del reactor (V, m³)

$$V = A \times H$$

Asumiendo H = 20cm

$$V = 240 \text{ cm}^2 \times 20 \text{ cm}$$

$$V = 4800 \text{ cm}^3 \langle \rangle 4,8 \text{ L}$$

VI. DISCUSION DE RESULTADOS

6.1. Contratación y demostración de la hipótesis con los resultados

- a) Se demuestra que el proceso de tratamiento del agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química con polímero de aluminio seguido del proceso de electrocoagulación con electrodos de acero, reduce significativamente la concentración de contaminantes, se observa en la Tabla 19, en las condiciones óptimas de operación (DQO=296,3 mg/L, DBO₅=134,3 mg/L y TSS=40,9 mg/L) cumpliendo con la normativa vigente y así puede ser vertido a los cuerpos de agua sin problemas al medio ambiente.

- b) Se puede observar los resultados de la caracterización fisicoquímica del agua residual del camal de Conchucos en la Tabla 7, cuyos valores son pH=6,89, DQO=8050 mg/L, DBO₅=3565 mg/L y TSS= 1260 mg/L, se comprueba que superan los Valores Máximos Admisibles del D.S. N°010-2019 - VIVIENDA. “Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para la descarga de Aguas Residuales No Domésticas en el Sistema de Alcantarillado Sanitario”. (1000mg/L para DQO, 500mg/L para DBO₅ y 500 mg/L para TSS)

- c) Se encontró las condiciones más favorables del tratamiento de agua residual en la coagulación química, de la Figura 42, a 25 minutos de tiempo de agitación y a 261,4 ppm de concentración de coagulante se da un mayor

porcentaje de remoción de contaminantes (DQO=82.88%, DBO₅ =82.03% y TSS=93.33%), además en la Figura 41, se observa una mayor reducción de la turbiedad a esa concentración; en el proceso de la electrocoagulación, trabajando con 6 electrodos de acero, con 1 cm de distancia entre electrodos, se observa en la Tabla 20, a 30 minutos de tiempo de reacción, 261,4 ppm de concentración de coagulante y 12V de tensión, se da un mayor porcentaje de remoción de contaminantes. (DQO=78.5%, DBO₅=79.04% y TSS=51.31%),

6.2. Contratación de los resultados con otros estudios similares

De una serie de trabajos relacionados al tratamiento de agua residuales mediante electrocoagulación está el de Aguilar (2015). En su tesis de magister de Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua, con valores óptimos de operación con una intensidad de corriente $I = 5$ amperios, con el pH natural del efluente de 7,12 y un tiempo de tratamiento de 15 minutos, determinó una eficiencia promedio del 87 % en la remoción de la DQO, valor similar en el presente estudio (78,5 % en remoción de DQO); además se puede mencionar a Bazrafshan y otros, (2012) que realizaron un trabajo de investigación de Tratamiento de aguas residuales en mataderos mediante procesos combinados de coagulación química y electrocoagulación, en condiciones óptimas en adición de 100 mg/L de Policloruro de Aluminio(PAC) y el voltaje aplicado 40 V, obtuvieron la eliminación del más del 99% del DQO y DBO₅,

valores no muy cercanos en el presente estudio, considerando la variabilidad de la concentración de los contaminantes del agua residual sin tratar.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

Los autores del presente informe, declaramos que reconocemos los reglamentos y procedimientos vigentes establecidos por la Universidad Nacional del Callao y nos responsabilizamos por la información emitida en el presente informe de tesis: Tratamiento de agua residual del Camal Conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación, para optar el título profesional de Ingeniero Químico, lo cual, se desarrolló en cumplimiento de los aspectos metodológicos, éticos, administrativos, legales y de propiedad intelectual de los proyectos de investigación, sometiéndonos a ser sancionado si actuamos en contra de lo establecido.

VII. CONCLUSIONES

- a) Se desarrolló el proceso de tratamiento del agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química con polímero de aluminio (PAC) seguido de electrocoagulación con electrodos de acero, reduciendo la concentración de contaminantes de DQO (296,3 mg/L), DBO₅ (134,3 mg/L) y TSS (40,9 mg/L) en condiciones óptimas de operación, con un porcentaje de remoción del 78.5%, 79.04% y 51.31% respectivamente.

- b) Se identificó las características físicas y químicas del agua residual del camal Conchucos al inicio del tratamiento, cuyos valores son: pH (6,89), DQO (8050 mg/L), DBO₅ (3565 mg/L) y TSS (1260 mg/L), se comprueba que superan los Valores Máximos Admisibles del D.S.010-2019-VIVIENDA. “Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para la descarga de Aguas Residuales No Domésticas en el Sistema de Alcantarillado Sanitario”.

- c) Se determinó las condiciones más favorables del tratamiento de agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación que son la concentración de coagulante a 261,4 ppm, tiempo de agitación de 25 minutos, en la coagulación química; la tensión de 12 V y el tiempo de reacción de 30 minutos en la electrocoagulación, trabajando con 6 electrodos de acero, con 1 cm de distancia entre electrodos.

d) Se Identificó las características físicas y químicas del agua residual del camal Conchucos al final del tratamiento: DQO (296,3 mg/L), DBO₅ (134,3 mg/L) y TSS (40,9 mg/L) con valores inferiores a los Valores Máximos Admisibles del D.S. N°010-2019- VIVIENDA.

VIII. RECOMENDACIONES

- a) El muestreo es la etapa más importante antes de empezar el proceso, ya que de ello depende los resultados de las características fisicoquímicas del afluente y de las demás etapas, para así encontrar los valores más óptimos para el proceso de tratamiento del agua residual, para lo cual se debe realizar cumpliendo los procedimientos, así como su traslado al laboratorio para su análisis.
- b) El proceso propuesto servirá como referencia para construir un proceso continuo, diseñando cada equipo de acuerdo a la capacidad de descarga de la planta. En este sistema continuo el reactor electroquímico es el equipo principal ya que allí se realizan las reacciones principales que degradarán los parámetros hasta concentraciones inferiores a los VMA.
- c) Determinar en proceso continuo el costo de procesamiento ya que utilizamos insumos químicos, como los coagulantes y los electrodos, y el consumo Amper-hora, además se sugiere realizar un estudio de la eficiencia de la corriente eléctrica para no generar reacciones secundarias no deseadas.
- d) En la construcción del reactor electroquímico se necesitará un medidor de voltaje y amperaje de mayor exactitud (multímetro digital), para tener un mayor control del proceso, además se propone un tratamiento terciario mediante carbón activado después de la electrocoagulación para reducir el color, el olor y otras propiedades organolépticas del agua tratada.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Aguilar, E. A. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua.* (tesis para optar el grado de magíster). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú.

APHA-AWWA-WEF. (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* (22nd Ed.) Washington: American Public Health Association.

Barboza, G. I. (2011). *Reducción de la carga de contaminantes de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá - Ayacucho empleando la técnica de electrocoagulación.* (tesis para optar el grado de magíster). Universidad Nacional de Ingeniería. Perú.

Barrenechea, A. (2004). *Coagulación. Tratamiento de agua para consumo humano* (capítulo 4). Lima, Editorial CEPIS/OPS.

Barrera, C. (2014). *Aplicaciones Electroquímicas al Tratamiento De Aguas Residuales.* México. Editorial Reverté.

Bayramoglu, M. y Kobya, M. (2004) *Operating Cost Analysis of Electrocoagulation of Textile Dye Wastewater. Separation and Purification Technology, 37(2).*

Bazrafshan, E. y otros. (2012) *Slaughterhouse Wastewater Treatment by Combined Chemical Coagulation and Electrocoagulation Process.* PLoS ONE. 7(6).

- Chen, G. (2004). *Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment. Separation and Purification Technology*, 38(1).
- Chen, G. (2000). *Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater*.
- Ge, J. (2004). *New bipolar electrocoagulation - electroflotation process for the treatment of laundry wastewater*, 36.
- Gil, J. (2012). *Tratamiento electroquímico para la remoción de metales pesados en residuos líquidos peligrosos en los laboratorios de docencia de la Universidad del Cauca*. . (Tesis para optar el grado de magíster). Universidad del Valle. Santiago de Cali. Colombia.
- Holt, P. (2005). *The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology*, 59(3).
- Kobya, M., Can, O. T. y Bayramoglu, M. (2003). *Treatment of Textile Wastewaters by Electrocoagulation using Iron and Aluminum Electrodes. Journal of hazardous materials*. 100(1-3).
- Laure, O. y otros. (2003) *Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. Separation and Purification Technology*, 31(2).
- Martínez, F. (2008). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. (Tesis para optar el grado de doctor). Universidad De Castilla-La Mancha, España.
- Mayorga M. y Ariza C. (2013). *Diseño básico de una celda electrolítica para la defluorización de aguas residuales industriales por electrodiálisis*. Revista de la Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2019). *Valores Máximos Admisibles (VMA) para la descarga de Aguas Residuales No Domésticas en el Sistema de Alcantarillado Sanitario*. Lima.

Mollah, M.Y. y otros. (2001). *Electrocoagulation (EC)-Science and applications. Journal of Hazardous Materials. 84(1)*.

Pantoja, A. (2014). *Reducción de Concentración de Hierro en Agua, mediante la Electrocoagulación*. (trabajo de investigación). Universidad Nacional del Callao, Perú.

Restrepo, A. P. y otros. (2006). *La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Producción + Limpia. 1(2)*.

Sillanpaa M. y Shestakova M. (2017). *Electrochemical Water Treatment Methods*. (1st Edition). Editorial Butterworth-Heinemann.

Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia. Editorial McGraw-Hill

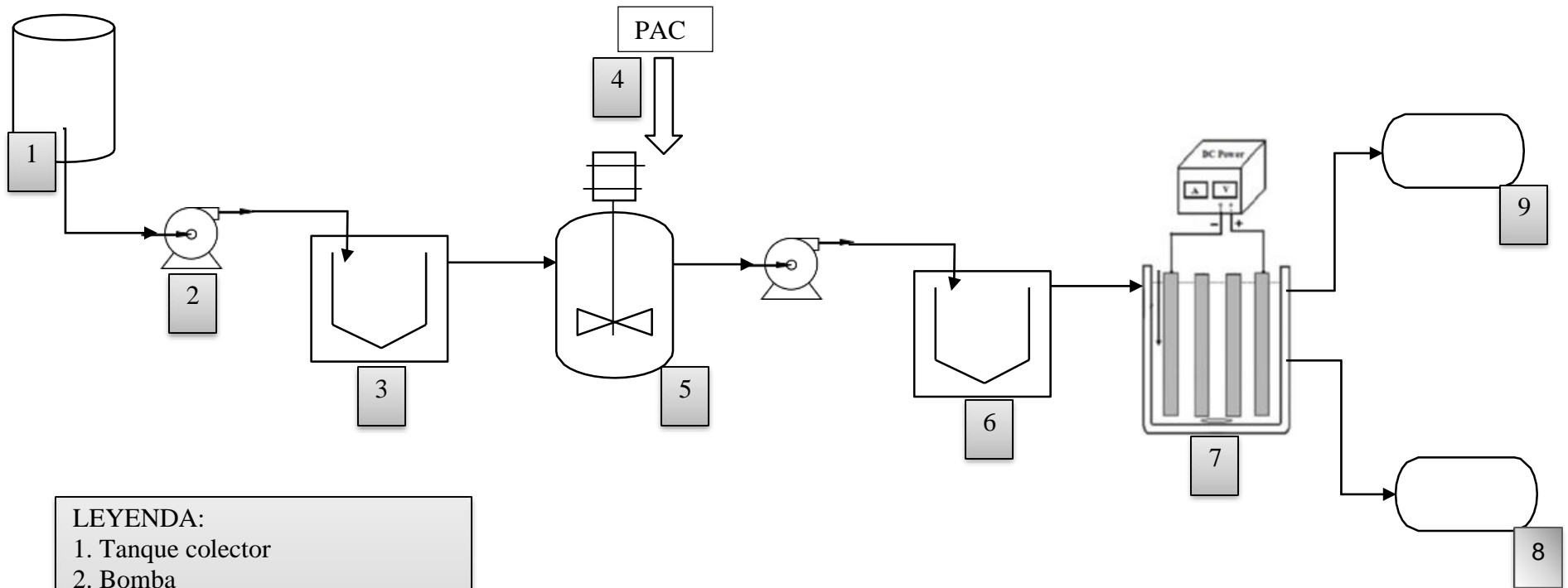
Tezcan, U. y otros. (2008). *Treatment of Slaughterhouse Wastewater with Iron Electrodes. WIT Transactions on Ecology and the Environment.111*.

ANEXOS

TITULO: TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL CAMAL CONCHUCOS MEDIANTE COAGULACION QUIMICA SEGUIDO DE ELECTROCOAGULACION

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEP.	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cómo es el tratamiento del agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación?	Desarrollar el proceso de tratamiento del agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación	El proceso de tratamiento combinado de coagulación química con polímero de aluminio y proceso de electrocoagulación con electrodos de acero permite que el agua residual cumpla con la normativa vigente y puede ser vertido a los cuerpos de agua sin problemas al medio ambiente.	Y= Concentración de contaminantes en el agua residual del camal Conchucos	DBO ₅ DQO SST	mg/L mg/L mg/L	Análisis cuantitativo de laboratorio y comparando los resultados con los valores máximos admisibles de la normativa vigente para agua
PROB. ESPECÍFICOS	OBJ. ESPECÍFICOS	HIP. ESPECÍFICAS	VARIABLES IND.	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
a) ¿Cuáles son las características físicas y químicas del agua residual del camal Conchucos al inicio del tratamiento?	a) Identificar las características físicas y químicas del agua residual del camal Conchucos al inicio del tratamiento	a) Las características del agua residual del camal Conchucos superan los valores máximos admisibles de la normativa vigente	X1= Características físicas y químicas del agua residual del camal Conchucos al inicio del tratamiento	DBO ₅ DQO SST Acidez	mg/L mg/L mg/L pH	Análisis cuantitativo de laboratorio
b) ¿Cuáles son las condiciones más favorables del tratamiento de agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación?	b) Determinar las condiciones más favorables del tratamiento de agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación	b) Las condiciones más favorables del tratamiento de agua residual mediante coagulación química seguido de electrocoagulación son: Concentración de coagulante(mg/L):100-600 Tiempo de agitación(min):15-30 Tensión (V):10-14V Tiempo de reacción (min):20-40	X2 = Proceso optimizado de tratamiento de agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación	Concentración de coagulante Tiempo de agitación Tensión Tiempo de reacción	mg/L minutos V minutos	Revisión bibliográfica. Corridas experimentales
c) ¿Cuáles son las características físicas y químicas del agua residual del camal Conchucos al final del tratamiento?	c) Identificar las características físicas y químicas del agua residual del camal Conchucos al final del tratamiento	c) Las características del agua residual del camal Conchucos al final del tratamiento presenta valores inferiores a los valores máximos admisibles de la normativa vigente.	X3 = Características físicas y químicas del agua residual del camal Conchucos al final del tratamiento	DBO ₅ DQO SST	mg/L mg/L mg/L	Análisis cuantitativo de laboratorio

DIAGRAMA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO COAGULACION-ELECTROCOAGULACION

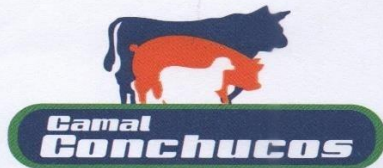


LEYENDA:

1. Tanque colector
2. Bomba
3. Sedimentador primario
4. Dosificador de coagulante(PAC)
5. Tanque de agitación
6. Sedimentador secundario
7. Reactor electroquímico
8. Colector de agua tratada
9. Depósito de residuos

Fuente: Elaboración Propia

AUTORIZACION DE LA EMPRESA



Lima, 23 de Octubre del 2018

Ingeniero Francisco Javier Canales Mendoza
Jefe de plantas
Camal de Conchucos S.A

Por medio de la presente hago constar que el señor bachiller CHAVARRIA CALDAS MIGUEL ANGEL, con DNI 47516487; la señorita ARAUJO VILLANUEVA LESLY EMPERATRIZ , con DNI 45597085 y señorita CAMPOS FLORES LESLY JOHANA, con DNI 47046287 , ha sido aceptado su permiso para el desarrollo del proyecto de tesis denominado TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL CAMAL CONCHUCOS MEDIANTE COAGULACION QUIMICA SEGUIDO DE ELECTROCOAGULACION en nuestra empresa, facilitando utilizar información confidencial para el proyecto denominado y la realización del muestreo de las aguas residuales del proceso.

Atentamente.

.....
Francisco Javier Canales Mendoza
Director-CAMAL CONCHUCOS

Jr. José de Rivera y Dávalos N° 405 - El Agustino
Telf.: 328-0075 / 328-2776 / 328-1515
E-mail: contacto@camalconchucos.pe

CERTIFICADO DE CALIDAD

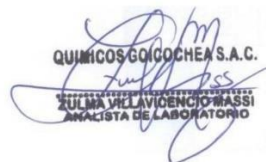
PRODUCTO : POLICLORURO DE ALUMINIO
LOTE : F020818
FECHA DE PRODUCCIÓN : 02.08.2018
FECHA DE VENCIMIENTO : 02.08.2019

ESPECIFICACION TÉCNICA :

PARAMETROS	LIMITE MINIMO	LIMITE MAXIMO	RESULTADOS
Concentración de ACH (%w/w)	18	22	19.66
Basicidad del ACH (%)	70.00		71.59
Densidad del ACH (g/ml)	1.250	1.350	1.33
Turbiedad del ACH (NTU)		50.0	7.18

**Certificamos que los datos corresponden al certificado analítico recibido de nuestro Proveedor.*

**Esta información no libera al cliente de hacer su propio control una vez recibida la mercadería.*


QUIMICOS GOCOCHEA S.A.C.
ZULMA VILLAVICENCIO RASSI
ANALISTA DE LABORATORIO

5000842 OC 6000000058

FECHA: 03/09/2018

INFORME DE ENSAYO N° 186140 CON VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : MIGUEL ANGEL CHAVARRÍA CALDAS
 Dirección : A.H. Luis Alberto Sánchez, Mz D. Lote 6
 Solicitado Por : MIGUEL ANGEL CHAVARRÍA CALDAS
 Referencia : Cotización N° 4265-18
 Proyecto : Tratamiento de Agua Residual del camal Conchucos
 Procedencia : Camal Conchucos
 Muestreo Realizado Por : El cliente
 Cantidad de Muestra : 1
 Producto : Agua Residual
 Fecha de Recepción : 20/12/2018
 Fecha de Ensayo : 20/12/2018 al 27/12/2018
 Fecha de Emisión : 02/01/2019

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones

I. Resultados

Código de Laboratorio	186140-01		
Código de Cliente	D.1		
Fecha de Muestreo	20/12/2018		
Hora de Muestreo (h)	10:45		
Ubicación Geográfica (WGS 84)	No indica		
Tipo de Producto	Agua Residual		
Tipo Ensayo	Unidad	L.C.M.	Resultados
Fisicoquímicos			
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	2,0	3565
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5,0	8050
Sólidos Totales Suspendidos	mg/L	6,0	1260

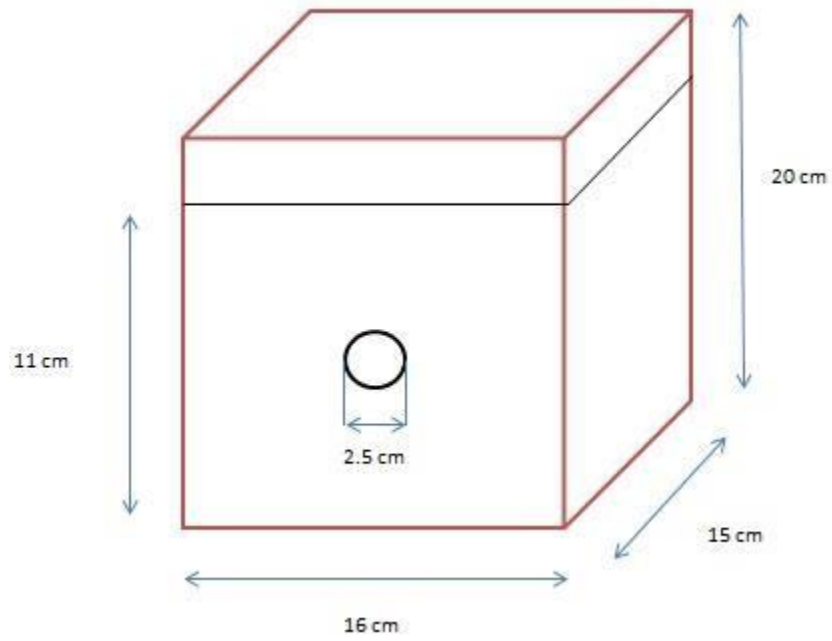
Leyenda: L.C.M. = Limite de cuantificación del método, L.D.M. = Limite de detección del método, "<" = Menor que el L.C.M. o L.D.M. indicado, "^{cu}" = Resolución cuantificable, "^{de}" = Limite de Detección de Método, "—" = No Analizado.
 ">" = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica.

II. Métodos y Referencias

Tipo Ensayo	Norma Referencia	Título
Fisicoquímicos		
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SM 5210 B, 23rd. Ed. 2017	Biochemical Oxygen Demand (BOD), 5-Day BOD Test
Demanda Química de oxígeno (DQO)	SM 5220 D, 23rd. Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method
Sólidos Totales Suspendidos	SM 2540 D, 23rd. Ed. 2017	Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105 °C

SIGLAS: SM: Standard methods for the examination of Water and Wastewater APHA, AWWA, WEF 23rd. Ed. 2017

VISTA FRONTAL DEL REACTOR ELECTROQUIMICO



VISTA LATERAL DEL REACTOR ELECTROQUIMICO

