

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Aplicación de la electrocoagulación como alternativa de
remoción de sólidos suspendidos totales presentes en
las aguas residuales generadas en el distrito de San
Pedro de Saño, 2020**

Yanela Marlene Ramón Córdova

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

ASESOR

M. Sc. Olga Vadimovna Kostenko

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a la Universidad Continental, por la formación profesional y conocimientos impartidos a lo largo de los ciclos de estudios. De igual manera, agradezco al laboratorio de ensayos de la organización consultora Main Tools, por permitirme el acceso para el desarrollo de la parte experimental, así también por ser un enlace para con el laboratorio acreditado respecto del análisis de las muestras objeto de experimentación.

También agradezco a la M.Sc. Olga Vadimovna Kostenko, por la asesoría brindada para la realización de la presente investigación; por sus recomendaciones técnicas, revisión en un entorno a distancia y el interés por el desarrollo de conocimientos, agradezco a su persona.

DEDICATORIA

Dedico la presente investigación a mis padres, hermanos y amigos en general, por siempre estar en las buenas y las malas.

ÍNDICE

ASESOR.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	xii
CAPÍTULO I.....	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	1
1.1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.1.2. Formulación del problema.....	3
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Justificación e importancia.....	4
1.3.1. Justificación práctica.....	4
1.3.2. Justificación metodológica.....	5
1.3.3. Justificación científica.....	5
1.3.4. Importancia.....	5
1.4. Hipótesis y variables.....	6
1.4.1. Hipótesis de investigación.....	6
1.4.2. Hipótesis nula.....	6
1.4.3. Hipótesis específicas.....	6
1.4.4. Operacionalización de las variables.....	7

CAPÍTULO II.....	8
2.1. Antecedentes de la investigación.....	8
2.1.1. Antecedentes encontrados en artículos científicos	8
2.1.2. Antecedentes encontrados en tesis	10
2.1.3. Antecedente encontrado en artículo de divulgación.....	13
2.2. Bases teóricas	14
2.2.1. Fundamentos teóricos de la investigación	14
2.2.2. Fundamentos metodológicos de la investigación.....	21
2.3. Definición de términos	31
CAPÍTULO III.....	34
3.1. Método, tipo y nivel de la investigación.....	34
3.1.1. Métodos de la investigación.....	34
3.1.2. Tipo de la investigación	37
3.1.3. Nivel de la investigación	37
3.2. Diseño de la investigación	38
3.3. Población y muestra	39
3.3.1. Población.....	39
3.3.2. Muestra	39
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	40
3.4.1. Técnicas de recolección de datos.....	40
3.4.2. Instrumentos de recolección de datos.....	40
3.5. Técnicas de análisis y procesamiento de datos	41
CAPÍTULO IV	42
4.1. Resultados de la investigación.....	42
4.1.1. Prueba de hipótesis	46
4.2. Discusión de resultados.....	52
CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES.....	56

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
ANEXOS.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01. Representación de la remoción esperada de materia orgánica, sólidos en suspensión y microorganismos patógenos, según el tipo de procesos de tratamiento de aguas residuales.....	21
Figura 02. Reactores de electrocoagulación de tipo bach en paralelo y en serio respecto de la conexión de electrodos.....	24
Figura 03. Validez de la evaluación del parámetro fisicoquímico de SST para la categoría 4 establecida por el ECA - agua, además de parámetros de campo.....	30
Figura 04. Ubicación de los puntos de muestreo inicial.....	40
Figura 05. Gráfico que muestra los valores de la concentración inicial.....	43
Figura 06. Representación de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.....	47
Figura 07. Prueba de t de student para el punto A-YR-01.....	48
Figura 08. Prueba de t de student para el punto A-YR-02.....	49
Figura 09. Prueba de t de student para el punto A-YR-03.....	50
Figura 10. Representación de la correlación de Pearson.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01. Descripción y operacionalización de las variables.....	7
Tabla 02. Inconvenientes que generan las aguas residuales.....	15
Tabla 03. Niveles del tratamiento de las aguas residuales.....	19
Tabla 04. Condiciones de experimentación empleadas en la investigación.....	38
Tabla 05. Concentraciones iniciales de SST para los puntos de muestreo.....	42
Tabla 06. Contenido de SST antes y después del tratamiento.....	44
Tabla 07. Correspondencia de concentraciones para el experimento.....	45
Tabla 08. Eficiencia de la aplicación de la electrocoagulación.....	46
Tabla 09. C0 y C1 del punto A-YR-01.....	47
Tabla 10. C0 y C1 del punto A-YR-02.....	48
Tabla 11. C0 y C1 del punto A-YR-03.....	49
Tabla 12. Concentraciones iniciales y finales de SST.....	50

RESUMEN

Objetivo: determinar si la electrocoagulación representa ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020. **Métodos:** se empleó el método científico, de corte general hipotético-deductivo y de enfoque específico observacional y experimental. El tipo de investigación seleccionado fue el aplicado y el nivel fue correlacional. El diseño se asoció con el método específico, respecto del corte pre experimental al manipular a la variable de electrocoagulación en sentido a la variación de la intensidad de corriente aplicada, así como el tiempo de tratamiento, de modo que se alcance un escenario ideal de eficiencia y validación de la alternativa de remoción de sólidos suspendidos totales. **Resultados:** la concentración inicial de sólidos suspendidos totales en uno de los puntos superó el Estándar de Calidad Ambiental (296,5 mg/L > 100 mg/L - Categoría 4, conservación del ambiente acuático. Al aplicar una mayor intensidad de corriente eléctrica (3 A) y un mayor tiempo de contacto (20 min) se alcanzó la mayor capacidad de remoción (89,43 %), así como al aplicar una menor intensidad de corriente (2 A) y un menor tiempo de contacto (10 min) se alcanzó la menor capacidad de remoción de SST (81,48 %), logrando mantenerse por debajo de los ECA - agua respecto del total de concentraciones finales. **Conclusiones:** la aplicación de la electrocoagulación representa ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020, ya que la eficiencia de remoción fue alta (superior al 80 %), alcanzando hasta el 89,43 % de remoción máxima ($r = 0,990$, $\text{sig.} = 0,000$).

Palabras clave: electrocoagulación, sólidos suspendidos totales, intensidad de corriente eléctrica, tiempo de tratamiento, eficiencia del tratamiento.

ABSTRACT

Objective: determine if electrocoagulation represents an alternative for the removal of total suspended solids from wastewater generated in the district of San Pedro de Saño, Huancayo, 2020. **Methods:** the scientific method was used, of a general hypothetical-deductive approach and a specific observational and experimental approach. The type of research selected was applied and the level was correlational. The design was associated with the specific method, with respect to the pre experimental cut-off when manipulating the electrocoagulation variable in the direction of the variation of the applied current intensity, as well as the treatment time, so that an ideal scenario of efficiency and efficiency is reached, validation of the total suspended solids removal alternative. **Results:** The initial concentration of total suspended solids in one of the points exceeded the Environmental Quality Standard (296,5 mg/L > 100 mg/L - Category 4, conservation of the aquatic environment. By applying a higher intensity of electric current (3 A) and a longer contact time (20 min), the highest removal capacity was achieved (89,43 %), as well as by applying a lower current intensity (2 A) and a shorter contact time (10 min) reached the lowest SST removal capacity (81,48 %), managing to remain below the ECA - water with respect to the total final concentrations. **Conclusion:** The application of electrocoagulation represents being an alternative for the removal of total suspended solids from wastewater generated in the district of San Pedro de Saño, Huancayo, 2020, since the removal efficiency was high (greater than 80 %), reaching up to 89,43 % of maximum removal ($r = 0,990$, $\text{sig.} = 0,000$).

Keywords: electrocoagulation, total suspended solids, electric current intensity, treatment time, treatment efficiency.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de los recursos hídricos aptos para el consumo y desarrollo de actividades productivas está condicionada por su calidad respecto de la baja concentración de contaminantes físicos, químicos y biológicos (1). En dicho aspecto, a nivel nacional y local es urgente el establecer mecanismos de tratamiento de aguas (2), especialmente las residuales, que suelen ser empleadas para entornos productivos aguas abajo.

Se observa la necesidad de optar por mecanismos viables de aplicación que se reflejen como eficientes, como es el caso de la electrocoagulación como alternativa complementaria a los tratamientos primarios y secundarios de las aguas residuales, para así reducir la carga contaminante de parámetros como la turbidez y/o los sólidos suspendidos totales, que es a donde apunta el desarrollo pre experimental realizado en la presente investigación, teniendo como objeto de estudio las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, provincia de Huancayo, región Junín.

En el primer capítulo se aborda el planteamiento y formulación de los problemas de investigación, así como los consecuentes objetivos e hipótesis, resaltando el objetivo general: determinar si la electrocoagulación representa ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020; también se detalla la justificación e importancia de la investigación y la operacionalización de las variables de estudio.

En el segundo capítulo se observan los antecedentes de la investigación, identificando las principales condiciones de aplicación de la electrocoagulación, siendo complementado por las bases teóricas y la definición de términos.

En el tercer capítulo se expone a la metodología de la investigación, delimitado por el empleo del método científico, que abarca a la observación, formulación de hipótesis, experimentación y así alcanzar resultados representativos, enmarcados en el tipo de investigación aplicado y de nivel correlacional, considerando el diseño pre experimental. También se detalla la población y muestra de estudio, las técnicas e instrumentos de recolección de datos y las técnicas de análisis y tratamiento de información.

En el cuarto capítulo se detalla el alcance de resultados y la discusión de éstos contrastándolos con lo reportado en los antecedentes del estudio, además se presenta la validación estadística de las hipótesis planteadas a un 95 % de nivel de confianza.

Como conclusión general de la investigación, se determinó que la aplicación de la electrocoagulación representa ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020, ya que la eficiencia de remoción fue alta (superior al 80 %), alcanzando hasta el 89,43 % de remoción máxima ($r = 0,990$, $\text{sig.} = 0,000$).

La autora.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

Según Sánchez (1), en el Perú, así como en América Latina, existen dos escalas de tratamiento de las aguas residuales respecto a su fuente de generación: las aguas residuales que son generadas a nivel doméstico e industrial, a baja escala, que se derivan directamente al alcantarillado y por otro lado, las aguas residuales que se generan a nivel industrial productivo a una escala mayor. La citada autora menciona otro dato de importancia: según la información oficial brindada por la Organización de Naciones Unidas (ONU), una gran parte, a escala mundial, de las aguas residuales (80 %) no se llega a tratar antes de su vertimiento o reuso, lo que genera desequilibrios no solo en el componente biológico del ambiente (flora y fauna), sino también impacta en la salud de la población, lo cual resta millones de divisas a nivel mundial (1), evidenciando que el escenario ineficiente de tratamiento de las aguas residuales impacta directamente en el alcance del desarrollo sostenible.

De igual manera, el portal Clima de Cambios de la Pontificia Universidad Católica del Perú (2) cita que el déficit del tratamiento de aguas residuales también se debe a que la infraestructura de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) tiende por ser ineficiente e insuficiente para los

volúmenes de generación diaria, repercutiendo en un impacto directo a los cuerpos de agua natural, ya sean subterráneas o superficiales, además de la proliferación de focos infecciosos (contrastado también por lo que menciona la OMS) y la generación de malos olores como aspectos ambientales indirectos. En el texto de Larios-Meño *et. al.* (3), se menciona que el déficit del tratamiento de las aguas residuales también desequilibra al ciclo del agua, particularmente por el reuso del agua debido a su contaminación al propiamente superar estándares de calidad ambiental (ECA). La mencionada fuente también hace énfasis que las sustancias que contaminan a los recursos hídricos pueden ser orgánicas o inorgánicas, siendo muy peligrosa la situación de ciudades como Lima, La Oroya y Juliaca, donde existen contaminantes peligrosos como la presencia de metales pesados provenientes de actividades industriales como la minería (explotación), hidrocarburos, curtido de pieles, etc., así como también se tienen a los contaminantes que alteran a los recursos hídricos respecto de su calidad visual directa, comprendida por la concentración de sólidos presentes en el agua, los cuales se asocian directamente con la turbidez de las fuentes de agua, generando aspectos de agua conocida como “sucia” o “turbia” por la población de a pie.

Otro escenario que se observa en realidades más próximas a la de la ciudad de Huancayo es la inoperatividad de las plantas de tratamiento de aguas residuales, así como la ineficiencia en las plantas, principalmente debido al poco mantenimiento que se les da (4). Se deja acumular lodos (tratamiento primario) que limitan el flujo de un caudal ideal en los demás procesos del tratamiento, además de considerar una dosificación inadecuada de sustancias coagulantes y floculantes (así como un limitado alcance de éstos), generado así escenarios de ineficiencia que podría impactar significativamente al ambiente aguas abajo, ya sea directamente a la población por limitar hasta la disponibilidad de agua hasta generar una potencial bioacumulación en cadenas alimentarias.

Se evidencia la necesidad de optar por alternativas que aseguren el equilibrio en el ecosistema respecto del uso adecuado de recursos naturales, como es el caso de los recursos hídricos. Tal como se promueve a nivel de la Constitución Política el Perú (5), la persona tiene derecho de

gozar de un ambiente equilibrado y adecuado para el desarrollo de su vida, siendo aquello impactado por actividades económicas que no tienden por ser reguladas adecuadamente en el Valle del Mantaro (en distritos como Hualhuas, Saño y Quilcas), generando aspectos ambientales como lo considerado respecto de las aguas residuales, de modo que es preciso contar con alternativas no convencionales para su potencial tratamiento, como es el caso de la electrocoagulación, con una orientación a un potencial reaprovechamiento de residuos sólidos que presenten composición de metales, de modo que el aporte del presente trabajo de investigación se observe como significativo directa e indirectamente.

1.1.2. Formulación del problema

a) Problema general:

¿La electrocoagulación representa ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020?

b) Problemas específicos:

- ¿Cuál es la condición inicial de los parámetros fisicoquímicos (sólidos suspendidos totales y pH) de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño?
- ¿Cuál es la concentración inicial y final, tras la aplicación de la electrocoagulación, de los sólidos suspendidos totales presentes en las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño?
- ¿Cuáles son las condiciones de la electrocoagulación para lograr una máxima remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar si la electrocoagulación representa ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Evaluar la condición inicial de los parámetros fisicoquímicos (sólidos suspendidos totales y pH) de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño.
- b) Determinar la concentración inicial y final, tras la aplicación de la electrocoagulación, de los sólidos suspendidos totales presentes en las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño.
- c) Identificar las condiciones de la electrocoagulación para lograr una máxima remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación práctica

La presente investigación se realiza con el objeto de encontrar una alternativa de solución frente al problema del inadecuado y hasta inexistente tratamiento de las aguas residuales asociado a un contaminante evidente en términos de percepción (turbidez asociada a la presencia excesiva de sólidos suspendidos totales), más aún en sectores donde la informalidad se mantiene en persistencia, de modo que los conocimientos alcanzados en la presente sirvan de un soporte que pueda ser replicado y aplicado en campo para así contribuir con alcanzar escenarios de desarrollo sostenible.

1.3.2. Justificación metodológica

Los objetivos de la investigación se alcanzarán tras la aplicación de la electrocoagulación, como alternativa real para la remoción de sólidos suspendidos totales presentes en aguas residuales provenientes de actividades productivas, para lo cual se debe identificar y contemplar factores que respalden su potencial aplicación a una escala mayor del tratamiento de las aguas residuales en el contexto local y regional de estudio. Si bien se contempla un estudio de diseño pre experimental, se contempla el hecho de abrir el paso a una alternativa de tratamiento de aguas residuales que represente conocimientos para que así la sociedad evidencie un acceso seguro a generar escenarios de sostenibilidad.

1.3.3. Justificación científica

El presente trabajo de investigación sustenta su aporte científico por el empleo de la observación, experimentación y validación de hipótesis, que, en conjunto, representan al método científico, siendo representativo y real para generar mayores espacios de réplica y empleo en forma de fuentes de información; mediante la valorización del método no convencional de la electrocoagulación, realizada a escala en laboratorio, se pretende alcanzar la validación de un escenario de eficiencia para su potencial aplicación como alternativa de tratamiento de aguas residuales en contextos donde se tenga limitado el alcance y usos de PTAR (Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales).

1.3.4. Importancia

La importancia del presente trabajo de investigación se sustenta por desarrollar una alternativa que permita tratar las aguas residuales a pequeña escala donde no se tenga un alcance del tratamiento industrial, de modo que se mitigue escenarios de contaminación ambiental (impactos ambientales negativos y significativos) a corto y mediano plazo.

1.4. Hipótesis y variables

1.4.1. Hipótesis de investigación

H₁: La electrocoagulación demuestra ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020, debido a que demuestra una alta eficiencia de remoción (más del 80 %).

1.4.2. Hipótesis nula

H₀: La electrocoagulación no demuestra ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020, debido a que no demuestra una alta eficiencia de remoción (menos del 80 %).

1.4.3. Hipótesis específicas

- a) La condición inicial de los parámetros fisicoquímicos (sólidos suspendidos totales y pH) de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño muestra que no se sobrepasan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), sin embargo, se percibe un escenario de contaminación aguas abajo debido a la inexistencia del tratamiento de aguas residuales.
- b) La concentración inicial de sólidos suspendidos totales supera los 100 mg/l y la concentración final, tras el experimento, de sólidos suspendidos totales se encuentra por debajo de dicho valor en el distrito de San Pedro de Saño.
- c) Las condiciones de la electrocoagulación para lograr una máxima remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño se asocian con los parámetros de operación: mayor intensidad de corriente y mayor tiempo de tratamiento.

1.4.4. Operacionalización de las variables

Tabla 01. *Descripción y operacionalización de las variables.*

Variable	Tipo	Concepto	Dimensión	Indicador	Escala/Unidad
Electro-coagulación	Independiente	Proceso donde se da el principio de coagulación y floculación en el tratamiento de aguas residuales mediante la aplicación de energía eléctrica y la posibilidad de que las partículas en suspensión varíen su carácter eléctrico para formar flocs y sedimentar.	Parámetros de aplicación/operación	Tiempo de aplicación	min
				Intensidad de corriente	A
Remoción de sólidos suspendidos totales	Dependiente	Es el efecto de remover (quitar) a los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales mediante la formación de flocs y posterior sedimentación	Eficiencia de la remoción de SST Concentración de SST pH	Porcentaje de eficiencia	%
				Inicial	mg/L
				Final	mg/L
				Promedio	Unidad de pH

Fuente: elaboración propia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes encontrados en artículos científicos

En el artículo científico titulado “Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua”, se buscó como objetivo “construir un reactor de electrocoagulación para evaluar la eficiencia en la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de aguas residuales provenientes de la industria de pintura, así como determinas las mejores condiciones de pH, conductividad, intensidad de corriente y tiempo de tratamiento”. En sus resultados menciona que se alcanzó un 87 % de eficiencia promedio de remoción de sólidos suspendidos totales ($C_1 = 1,298 \text{ mg/L}$) en la industria de producción de pinturas y pegamentos por el empleo de pigmentos, aglutinantes, solventes y aditivos), la cual se alcanzó con una intensidad de corriente de 5 A, a un pH de 7,2 y a un tiempo de tratamiento de 15 minutos. Concluye que al aumentar la intensidad de corriente a 8 A se alcanza una remoción superior y un incremento del pH, lo que repercute en la viabilidad de aplicación del tratamiento, debido que a dichas condiciones se da un incremento de costos por el gasto de energía, además de considerar aditivos (reactivos) para disminuir el valor del pH (6).

En el artículo científico titulado “Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable”, se planteó como objetivo proponer “la evaluación de las variables necesarias para el proceso de electrocoagulación en el tratamiento de aguas crudas, mediante el establecimiento de una celda electrofílica con diferentes configuraciones de ánodo-cátodo”. En sus resultados menciona que se realizaron estudios a escala de laboratorio usando una celda de 1 litro de capacidad, empleando electrodos de Fe, Al y acero inoxidable, donde se produjeron hidróxidos de dichos elementos, los mismos que actuaron como coagulantes y alcanzaron una remoción significativa de los sólidos suspendidos totales a una distancia de 1 cm entre placas y a una intensidad de corriente de 2 V en un tiempo de 10 min, donde los electrodos de aluminio evidenciaron un comportamiento más estable. Concluye finalmente que la electrocoagulación se refleja como un sistema de tratamiento eficiente, con un punto en contra al emplearlo en campo: la consideración de un alto costo de operación si se desea remover aún más contaminantes respecto de su concentración significativa. Considera que la electrólisis del agua, respecto de su capacidad, alcanzar a producir que se desprenda el oxígeno e hidrógeno en estado gaseoso a nivel de los electrodos, los mismos que ascienden al nivel superficial provocando así fenómenos respecto de la rápida separación de coloides del mencionado electrodo, así como la formación de un subproducto (nata) en la superficie la cual es fácil de extraer aplicando medios mecánicos (7).

En el artículo científico titulado “Tratamiento de aguas residuales de origen químico mediante electrocoagulación”, se planteó como objetivo evaluar a la alternativa de electrocoagulación como técnica de tratamiento de aguas residuales generadas en un laboratorio de análisis químico, donde la concentración de sólidos suspendidos totales tiende por ser significativa. En sus resultados y conclusiones menciona que se alcanzó una remoción del 60 % para un ensayo de separación entre electrodos de 1 cm, independientemente del voltaje que se aplicó, sin embargo, a dicha separación la remoción de los sólidos suspendidos no fue significativa, siendo significativa para otros parámetros (8).

En el artículo científico titulado “Remoción de sólidos totales de vinazas por electrocoagulación - electroflotación”, se planteó como objetivo “evaluar las variables de operación para el proceso de electrocoagulación como el pH, la densidad de corriente y la concentración de NaCl como soporte electrolítico al emplear electrodos de aluminio en un sistema monopolar”. En sus resultados menciona que el experimento fue realizado en medios alcalinos, en el cual se favoreció a la capacidad de remoción de los sólidos y la disolución del aluminio en el medio, ésta última mostró una tendencia a incrementarse a medida que la densidad de corriente aumentó, considerando un área superficial de 0,0037 g de Al por cada 1 mA/cm². Finalmente concluye que se alcanzó un 37 % de remoción de sólidos totales, donde las condiciones que repercutieron en un mayor desprendimiento de Al no llegaron a coincidir con aquellas condiciones que repercutieron en alcanzar una mayor remoción de sólidos totales (9).

2.1.2. Antecedentes encontrados en tesis

En la tesis de doctorado titulada “Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector agua de las vírgenes por electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energética un panel fotovoltaico”, se planteó el objetivo de “remover los contaminantes de las aguas residuales urbanas del colector “Aguas de las Vírgenes” variando la densidad de corriente y el tiempo de residencia por el método de electrocoagulación mediante paneles fotovoltaicos, a nivel de laboratorio”. Considera dentro de sus resultados que la aplicación de la electrocoagulación se basa en la electroquímica, donde se tiene como base que las partículas que se encuentran suspendidas en el agua presentan un carácter eléctrico que las hacen recolectoras de iones de carga opuesta, de modo que se puedan formar flóculos y alcance a sedimentar por gravedad. Alcanzó a tratar 1,8 litros de agua residual empleando electrodos de Fe y Al, los cuales estuvieron separados por 1 cm, empleando una densidad de corriente de 32,72 A/m² y un tiempo de tratamiento de 20 minutos, de modo que se alcanzó una remoción de: 92,94 % de sólidos suspendidos totales. Concluye que, en relación a los

sólidos suspendidos totales, se tuvo una concentración inicial de 243,5 mg/L, llegando a remover en promedio 89 % (del total de experimentos), lo que refleja que la concentración final se encontró por debajo de los límites máximos, evidenciando que el método de electrocoagulación tiende por representar una alternativa de tratamiento de aguas residuales eficiente, al también emplear un recurso eléctrico de fuente renovable, contribuyendo a generar escenarios donde el ambiente se preserve verdaderamente al llegar a aplicar el sistema (10).

En la tesis titulada “Remoción de contaminantes en aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación”, se planteó como objetivo “remover los contaminantes de las aguas residuales urbanas del colector de aguas de la Universidad Nacional del Centro del Perú variando la densidad de corriente y el tiempo de residencia por el método de electrocoagulación a nivel laboratorio”. En sus resultados menciona que se tomó un total de 40 litros de muestra, donde 15 litros fueron envasadas para su caracterización mientras que el resto fue empleado en el experimento. Se llegó a resultados como el valor de la densidad de corriente óptima (32,72 A/m²), área total de contacto de 0,08253 m² y una intensidad de corriente de 2,7 A. El tiempo de residente fue de 20 minutos, a una distancia entre electrodos (de Fe y Al) de 1 cm, alcanzando así una remoción del 91 % de sólidos suspendidos. Como conclusión considera que el análisis de varianza determinó que la densidad de corriente y el tiempo de residencia, respecto de su variación en el tratamiento, tiene un efecto significativo en la remoción de contaminantes (11).

En la tesis de maestría titulada “Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua”, en la cual se planteó el objetivo de “determinar la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de aguas residuales”. La eficiencia del experimento se reflejó en la remoción de la concentración de sólidos totales de las aguas residuales provenientes de una industria dedicada a la producción de pinturas, alcanzando como tal una remoción al 87 % mediante la consideración de los siguientes

parámetros: intensidad de corriente a 5 A (empleando 5 placas de Al -ánodo- y Fe -cátodo- obteniendo un mejor resultado a una separación de 10 mm), pH aun valor de 7,2 y un tiempo de tratamiento de 15 min, alcanzando de tal modo un valor final que se encuentra por debajo de lo normativamente reglamentado. Se concluye finalmente que el tratamiento con electrocoagulación es un proceso efectivo para la remoción de contaminantes fisicoquímicos presentes en las aguas residuales generadas a nivel doméstico e industrial, de modo que representa una alternativa viable de aplicación en el país (12).

En la tesis de maestría titulada “Sistema combinado electrocoagulación - filtro biológico para la remoción de carga orgánica de los efluentes lácteos”, con el objetivo de “diseñar, construir y evaluar un sistema combinado de electrocoagulación - filtro biológico para la remoción de carga orgánica del efluente de la planta piloto de leche de la Universidad Nacional Agraria La Molina”. En sus resultados menciona que se consideró en el tratamiento un modelo de agitación para 4 litros de muestra de efluente residual; se consideró como parámetros del experimento al valor del pH (6,8), el tiempo de reacción (45 min) y densidad de corriente ($44,39 \text{ A/m}^2$), mediante los cuales se alcanzó obtener una mayor eficiencia de la remoción de la carga contaminante presente en el agua residual. Se concluye que en el proceso de electrocoagulación se ha trabajado con electrodos de Al y Fe, observando que el pH aumentó considerablemente durante el proceso, de modo que su neutralización fue alcanzada con la aplicación del filtro biológico por la acción de bacterias lácticas. Finalmente, considera que al contemplar un mayor tiempo de tratamiento, así como una mayor de densidad de corriente, se alcanza un mayor porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos totales, así como aumenta de forma significativa el pH y la temperatura, mientras la conductividad se reduce (13).

En la tesis titulada “Electrocoagulación en la remoción de mercurio de las aguas residuales en el Centro Poblado La Rinconada - Puno”, se planteó como objetivo “evaluar la electrocoagulación para la remoción mercurio de las aguas residuales procedentes del Centro Poblado La Rinconada”. En

los resultados se considera que tras el tratamiento existió un incremento del pH, así como de la conductividad eléctrica y cloruros, alcanzando una reducción de las concentraciones de dureza, alcalinidad, sulfatos, Ca, Mg, Hg. Las variables o condiciones de operación abordaron a la densidad de corriente ($6,61 \text{ mA/cm}^2$), concentración de NaCl (3 g/L) y tiempo de electrocoagulación (30 min), alcanzando así una remoción de mercurio del 97 % y 94,93 % para cada ensayo realizado. Finalmente se concluye que el tratamiento fue realizado en una celda de material acrílico que soporte un volumen de 1 000 mL de agua, así como la configuración de los electrodos empleados asumieron un entorno monopolar al emplear 5 placas de Al (3 al polo positivo y 2 al negativo), las cuales tuvieron una separación de 20 mm, alcanzando del tal modo remociones muy significativas al alcanzar la precipitación del mercurio presente en el agua residual, demostrando el poder de aplicación de la electrocoagulación también en aguas con presencia de metales pesados, que en ocasiones conforman al cúmulo de sólidos suspendidos totales (14).

2.1.3. Antecedente encontrado en artículo de divulgación

En el artículo titulado “Electrocoagulación de aguas residuales”, planteó como objetivo central el aplicar a dicho sistema como método de tratamiento para la remoción de grasas y aceites en aguas residuales como alternativa secundaria frente al potencial alto de remoción de sólidos totales, ya sea suspendidos o hasta disueltos. En sus resultados menciona que se aplicó la prueba piloto de electrocoagulación a 1 litro de agua, considerando los siguientes parámetros de tratamiento (denominadas como condiciones de operación): tipo de electrodo (de material Fe^{+++} y Al^{+++} , pero que también pueden ser o contener Cu, acero o aleaciones de Mg y Al), distancia entre ellos (5 mm de separación), flujo continuo del volumen tratado (1 000 mL), voltaje (2,7 V), corriente (0,07 A) y tiempo (15 min). La condición en la que se dio el tratamiento repercutió el empleo de un medio donde exista agitación o equivalente a una prueba de jarras. El valor de pH del agua tratada alcanzó el valor de 13,06 y una temperatura de 19°C , existiendo un incremento en el pH (inicial de 10,86) mientras que su temperatura permaneció igual, llegando a concluir que se llega a una

remoción de grasas y aceites muy significativa, de manera que se confirma que el poder de la corriente eléctrica llega a desestabilizar el equilibrio eléctrico que presentan las emulsiones y grasas, provocando su precipitación, en equivalencia a lo que sucede en el tratamiento (remoción) de sólidos suspendidos totales (15).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Fundamentos teóricos de la investigación

a) Aguas residuales:

Engloban a aquella parte del recurso hídrico que, por el uso del ser humano, representan un peligro para el ambiente siempre en cuando no reciban algún tratamiento. En su composición se contiene a una gran cantidad de sustancias además de microorganismos, dependiendo de la procedencia del vertimiento de dichos efluentes. Desde dicho punto de vista es posible clasificar a las aguas residuales en función de su fuente de generación, donde concentraciones elevadas repercuten en considerar al agua como de mala calidad o inadecuada para su disposición (16).

Los residuos líquidos están constituidos por sustancias, en algunos casos tóxicas, y microorganismos, lo cuales pueden causar escenarios de contaminación principalmente en los lugares donde dichos residuos son evacuados, principalmente donde no existen tratamientos de éstos (16). Dicho escenario de polución se da a consecuencia del desarrollo industrial y la expansión urbanística, en sentido a que conforme se incrementan las poblaciones, y sus actividades, también se tiende por incrementar la disposición de agentes contaminantes, los cuales proceden de actividades de índole agrícola, industrial y urbanas. De dicho modo se tiende por saturar la capacidad de resiliencia del medio natural (16). En la tabla 02 se exponen los inconvenientes que se dan por la presencia de las aguas residuales.

Tabla 02. *Inconvenientes que generan las aguas residuales.*

Malos olores y sabores	Sujeto a la diversidad de sustancias que presentan los residuos líquidos, así como la presencia de elementos producto de la descomposición, especialmente derivados de procesos anaerobios asociado a la descomposición de la materia orgánica.
Acción tóxica	Se da a través de la interacción de residuos líquidos sobre la flora y fauna presentes en las aguas, además de su composición, de índole receptora, es decir, se presenta en la fase de consumo o empleo de los recursos hídricos, sujeto también a la potencial acumulación de sustancias tóxicas, principalmente en la cadena alimentaria (toxicología). Los efectos de dicho escenario pueden ser letales, subletales, agudos, crónicos o acumulativos.
Vectores	Las aguas contaminadas por excretas puede llegar a intervenir, de forma directa o indirecta, en la propagación de enfermedades, lo cual favorece el desarrollo de artrópodos o moluscos, considerados como eslabones en sus cadenas epidemiológicas, o también se llegan a difundir agentes infecciosos lo cual genera vectores en contacto con las aguas residuales.
Acción sobre el entorno	El vertido de aguas residuales en los ríos, lagos y mares genera una percepción negativa por parte de la población, es decir, los escenarios de contaminación generan alteraciones psicosociales, ya que se llega a afectar al entorno natural del hombre donde se tiende por modificar el paisaje y su estética, lo cual se asocia a generar ambientes inhóspitos. También se llega a afectar la penetración de la luz principalmente en zonas donde se van vertimientos industriales, donde se tiende por "colorear" las aguas superficiales. Este aspecto adquiere mayor relevancia en las zonas turísticas, puesto que se tienden por exhibir criterios estéticos y sanitarios como valor agregado.
Contaminación térmica	Generado por el vertido de aguas derivadas de procesos de refrigeración industrial, lo cual tiende por aumentar la temperatura de las aguas afectando así a los organismos acuáticos.
Eutrofización	Considerada como un proceso natural, pero que tiende a acelerarse por la acción del hombre, al existir descargas ricas en fósforo y nitrógeno. Dichos elementos de aporte orgánico se encuentran principalmente en detergentes, excretas y derivados de pesticidas, evidenciando como fuente de contaminación a la escorrentía derivada de actividades agrícolas.
Impacto a las aguas subterráneas	Se constituye como un problema de significativa envergadura, puesto que tiende ser muy difícil de detectar y casi imposible de eliminar, ya que, si llega a ser detectado, la contaminación ha llegado a expandirse en grandes dimensiones. Dicho escenario de impacto se produce por la infiltración, principalmente en terrenos que son permeables, de los residuos líquidos resultantes de las actividades humanas.

Fuente: Espigares y Pérez (16).

b) Volumen de las aguas residuales:

Las aguas residuales, respecto de su volumen, sufren variaciones según parámetros de descarga, precipitaciones, etc. En dicho sentido, la pluviometría, desde un enfoque unitario, evidencia su importancia para evaluar dichas variaciones, considerando también que el flujo de residuos líquidos sufre oscilaciones diversas condicionadas por (16):

- La generación anual y mensual, donde se tiene que en los meses de verano el consumo de agua, con fines de aseo, ingestión, recreación, etc., tiende por ser mayor.
- La generación semanal: donde se tiene que ciertos días en la semana se tiende por consumir una mayor cantidad de agua, además, a nivel industrial, las modificaciones en la cantidad de aguas residuales son apreciables.
- La generación diaria: considerada como el mayor vertimiento de agua residual, ya sea doméstica o industrial, durante el día, a diferencia de la noche, donde se dan menores caudales.

c) Características fisicoquímicas de las aguas:

- Temperatura: la cual varía entre 10 y 21°C, siendo considerando un valor medio 15°C; esta característica suele ser mayor en consecuencia al aporte de agua caliente que procede de acciones de aseo y tareas domésticas; una mayor temperatura tiende por ejercer un impacto perjudicial sobre las aguas receptoras, llegando a modificar la flora y fauna, y dando lugar al crecimiento, considerado como indeseable, de algas, hongos, etc. (16).
- Turbidez: se da en consecuencia a la cantidad de compuestos en suspensión que hay en las aguas residuales, llegando a conglomerar al limo, microorganismos así como materia orgánica; en las masas de aguas receptoras tiende por afectar a la penetración de la luz (16).
- Color: suele ser pardo o gris, sin embargo, debido a procesos biológicos de índole anóxica el color tiende a volverse negro (16).

- Sólidos: los cuales son considerados como totales, que involucran a los residuos que quedan tras escenarios de secado y evaporación, así como los residuos remanentes tras procesos de carbonización y evaporación; y volátiles, lo cual marca una diferencia entre los sólidos fijos y totales (16).
- pH: lo cual condiciona a la actividad biológica que se desarrolla en el medio hídrico. Un nivel de pH dado entre los valores de 5 a 9 no tiende por causar efectos significativos sobre la mayor parte de las especies, sin embargo, otras tienden por ser más sensibles a dicha variación del medio (alcalinidad o acidez) (16).

d) Turbidez y sólidos suspendidos totales:

Según González (17), se asocian al grado en el cual los recursos hídricos pierden su transparencia, en consecuencia a la presencia de partículas en suspensión. Se contempla por tanto que mediante su medición se determina la claridad del agua, puesto que más sucia se encuentre, será más turbia o representará mayor turbidez. El impacto de la turbidez se da porque afecta la fotosíntesis al limitar que la luz solar pase, así como altera a la vida acuática (reproducción, respiración). Los factores que se asocian con la turbidez del agua son:

- Partículas de suelo en suspensión.
- Sedimentos que son depositados en los fondos.
- Descargas sin tratamiento a cuerpos de agua (desagües).
- Escorrentía derivada de lo urbano.

La absorción de calor proveniente de la luz del sol, por parte de las partículas suspendidas, hacen que las aguas tiendan por volverse más calientes, reduciéndose así el oxígeno en el agua, ya que éste se disuelve en el agua más fría. Así también, ciertos organismos no toleran escenarios de agua más caliente (17). En dicho sentido, el conjunto de partículas en suspensión tiende por dispersar la luz, disminuyendo así la actividad fotosintética en la flora acuática, la misma que contribuye a bajar más el oxígeno en su concentración. De

igual manera, se evidencia otro impacto que tiene la alta concentración de turbidez, dado en el aspecto estético de los recursos hídricos superficiales. Así también, las partículas suspendidas favorecen a la adhesión de metales pesados, así como de compuestos orgánicos considerados como tóxicos, como es el caso de los pesticidas (17).

- Medición de la turbidez:

Dicho parámetro es medido en Unidades Nefelométricas de Turbidez, denominadas como NTU. Para dicha medición, se emplea el instrumento turbidímetro o multiparámetro, el cual mide la intensidad de la luz que es dispersada a 90° cuando un rayo (impactante) de luz pasa a través de la muestra de agua (17).

Así también, Marcó *et. al.* (18) menciona que la causa de la presencia de turbidez del agua se debe a tratamientos ineficientes e insuficientes, así como cuando los sedimentos vuelven a quedar en suspensión. Los elevados niveles de turbidez llegan a proteger a los microorganismos de acciones de desinfección, así como llegan a estimular la proliferación de bacterias y favorecer al incremento de la demanda de cloro en sistemas de tratamiento. Al no lograr tratar los conglomerados de materia orgánica, se tenderá a generar trihalometanos en presencia de cloro excedente. Así también, dichos conglomerados reúnen diversas sustancias químicas peligrosas como metales pesados, organoclorados y otros, los cuales se unen sobre todo a los ácidos húmicos y otras partículas orgánicas.

e) Tecnologías del tratamiento de las aguas residuales:

Según la Comisión Nacional del Agua (19) existe una necesidad a nivel mundial por optar por tecnologías de tratamiento de las aguas residuales (operación y mantenimiento) que sean o evidencien un alcance real en términos económicos, especialmente en zonas rurales y empresas que deseen progresivamente tratar cada vez más efluentes en equivalencia a su capacidad de producción o servicios.

Es oportuno mencionar que la complejidad de los sistemas de tratamiento se da en función a lo que se desee obtener, es decir, el objetivo resultante del tratamiento. Al cotejar una variedad numerosa respecto de las operaciones y procesos disponibles para tratar los residuos líquidos, es oportuno el hecho de hablar de niveles de tratamiento, los mismos que son clasificados del siguiente modo: (i) tratamiento preliminar o pretratamiento, (ii) tratamiento primario, (iii) tratamiento secundario y (iv) tratamiento terciario o avanzado (20).

En consecuencia, para la selección de alguna tecnología para el tratamiento de las aguas residuales es oportuno considerar de forma inicial a un escenario de ecoeficiencia, orientado en la integración de las unidades que, en conjunto, permitan alcanzar los objetivos del tratamiento, basándose en los siguientes criterios de diseño (20):

- Considerar áreas no extensas de terreno.
- Procurar la reducción del empleo de energía eléctrica.
- Tratar de reducir el uso de insumos químicos.
- Procurar la reducción de la generación de lodos que hayan sido resultantes de los procesos de tratamiento.
- Promover la generación de biocombustibles, como el biogás, y no solo considerarlo como subproducto del tratamiento.
- Favorecer al reuso de las aguas tratadas.

Tabla 03. *Niveles del tratamiento de las aguas residuales.*

Pretratamiento o tratamiento preliminar	El objeto del pretratamiento es la retención de sólidos de mayor volumen (gruesos) y sólidos que presenten una densidad mayor al del agua, con la finalidad de que posteriores tratamientos se faciliten. Se emplean canales que presentan rejas gruesas y finas (tipo tamizado), además de desarenadores.
Tratamiento primario	Es todo proceso que permite remover material que se encuentre en suspensión, excepto el material coloidal o sustancias disueltas presentes en el agua. Así también, permite la remoción de entre el 60 a 70 % de SST y hasta un 30 % de la DBO, que sea parte de la fracción orgánica sedimentable presente en el agua residual.

Tratamiento secundario	En el presente proceso, se da la inclusión de procesos de índole biológica donde predominan reacciones bioquímicas, las cuales son generadas por microorganismos catalogados como “eficientes”, los cuales alcanzan a remover entre el 50 y el 95 % de la DBO. Un ejemplo de este tratamiento es el empleo de lodos activados, así como el empleo de lagunas de estabilización.
Tratamiento terciario	Existe una necesidad de considerar tratamientos complementarios, denominado como una fase terciaria, en función de la disposición que se pretenda dar a las aguas tratadas. Esta fase del tratamiento se orientar en alcanzar la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo.

Fuente: Ministerio del Ambiente (20).

Otros procesos que se asocian con los sistemas de tratamiento de aguas residuales, engloban a la desinfección (empleo de cloro, ozono y radiación UV) y la de retención de sólidos y lodos producidos, donde se emplean alternativas de deshidratación, adsorción, electrocoagulación, digestión aerobia, oxidación, etc. (20).

Los criterios que se tienen en cuenta para la selección de los sistemas de tratamiento de aguas residuales incluyen (20):

- La necesidad de identificar las exigencias acerca de la calidad del agua a tratar, respecto de su disposición a un cuerpo receptor o con fines de reuso, en sentido de las categorías del ECA.
- Procurar el alcance de la viabilidad del reuso de las aguas tratadas, de modo que se obtenga un mayor beneficio ambiental, social (salud pública) y económico (productivo).
- Lo oportuno de incluir un presupuesto para la intervención social, que sea considerando dentro de los costos de inversión para las fases de operación y mantenimiento, de modo que favorezca a la participación ciudadana en términos de vigilancia ambiental.
- Lo preciso de contar con información acerca de la elaboración de un estudio definitivo (expediente técnico), cuyas especificaciones y contenido garanticen aspectos técnicos eficientes y el tratamiento de calidad de las aguas residuales.

- Procurar la planificación consensuada acerca de la disponibilidad del área donde se desarrollará el emplazamiento de la infraestructura de servicios, así como conseguir la aceptación de la población (sensibilizada); así también, procurar el alcance de compromisos de las autoridades y la sociedad civil.
- Incentivar por conocer la normatividad legal y técnica acerca del desarrollo de proyectos sobre plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Capacitar al personal responsable del mantenimiento y operación de la planta, generando contextos de toma de conciencia.

Procesos de tratamiento	Remoción (%)		Remoción (ciclos log ₁₀)		
	DBO	Sólidos en suspensión	Bacterias	Helmintos	Quistes
Sedimentación primaria	25 - 30	40 - 70	0 - 1	0 - 1	0 - 1
Lodos activados (a)	70 - 95	70 - 95	0 - 2	0 - 1	0 - 1
Filtros percoladores (a)	50 - 90	70 - 90	0 - 2	0 - 1	1 - 2
Lagunas aireadas (b)	80 - 90	(c)	1 - 2	0 - 1	0 - 1
Zanjas de oxidación (d)	70 - 95	80 - 95	1 - 2	0 - 1	
Lagunas de estabilización (e)	70 - 85	(c)	1 - 6	1 - 4	2 - 4
Biofiltros	80 - 95	80 - 95	1 - 2	0 - 2	0 - 1
Desinfección	-	-	1 - 2	1 - 3	0 - 1

(a) Precedidos de tratamiento primario y seguidos de sedimentación secundaria.

(b) Incluye laguna secundaria.

(c) Dependiente del tipo de lagunas.

(d) Seguidas de sedimentación.

(e) Dependiendo del número de lagunas y otros factores como: Temperatura, periodo de retención y forma de las lagunas.

1 ciclo de log₁₀ = 90% remoción;

2 ciclos = 99%;

3 ciclos = 99.9%, etc.

Figura 01. Representación de la remoción esperada de materia orgánica, sólidos en suspensión y microorganismos patógenos, según el tipo de procesos de tratamiento de aguas residuales.

Fuente: Ministerio del Ambiente (20).

2.2.2. Fundamentos metodológicos de la investigación

a) Electrocoagulación para la remoción de sólidos suspendidos totales:

- Coagulación:

Considera como la acción donde partículas finas se tienden por agrupar, de modo que se forme un cúmulo de mayor densidad. Esto puede verse ayudado con el uso de coagulantes tales como

el alumbre (sulfato de aluminio) y el cloruro de hierro. Algunos polímeros orgánicos y materiales de arcilla se usan también para estimular este proceso. Una vez coaguladas, las partículas más grandes son más fáciles de retirar que las más pequeñas. Las partículas más grandes se convierten en un material llamado flóculo. Este material esponjoso tiene un área de superficie más grande y ayuda más en el proceso de clarificación al atrapar partículas más pequeñas en su superficie (21).

Así también, se considera que la fase de coagulación, acompañada de la floculación y sedimentación, se da en el tratamiento primario de las aguas residuales, sin embargo, para asegurar una decantación más eficiente se complementan con alternativas de tratamiento terciario, como el potencial intercambio iónico producto de la tecnología de la electrocoagulación; dicho potencial de intercambio engloba al agrupamiento de partículas finas para formar otras más grandes, donde algunos polímeros orgánicos y materiales de arcilla se usan también para estimular este proceso, además de potenciales catalizadores y empleo de electrodos metálicos. Una vez coaguladas, las partículas más grandes son más fáciles de retirar que las más pequeñas. Las partículas más grandes se convierten en un material llamado flóculo. Este material esponjoso tiene un área de superficie más grande y ayuda más en el proceso de clarificación al atrapar partículas más pequeñas en su superficie (21).

- Electrocoagulación:

Según Arango (22), la electrocoagulación se entiende como un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados en el agua. La técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente utilizados están el hierro (Fe) y el aluminio (Al). La corriente eléctrica proporciona la

fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes, bien sea suspendidas o emulsificadas. Es así que los contaminantes presentes en el medio acuoso forman agregados, produciendo partículas sólidas que son menos coloidales y menos emulsificadas (o solubles) que en estado de equilibrio. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente (22).

En el proceso de electrocoagulación hay generación de coagulantes *in situ* por la disolución de iones de aluminio o de hierro de los electrodos de aluminio o hierro respectivamente. La generación de iones metálicos tiene lugar en el ánodo y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso las cuales ayudan a la flotación de las partículas floculadas, las mismas que serán retiradas posteriormente (22). Dicha tecnología de tratamiento es utilizada en la remoción de contaminantes de muy diversas aguas residuales, tales como las de la industria de galvanoplastia, electro-plateado metálico, fábricas de envasados, industria del papel (desperdicios de molinos de papel), peleterías, molinos de acero, efluentes con contenido de cromo, plomo o mercurio y efluentes con contenido de aceites como los generados por talleres de maquinaria, refinerías, talleres de reparación de autos, transporte, almacenamiento y distribución de aceites, efluentes de la industria alimentaria, lavanderías e industria textil, y finalmente ha sido utilizada en la remoción de los contaminantes de las aguas para consumo humano y residuales domésticas (22).

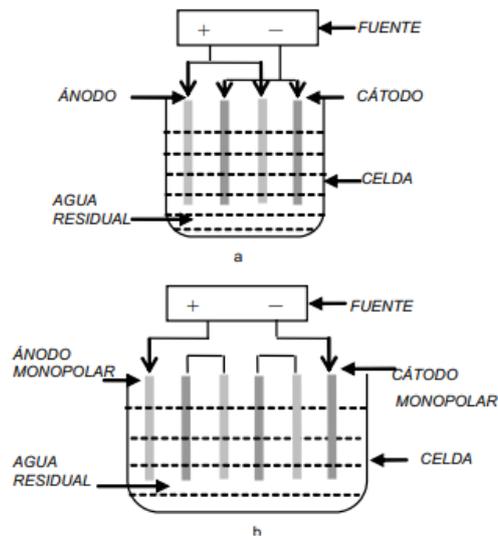


Figura 02. Reactores de electrocoagulación de tipo bach en paralelo y en serio respecto de la conexión de electrodos.

Fuente: Arango (22).

Respecto del diseño del potencial sistema de electrocoagulación (figura anterior), éste considera operaciones enmarcadas en operaciones denominadas como “batch”, que, en su forma más simple, lo conforman una celda que considera un ánodo y un cátodo, los cuales se disponen de forma vertical, los mismos que estarán conectados a una fuente de energía externa (eléctrica). La sección del ánodo tiende por corroerse eléctricamente, debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece, siendo considerado como un pasivo. El considerar un diseño con un par de electrodos no tiende por ser adecuado en la aplicación ya que es necesario tener electrodos de gran área superficial, justificando el empleo de celdas con electrodos monopolares en paralelo o conectados en serie (22). Así también, se debe considerar un regulador de densidad de corriente y un lector de valores de ésta.

o Proceso de electrocoagulación:

En la electrólisis ocurren procesos físicos y químicos, los cuales se pueden describir del siguiente modo (22):

- a) El hierro (Fe) o aluminio (Al) son elementos constituyentes de las placas de metal, los cuales son empleados como electrodo, denominado como de sacrificio o “placa consumible”, la cual aporta iones al sistema. Dichos iones, al ser liberados, tienden por neutralizar cargas de las partículas, logrando desestabilizar sistemas de suspensión asociados a los contaminantes objetos de remoción, dando inicio a la coagulación (agrupación de partículas).
 - b) Así también, la presencia de iones, liberados, tienden por remover elementos contaminados, debido a reacciones químicas y a la precipitación, mostrando también materiales coloidales que tienden por flotar o llegan a precipitarse. En dicho sentido, las partículas coloidales del agua, además de aceites u otros contaminantes, se tienden por mover a través del campo eléctrico aplicado (en función de la intensidad de corriente) y pueden llegar a ionizarse, o están sujetas a sufrir reacciones de hidrólisis o electrolisis, así como evidencian una predisposición de formar radicales libres que alteran las propiedades fisicoquímicas del medio acuoso, así como de los contaminantes, resultando en la generación de un estado excitado y reactivo, lo cual es la causa de la destrucción o insolubilidad de los contaminantes.
 - c) En sentido del incremento de la eficiencia de la remoción de los iones considerados como indeseables, es recomendable pasar el agua residual a través de una serie de celdas; en dicho sentido, los parámetros como pH, conductividad y potencial de óxido-reducción deben ser ajustados de acuerdo con el tipo de contaminante.
- Factores que condicionan la electrocoagulación:
 - a) Densidad de corriente: asociada a la acción de suministro de corriente eléctrica al sistema de tratamiento por

electrocoagulación; de ella se deriva la cantidad de iones de aluminio (Al^{+3}) o hierro (Fe^{+2}) que son liberados por los electrodos. Si se llegase a emplear una intensidad de corriente demasiado grande, se daría una transformación de energía eléctrica en energía calórica, la cual incidiría en la temperatura del agua, produciendo una disminución significativa en la eficacia de aplicación. Para seleccionar un valor adecuado de la densidad de corriente, se debe tener en cuenta parámetros de operación, como el pH y la temperatura (22).

- b) Presencia de cloruro de sodio (NaCl): es oportuno afirmar que las sales tienden por aumentar la conductividad del agua residual. En dicho sentido, se encontró que los iones de cloruro llegan a reducir los efectos de iones pues la presencia de iones sulfatados o carbonatos pueden conducir a la precipitación del calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}), de modo que se produce una capa insoluble que se deposita sobre los electrodos, lo cual generaría un escenario de decrecimiento en la eficiencia de la corriente, es así que se recomienda, para asegurar un proceso de electrocoagulación normal, el mantener cantidades de Cl^- del 20 % (22).
- c) pH: su efecto se refleja en directamente en la eficiencia de la corriente aplicada, así como se relaciona con la disolución del hidróxido del metal; así también, se reporta que el rendimiento del proceso es dependiente de la naturaleza del contaminante, de modo que para asegurar una mayor y/o mejor remoción es necesario considerar valores de pH cercanos a 7, sin embargo, en dicho rango el consumo de energía tiende por ser alto, debido a que hay una variación de la conductividad. Así también, el pH tras aplicación de la electrocoagulación tiende a incrementarse para aguas ácidas, pero decrecer para aguas alcalinas. El incremento de pH a condiciones ácidas se atribuye a la reacción del hidrógeno (22).

d) Temperatura: los efectos de esta característica sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, sin embargo, se logró encontrar que la eficiencia tiende por incrementarse en valores cercados a los 60°C, punto donde se hace máxima, para luego decrecer. Dicho incremento de la eficiencia se atribuye al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie de los electrodos (22).

o Ventajas y desventajas de la electrocoagulación:

a) Ventajas:

- Tiende por generar costos de operación menores a comparación de los procesos convencionales (22).
- Su requerimiento de materiales simples y fáciles de operar, favorece a la operatividad del sistema (22).
- Alcanza a potabilizar aguas (22).
- Llega a eliminar requerimientos de uso de productos químicos, así como su almacenamiento (22).
- Alcanza a generar lodos compactos y en menor cantidad, favoreciendo a la disposición óptima y viable de estos lodos (22).
- Se alcanzan a formar flóculos similares a los producidos por acción química, empero éstos son más grandes y contienen menos agua ligada, además de ser más estables y pueden ser separados rápidamente a través de la filtración (22).
- Se da la ausencia de magnesio en los lodos (22).
- Evidencia una alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes (22).
- Alcanzar a purificar el agua; permite su reciclaje (22).
- Llega a reducir escenarios de contaminación en los cuerpos de agua (22).

- Alcanza a producir fluentes con menor cantidad de sólidos totales, comparado con los tratamientos químicos, contribuyendo al alcance de menores costos de tratamiento de aguas (22).
- Logra remover partículas coloidales que son más pequeñas, ya que el campo eléctrico influye en su movimiento, haciéndolo más rápido, lo cual facilita la coagulación (22).
- Las burbujas de gas producidas tienden por concentrarse fácilmente, de modo que se facilita su recuperación y remoción (22).

b) Desventajas:

- Abarca a la reposición de los electrodos de sacrificio empleados en el sistema (22).
- Los lodos tienden por contener altas concentraciones de Fe y Al, dependiendo del material del electrodo empleado (22).
- Tiende por no ser efectivo para la remoción de DBO soluble, proveniente de solventes (22).
- El empleo de energía eléctrica puede llegar a ser más costoso en ciertos lugares (22).
- Se genera una película de óxido impermeable, que puede formarse en el cátodo, conllevando a la pérdida de eficiencia del proceso (22).

b) Determinación de la concentración de sólidos suspendidos totales:

Según Hernández (23), los sólidos reúnen un cúmulo constituido por partículas causantes de color, microorganismos, limo, etc., los cuales no se llegan a sedimentar sino después de periodos más prolongados; dicho efecto se traduce en el cambio de color y la turbidez de las aguas sedimentadas sin coagulación. Por otro lado, los sólidos disueltos que se componen de materia orgánica e inorgánica, tienden por ser

invisibles por separado, además que no son sedimentables, causando diferentes problemas a menos que sean precipitados y removidos mediante métodos físicos y químicos. El método estandarizado para determinar su concentración se aplica a nivel de laboratorio para la matriz agua. Es mismo es un método gravimétrico que se basa en la retención de las partículas sólidas en un filtro a través del cual se hace pasar una muestra homogénea; el residuo que queda retenido se seca a 103 - 105°C. El incremento en el peso del filtro representa la cantidad de sólidos suspendidos totales; dicho método se refleja finalmente en términos cuantitativos por la siguiente fórmula:

$$SST = \frac{(A - B)1000}{V}$$

Donde:

- SST: sólidos suspendidos totales (mg/l).
- A: peso final del conjunto con el residuo seco (mg).
- B: peso inicial del conjunto (mg).
- V: volumen de muestra filtrada (ml).

c) Muestreo de aguas residuales

Según la Autoridad Nacional del Agua (24), para el muestreo, o monitoreo, de los recursos hídricos superficiales debe contemplar lo siguiente:

- Recursos humanos: considerar al personal competente o capacitado para la toma adecuada de muestras.
- Recursos económicos: considerando traslados, viáticos, análisis de muestras, materiales, etc.
- Considerar los tipos de muestreo: puntual o simple, compuesta o integrada.
- Planificar el muestreo o monitoreo: antes, durante y después del muestreo, considerando factores climatológicos.

- Establecer los puntos de muestreo: en función de los parámetros y estándares de calidad o límites máximos que se han de comparar.
- Codificación de las muestras: de modo que se garantice un seguimiento adecuado de las muestras en especial a nivel de laboratorio acreditado.
- Parámetros a considerar en el monitoreo: acorde a lo mostrado en la figura siguiente.

Parámetros	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4 Ríos, lagunas y lagos	Categoría 4 Ecosistemas marino-costeros
Parámetros de campo	pH, T, Cond, OD	pH, T, OD	pH, T, Cond, OD	pH, T, Cond, OD	pH, T, OD
Parámetros químico-físicos	DBO ₅ , AyG, N-NO ₃ , N-NH ₃ , P, metales (Al, As, B, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn)	DBO ₅ , AyG, SST, N-NO ₃ , P, sulfuros, metales (As, B, Ba, Cd, Cu, Cr ⁶⁺ , Hg, Ni, Pb, Zn)	DBO ₅ , AyG, N-NO ₃ , sulfatos, metales (Al, As, B, Ba, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn)	DBO ₅ , AyG, SST, N _{ox} , N-NO ₃ , N-NH ₃ , P, metales (As, Ba, Cd, Cu, Cr ⁶⁺ , Hg, Ni, Pb, Zn),	DBO ₅ , AyG, N-NO ₃ , N-NH ₃ , P, metales (As, Cd, Cu, Cr ⁶⁺ , Hg, Ni, Pb, Zn)
Parámetros microbiológicos	Coliformes termotolerantes, <i>Escherichia coli</i> , Organismo de vida libre	Coliformes termotolerantes,	Coliformes termotolerantes, <i>Escherichia coli</i> , Huevos y larvas de helmintos,	Coliformes termotolerantes,	

Figura 03. Validez de la evaluación del parámetro fisicoquímico de SST para la categoría 4 establecida por el ECA - agua, además de parámetros de campo.

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (24).

- Preparación de materiales, equipos e insumos.
- Seguridad en el trabajo de campo: empleando los equipos y medidas de seguridad adecuadas que permitan disminuir el potencial de sufrir consecuencias negativas, acorde al alcance de los puntos de muestreo.
- Rotulado y etiquetado: complementario a la codificación de muestras, pero realizada en campo (*in situ*).
- Preservación de las muestras: siempre en cuando se tomen muestras que contengan materia orgánica y se encuentre alejadas del laboratorio.
- Llenado de cadena de custodia: como evidencia objetiva del cotejo de información de campo, así como de la codificación y características de las muestras que considere conveniente el laboratorio.

2.3. Definición de términos

- a) Aerobio: “es un medio donde hay oxígeno presente” (21).
- b) Anaerobio: “es un medio donde no hay oxígeno presente” (21).
- c) Aguas residuales: “comprende a las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas” (19).
- d) Aguas residuales domésticas: “son aquellas aguas residuales de origen residencial, comercial e institucional que contienen desechos fisiológicos y otros provenientes de la actividad humana (preparación de alimentos, aseo particular, etc.)” (24).
- e) Aguas residuales industriales: “son aguas residuales originadas como consecuencia del desarrollo de un proceso productivo, que incluye las provenientes de la actividad minera, agrícola, pesquera, agroindustrial, entre otras” (19).
- f) Aguas residuales municipales: “son aguas residuales domésticas que pueden mezclarse con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial recolectadas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado” (24).
- g) Cadena de custodia: “es el documento fundamental en el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos que garantiza la autenticidad de las muestras tomadas en campo hasta su llegada al laboratorio” (24).
- h) Contaminante: “es un agente que hace al agua impura o no apta para un uso particular” (21).
- i) Cuerpo receptor: “es la corriente o depósito natural de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales, tratadas o no, así como los terrenos en donde se infiltran o inyectan dichas aguas, cuando puedan contaminar los suelos, el subsuelo o los acuíferos” (19).
- j) Desarenador: “es la estructura diseñada para retener la arena que traen las aguas residuales a fin de evitar que ingresen al proceso de tratamiento y lo obstaculicen creando serios problemas” (21).
- k) Desaguar: “se da al eliminar el agua; se emplea para describir la eliminación de agua para hacer los lodos de aguas residuales tratadas sean más fáciles de manejar” (21).

- l) Electrocoagulación: “se comporta como un proceso que emplea los fundamentos de la electroquímica, la coagulación y flotación o precipitación, para eliminar los contaminantes del agua con el uso de electrodos (cátodos y ánodos), que por acción de un potencial de energía generan un coagulante, el cual lleva a la coagulación *in situ*” (25).
- m) Embalse: “es la acumulación de agua producida por la construcción de una presa en el lecho de un río que cierra parcial o totalmente su cauce, a fin de utilizarla en el riego de terrenos, abastecimiento de poblaciones y/o producción de energía” (21).
- n) Estándar de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua): “es el nivel de concentración máximo de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en los recursos hídricos superficiales que no presentan riesgo significativo para la salud de las personas ni contaminación del ambiente” (21).
- o) Fuente contaminante natural: “es la fuente única, identificable y localizada de contaminación real o potencial de los recursos hídricos, como un vertimiento de aguas residuales domésticas, municipales, industriales o mineros” (21).
- p) Fuente contaminante difusa: “es la fuente de contaminación real o potencial de los recursos hídricos que se extiende sobre grandes áreas de terreno, como pasivos ambientales mineros y de explotación de hidrocarburos, zonas de ganadería y agricultura intensiva, zonas de actividades mineras y de explotación de hidrocarburos, zonas rurales e industriales, entre otras” (21).
- q) Laboratorio acreditado: “es el laboratorio que cuenta con el reconocimiento del Instituto Nacional de Calidad (INACAL) u otra entidad internacional equivalente que cumple con los requisitos establecidos en la norma ISO 17025, que establece los requisitos generales que deben cumplir los laboratorios de ensayo para acreditar su competencia” (21).
- r) Muestra de agua: “es la parte representativa del material a estudiar en la cual se analizarán los parámetros de interés” (21).
- s) Parámetros de calidad: “son los compuestos, elementos, sustancias, indicadores y propiedades físicas, químicas y biológicas de interés para la determinación de la calidad del agua” (21).
- t) Recurso hídrico: “comprende el agua superficial, subterránea, continental y los bienes asociados con ésta. Se extiende el agua marítima y atmosférica en lo que resulte aplicable” (21).

- u) Sólidos suspendidos totales (SST): “son partículas sólidas presentes en un líquido como el agua residual donde su concentración es expresada en miligramos por litro (mg/L)” (19).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método, tipo y nivel de la investigación

3.1.1. Métodos de la investigación

El método empleado a lo largo de la investigación fue el científico, el cual, según Hernández-Sampieri *et. al.* (26), abarca a una serie de procedimientos estructurados para alcanzar conocimientos validados partiendo que la ciencia siempre se ha asociado con lo real. A partir de dicho cotejo se emplearon un método general y otro específico:

- a) Método general: se empleó el método hipotético-deductivo, debido a que se abarcó a la observación del fenómeno objeto de estudio (aplicación de la electrocoagulación) así como el contraste de hipótesis en relación a dicho fenómeno para así sumar un entorno de deducción (entorno general a situaciones específicas) de modo que se pueda contribuir a validar una de las hipótesis propuestas además de complementarla con el conocimiento adquirido (26).

- b) Método específico: se emplearon los entornos de la observación y la experimentación (26); el entorno de observación se asocia con el empleo del método científico, así como del método general empleado, de modo que se garantice el alcance de información y conocimientos

representativos; el entorno de experimentación se complementa con la elección del método científico y se asocia con el hecho de estudiar la modificación de una de las variables de estudio, la cual fue propiamente la independiente (electrocoagulación) al propiamente emplear distintas intensidades de corriente en su aplicación así como tiempos de contacto desiguales de modo que se pueda alcanzar una conclusión más precisa en la investigación; se complementa dicho corte mediante el diseño de investigación propuesto líneas abajo. El procedimiento metodológico seguido para el entorno experimental fue:

1. Se procedió a la toma de muestras de agua en campo; sobre la toma de muestras en campo asociada al propósito de la investigación, se presenta el anexo 10 (esquemático), siendo la secuencia la siguiente:
 - a. Se seleccionaron los puntos de muestreo considerando tres (03) lugares estratégicos y detallados respecto de su ubicación en la sección "muestra".
 - b. A partir de dicho entorno de planificación en gabinete, se procedió a cotejar los materiales necesarios para la toma de muestra: envases, equipos de protección personal, cadena de custodia, etiquetas y cooler.
 - c. Se procedió a las tomas de muestras en campo (ver panel fotográfico para el detalle, anexo 07); se consideró la toma de 02 muestras por cada punto, siendo cada muestra de 1 litro.
 - d. Se registraron en la cadena de custodia los datos de la toma de muestra: hora, fecha, coordenadas, datos personales y otros.
 - e. Paralelamente al etiquetado de los envases, se procedió a la medición del pH de las muestras.
 - f. Se conservaron las muestras para la fase experimental.
2. Se cotejaron y compararon las condiciones ambientales de los puntos de muestreo (ver anexo 06); de modo que se identifiquen las principales fuentes de generación de aguas residuales y otros aspectos ambientales (paralelo a la toma de muestras).

3. Se cotejaron los materiales a emplear en el experimento: placas de Al y Fe, vasos de precipitado, fuente de energía, multitéster, entre otros accesorios de bioseguridad (ver anexo 11); según lo descrito en los fundamentos metodológicos, las condiciones de experimentación (aplicación) de la electrocoagulación, requiere de incidir energía (fuente: corriente eléctrica), lo cual para un contacto con el agua fue mediante las placas de Al y Fe (separadas en 25 mm) conectadas a un medio de generación de energía eléctrica (transformador) y medida a través del multitéster (intensidad de corriente) para comprobar los valores propuestos en el diseño de investigación (2, 2,5 y 3 A); el tiempo de contacto fue controlado por el reloj (10, 15 y 20 minutos) mientras se incidía corriente eléctrica al agua en contacto con las placas (envase: vaso de precipitado con una capacidad de 500 mL). Los accesorios de bioseguridad correspondieron a los empleados en un laboratorio de ensayos químicos: guardapolvo, guantes aislantes y mascarilla. Para observar el detalle complementario, ver anexo 07 y 11, y la secuencia experimental fue la siguiente:
 - a. Se cotejaron los materiales de la experimentación: fuente de energía eléctrica, equipo medidor de intensidad de corriente (multitéster), placas de Al y Fe, vasos de precipitado, conectores en forma de cocodrilo (conexión), equipos de protección personal y envases para conservar y enviar a laboratorio las muestras sujetas a la experimentación.
 - b. Se conectaron las placas a la fuente de energía, habiendo medido para cada experimento la variación de intensidad de corriente (2, 2,5 y 3 A, ver tabla 04 y anexo 07) con el multitéster, y se colocaron en el vaso de precipitado con la muestra de agua para cada punto y fase experimental.
 - c. Se controló para cada experimento el tiempo (10, 15 y 20 minutos) de contacto (ver tabla 04).
 - d. Tras cada experimentación, se procedió a preservar las submuestras en envases, los mismos que se etiquetaron y se rellenó el registro de datos (ver anexo 04) para ser enviados a laboratorio.

4. Se procedió a enviar a laboratorio dichas submuestras (momento B según el anexo 10 y 11), así como las muestras no sujetas a la experimentación de modo que se determine las concentraciones iniciales por cada punto sujeto a la toma de muestras.
5. Al obtener las concentraciones iniciales y finales de los sólidos suspendidos totales, se procedió al análisis comparativo mostrado en el Capítulo IV, siendo éste comprobado a través de la estadística para así alcanzar los objetivos planteados acerca de la aplicación de la electrocoagulación para remover sólidos suspendidos totales de las aguas del contexto geográfico de estudio.

3.1.2. Tipo de la investigación

El tipo de investigación empleado abordó al enfoque aplicado (26), es decir, se empleó información existente acerca de la teoría del método de electrocoagulación y la remoción de sólidos suspendidos totales, con el objeto de alcanzar un aporte que se asocie con la potencial solución del escenario de problemática expuesto en la sección de planteamiento, de modo que se aporte en el alcance del desarrollo social y económico respetando al ecosistema.

3.1.3. Nivel de la investigación

El nivel de la investigación que más se adecuó a la presente fue el correlacional (26), donde se buscó la relación de las variables en estudio tras la experimentación planteada. La significancia de la prueba, en términos de influencia, se asocia al hecho de establecer un escenario más allá de una relación directa, es decir, el nivel propiamente de dicha relación basada en las diversas intensidades de energía eléctrica empleado, así como la consideración de diversos tiempos de contacto que puedan suponer el alcance de una eficiencia adecuada y mayor en términos de coagulación.

3.2. Diseño de la investigación

Se empleó el diseño experimental acorde al método específico empleado, así como se complementó con el corte pre-experimental (26), es decir, se manipuló a la variable independiente de estudio (electrocoagulación) con la finalidad de alcanzar un punto donde la eficiencia del tratamiento refleje un mayor porcentaje de remoción, tomando en cuenta un contexto de experimentación en laboratorio, de modo que la hipótesis validada se encuentre asociada con una potencial aplicación en un segundo momento independiente a la presente tesis. El esquema del diseño de investigación es el siguiente:

$$X_1 \rightarrow O_1 \rightarrow Y_1$$

$$X_2 \rightarrow O_2 \rightarrow Y_2$$

$$X_3 \rightarrow O_3 \rightarrow Y_3$$

Donde:

- ✓ O = observación (1, 2 y 3 para cada experimento).
- ✓ $X_{1, 2 y 3}$ = electrocoagulación a distintas intensidades de corriente y distinto tiempo de contacto respectivamente.
- ✓ $Y_{1, 2 y 3}$ = remoción de SST en correspondencia a la variación de los parámetros de electrocoagulación.

Tabla 04. *Condiciones de experimentación empleadas en la investigación.*

Observación	Intensidad de corriente	Tiempo de contacto	Remoción esperada de SST
O ₁	2 A	10 min	Y ₁
	2 A	15 min	
	2 A	20 min	
O ₂	2,5 A	10 min	Y ₂
	2,5 A	15 min	
	2,5 A	20 min	
O ₃	3 A	10 min	Y ₃
	3 A	15 min	
	3 A	20 min	

Fuente: elaboración propia.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Se asumió como población en la investigación a las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño. Según lo observado y cotejado en la guía de observación (ver anexo 06) se identificaron procesos de curtiembre aguas abajo además de la generación de aguas residuales de fuentes domésticas, que evidencian un escenario de contaminación del recurso hídrico, por ende, potencialmente una alta concentración de sólidos suspendidos totales (SST).

3.3.2. Muestra

La muestra de la investigación partió de la selección no paramétrica, es decir, donde no se empleó una fórmula para determinar una cantidad de muestras en correspondencia a un nivel de confianza, la cual asevera Hernández-Sampieri *et. al.* como a conveniencia (26), donde la condición es tener el alcance de la mayor cantidad de datos en disponibilidad, para que de tal modo se asegure representatividad en los resultados.

Para el muestreo del agua se asumió a lo reglamentado en el Protocolo Nacional (24), asumiendo a un muestreo simple o puntual, tomando 06 litros de agua en total inicialmente, 02 litros por cada punto. Así también, se consideraron a 09 submuestras derivadas de la experimentación que fueron enviadas al laboratorio acreditado para fines de determinación de las concentraciones finales resultantes; constituyen así: 03 muestras de 500 ml como blancos de cada punto y 09 submuestras sujetas a las pruebas, también de 500 ml cada una, las cuales fueron debidamente rotuladas y acompañadas por la cadena de custodia (ver anexo 02) y registro de datos (ver anexo 04), de modo que también se cumpla con el protocolo mencionado.

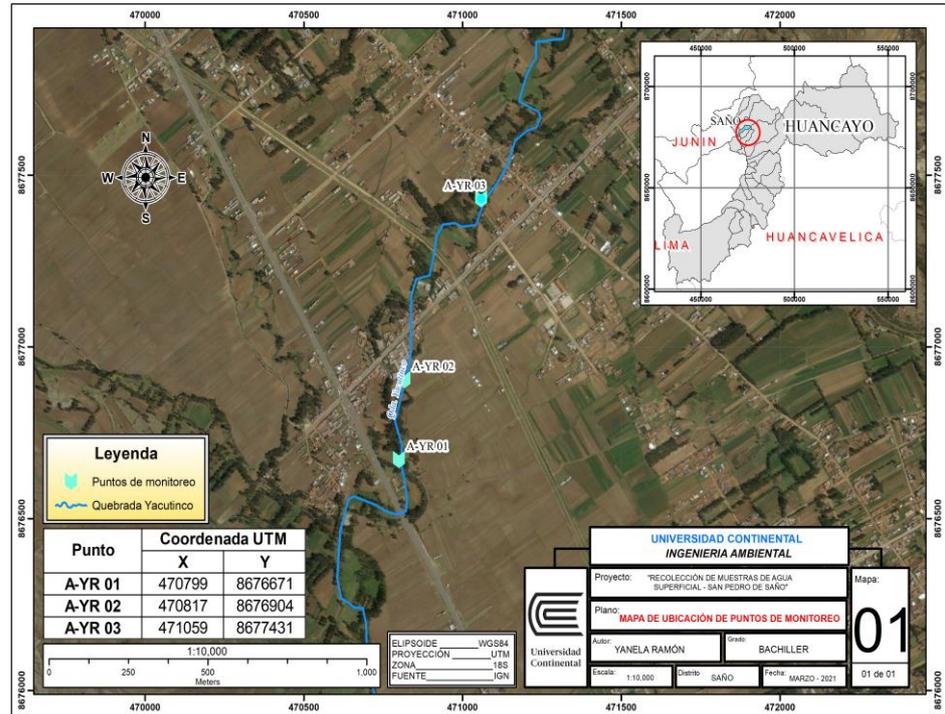


Figura 04. Ubicación de los puntos de muestreo inicial.

Fuente: elaboración propia con ArcGIS.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

Según Arroyo (27), las técnicas de observación abarcan a un grupo de condiciones abstractas, como es el caso de la observación, valga la redundancia, o la aplicación de encuestas, siendo éstas complementadas tangiblemente con los instrumentos de recolección de datos. Para la presente se empleó a la observación a lo largo del cotejo de información, siendo ésta seleccionada como técnica de recolección de datos.

3.4.2. Instrumentos de recolección de datos

En correspondencia a la técnica de recolección de datos seleccionada (27), se empleó al siguiente instrumento de recolección de datos:

- a) Lista de cotejo: orientada al cotejo de los datos históricos respecto de la realización del experimento, así como el cotejo de la codificación de muestras, la cual también fue proporcionada por el laboratorio acreditado en formato (cadena de custodia), evidenciándose como registro asociado a la investigación en el anexo 02 y 04.
- b) Guía de observación: aplicada para registrar condiciones ambientales (ver anexo 06).

3.5. Técnicas de análisis y procesamiento de datos

Para el análisis de datos en correspondencia a la validación de la información vertida en la investigación, se asume de antemano a la estadística descriptiva en su entorno gráfico para evidenciar a las concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) respecto del límite a comparar antes y después del experimento, para llegar a aplicar la estadística inferencial entorno a la prueba de hipótesis a un nivel de confianza adecuado (95 %). Se aplicó la prueba paramétrica (tras validar la normalidad y/o dispersión adecuada de datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk) de t de student para muestras relacionadas, mientras que, en su conjunto para la prueba de hipótesis general, se aplicó la prueba de correlación de Pearson, de modo que se pueda llegar a una conclusión validada y significativa (28). El análisis complementario para la determinación de la concentración de los SST a nivel de laboratorio fue el de desecación a 103 - 105°C según los protocolos normalizados que garanticen su acreditación a nivel de INACAL (Instituto Nacional de Calidad).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de la investigación

a) Determinación de las concentraciones iniciales:

Tras requerir de los servicios del laboratorio acreditado, se cotejaron los valores reportados por el informe de ensayo correspondiente al muestreo realizado, los cuales se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 05. *Concentraciones iniciales de SST para los puntos de muestreo.*

Código de punto	Concentración inicial de SST (mg/L)	Valor de pH	Observación
A-YR-01	296,5	6,7	Cercano a la carretera central, aguas abajo de la población.
A-YR-02	34,3	6,8	Punto intermedio de muestreo.
A-YR-03	18,6	6,8	Paralelo a la población de San Pedro de Saño.

Fuente: elaboración propia según lo reportado en el anexo 03.

Según lo reportado por el D.S. 004-2017-MINAM, que muestra los valores de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, el valor para los sólidos suspendidos totales (SST) para la Categoría 4: Conservación del ambiente acuático no debe ser mayor que 100 mg/L (≤ 100 mg/L) (ver anexo 08).

El valor del pH se mantuvo dentro del rango para el ECA para agua de Categoría 4: $6,5 < 6,7$; $6,8 < 9$, mientras tanto, el valor del punto A-YR-01, cercano a la carretera central y ubicado aguas debajo de la población, rebasa dicho ECA ($296,5 \text{ mg/L} > 100 \text{ mg/L}$), mientras que en los otros dos puntos no se sobrepasa dicho valor.

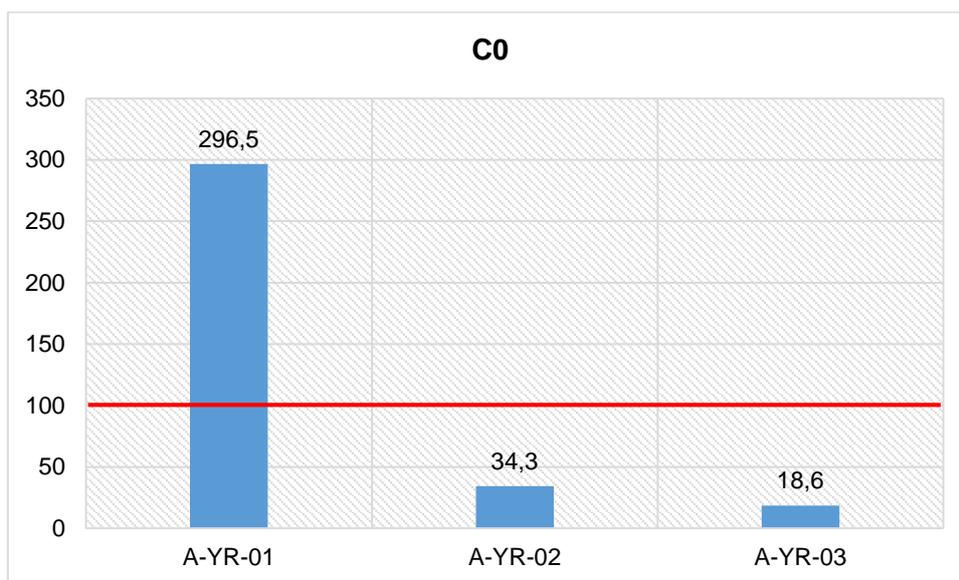


Figura 05. Gráfico que muestra los valores de la concentración inicial.

Fuente: elaboración propia.

Según la guía de observación empleada (ver anexo 06), se puede explicar dicho escenario de contaminación del agua por sólidos suspendidos totales (SST) ya que en dicho punto llega la carga total de descargas de aguas residuales vertidas sin tratamiento previo, sumado a que entre los puntos A-YR-01 y A-YR-02 existen escenarios de descarga de efluentes derivados de producción de curtiembre como única actividad industrial identificada, afectando así la calidad del agua, demostrando la necesidad del tratamiento de las aguas residuales en el distrito de San Pedro de Saño.

A partir de la determinación de las concentraciones finales, se procedió a realizar el experimento de la aplicación de la electrocoagulación, por ende, se determinaron concentraciones finales derivadas del tratamiento de las aguas objeto de estudio.

b) Determinación de las concentraciones finales:

Tras nuevamente requerir de los servicios del laboratorio acreditado, se cotejaron los valores reportados por el informe de ensayo tras la experimentación, los cuales se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 06. *Contenido de SST antes y después del tratamiento.*

Código de punto inicial	C0 (mg/L)	Código de submuestra experimental	C1 (mg/L)
A-YR-03	18,6	YR-E-01	3,444
		YR-E-02	2,928
		YR-E-03	2,699
A-YR-02	34,3	YR-E-04	5,951
		YR-E-05	4,931
		YR-E-06	4,026
A-YR-01	296,5	YR-E-07	39,942
		YR-E-08	35,461
		YR-E-09	31,345

Fuente: elaboración propia según lo reportado en el anexo 05.

Se observa que los valores obtenidos tras el entorno experimental se encuentran por debajo del valor reportado para los sólidos suspendidos totales (SST) por el D.S. 004-2017-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, Categoría 4: conservación del ambiente acuático, el cual no debe ser mayor que 100 mg/L (≤ 100 mg/L).

Así también, se detalla que se emplearon condiciones de experimentación que abarcó a la variación en la intensidad de corriente y tiempo de contacto, considerando intensidades de 2 A, 2,5 A y 3 A, y un tiempo de contacto de 10, 15 y 20 minutos; la mayor intensidad de corriente (3 A) se aplicó a la muestra inicial que representó una mayor carga de sólidos suspendidos totales (A-YR-01), mientras que la intensidad de corriente de 2,5 A correspondió al punto A-YR-02 y el de 2 A al punto A-YR-03, mientras que a cada unidad experimental se sometió a los tiempos de contacto propuestos.

Tabla 07. Correspondencia de concentraciones para el experimento.

Intensidad de corriente	Tiempo de contacto	C0 (mg/L)	C1 (mg/L)
2 A	10 min	18,6	3,444
	15 min		2,928
	20 min		2,699
2.5 A	10 min	34,3	5,951
	15 min		4,931
	20 min		4,026
3 A	10 min	296,5	39,942
	15 min		35,461
	20 min		31,345

Fuente: elaboración propia.

Se observa que para las intensidades de corriente empleadas se llegó a reducir las concentraciones iniciales de sólidos suspendidos totales, mientras que los tiempos de contacto propuestos se asociaron a un alcance aún mayor de reducción de cada concentración, evidenciando un primer aporte el cual será demostrando estadísticamente en una sección posterior del presente capítulo.

c) Determinación de la eficiencia del experimento:

Para determinar la eficiencia se cotejaron las concentraciones inicial y final, donde la concentración inicial correspondió al 100 %, mientras que la resta (remoción alcanzada de SST) entre ambas concentraciones correspondió a la reducción porcentual tras la aplicación del experimento, es decir, cada porcentaje resultante demostró la eficiencia de la aplicación de la electrocoagulación. Se detallan los resultados alcanzados en la siguiente tabla.

$$\frac{((C0 - C1) * 100)}{C0} = x \%$$

Tabla 08. *Eficiencia de la aplicación de la electrocoagulación.*

C0 (mg/L)	C1 (mg/L)	Eficiencia	Eficiencia promedio f(C0)
	3,444	81,48 %	
18,6	2,928	84,26 %	83,74 %
	2,699	85,49 %	
	5,951	82,65 %	
34,3	4,931	85,62 %	85,51 %
	4,026	88,26 %	
	39,942	86,53 %	
296,5	35,461	88,04 %	88,00 %
	31,345	89,43 %	

Fuente: elaboración propia.

Se observa que se alcanzaron valores superiores al 80 % de eficiencia, donde el mayor % de remoción se dio al tener un mayor tiempo de contacto, independientemente de la intensidad de corriente y de la concentración inicial por cada punto de muestreo, sin embargo, el mayor % de eficiencia se alcanzó a una mayor intensidad de corriente (3 A) y un mayor tiempo de contacto (20 min), alcanzando un 89,43 %, en correspondencia, el menor % de eficiencia (81,48 %) se alcanzó a una menor intensidad de corriente (2 A) y menor tiempo de contacto (10 min). La composición fisicoquímica de las muestras se evidenció como similar, así como el pH (promedio de 6,8), es por ello que la electrocoagulación alcanzó valores similares y altos de remoción de SST.

4.1.1. Prueba de hipótesis

a) Aplicación de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk:

Para la determinación de la prueba estadística a emplear, se utilizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (28), prueba aplicada para muestras menores a 30, obteniendo los siguientes resultados.

Pruebas de normalidad^{a,c,d}

	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
C12A	,266	3	.	,953	3	,582
C12.5A	,183	3	.	,999	3	,934
C13A	,178	3	.	,999	3	,953

a. C02A es una constante y se ha desestimado.

b. Corrección de la significación de Lilliefors

c. C02.5A es una constante y se ha desestimado.

d. C03A es una constante y se ha desestimado.

Figura 06. Representación de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

Fuente: elaboración propia con SPSS.

Para la comparación se formularon las siguientes hipótesis de contraste:

- H_0 : Los datos de concentración de SST inicial y final no presentan distribución normal ($x < 0,05$).
- H_a : Los datos de concentración de SST inicial y final presentan distribución normal ($x > 0,05$).

Se observan que los valores de significancia estadística (Sig.) para la prueba de Shapiro-Wilk son mayores que 0,05, por tanto, los datos de concentración de SST inicial y final presentan distribución normal, demostrando así el empleo de pruebas estadísticas paramétricas, como el caso de la t de student y la correlación de Pearson.

b) Pruebas de t de student para muestras relacionadas (C0 vs C1):

- Prueba de t de student para muestras relacionadas para la concentración inicial y final del punto A-YR-01:

Tabla 09. C0 y C1 del punto A-YR-01.

C0 (mg/L)	C1 (mg/L)
	39,942
296,5	35,461
	31,345

Fuente: elaboración propia.

Prueba de muestras relacionadas									
		Diferencias relacionadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desviación tip.	Error tip. de la media	95% Intervalo de confianza para la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	C03A - C13A	260,917333	4,299791	2,482486	250,236060	271,598607	105,103	2	,000

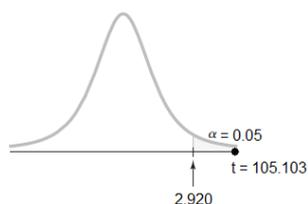


Figura 07. Prueba de t de student para el punto A-YR-01.

Fuente: elaboración propia con SPSS.

Se formulan las siguientes hipótesis de contraste:

- H_0 : la electrocoagulación no remueve significativamente los sólidos suspendidos totales del punto A-YR-01.
- H_a : la electrocoagulación remueve significativamente los sólidos suspendidos totales del punto A-YR-01.

Se observa que el valor de t es igual a 105,103; dicho valor recae sobre la zona de rechazo de H_0 (es mayor que el valor crítico de prueba 2,920, ver anexo 09), por tanto, validando que la electrocoagulación remueve significativamente los sólidos suspendidos totales del punto A-YR-01, donde se tuvo un valor de concentración inicial de SST que sobrepasa el ECA de agua y donde se aplicó una intensidad de corriente de 3 A.

- Prueba de t de student para muestras relacionadas para la concentración inicial y final del punto A-YR-02:

Tabla 10. C0 y C1 del punto A-YR-02.

C0 (mg/L)	C1 (mg/L)
	5,951
34,3	4,931
	4,026

Fuente: elaboración propia.

Prueba de muestras relacionadas									
		Diferencias relacionadas				t	gl	Sig. (bilateral)	
Par		Media	Desviación tip.	Error tip. de la media	95% Intervalo de confianza para la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	C02.5A - C12.5A	29,330667	,963072	,556030	26,938262	31,723071	52,750	2	,000

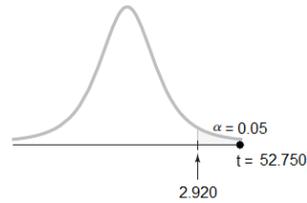


Figura 08. Prueba de t de student para el punto A-YR-02.

Fuente: elaboración propia con SPSS.

Se formulan las siguientes hipótesis de contraste:

- H_0 : la electrocoagulación no remueve significativamente los sólidos suspendidos totales del punto A-YR-02.
- H_a : la electrocoagulación remueve significativamente los sólidos suspendidos totales del punto A-YR-02.

Se observa que el valor de t es igual a 52,750; dicho valor recae sobre la zona de rechazo de H_0 (es mayor que el valor crítico de prueba 2,920, ver anexo 09), por tanto, validando que la electrocoagulación remueve significativamente los sólidos suspendidos totales del punto A-YR-02, aplicando una intensidad de corriente de 2,5 A.

- Prueba de t de student para muestras relacionadas para la concentración inicial y final del punto A-YR-03:

Tabla 11. C0 y C1 del punto A-YR-03.

C0 (mg/L)	C1 (mg/L)
	3,444
18,6	2,928
	2,699

Fuente: elaboración propia.

Prueba de muestras relacionadas									
		Diferencias relacionadas				t	gl	Sig. (bilateral)	
Par 1		Media	Desviación tip.	Error tip. de la media	95% Intervalo de confianza para la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	C02A- C12A	15,576333	,381602	,220318	14,628381	16,524286	70,699	2	,000

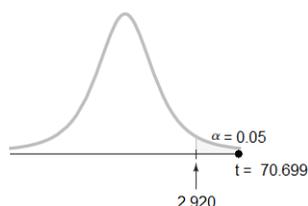


Figura 09. Prueba de t de student para el punto A-YR-03.

Fuente: elaboración propia con SPSS.

Se formulan las siguientes hipótesis de contraste:

- H_0 : la electrocoagulación no remueve significativamente los sólidos suspendidos totales del punto A-YR-03.
- H_a : la electrocoagulación remueve significativamente los sólidos suspendidos totales del punto A-YR-03.

Se observa que el valor de t es igual a 70,699; dicho valor recae sobre la zona de rechazo de H_0 (es mayor que el valor crítico de prueba 2,920, ver anexo 09), por tanto, validando que la electrocoagulación remueve significativamente los sólidos suspendidos totales del punto A-YR-02, aplicando una intensidad de corriente de 2 A.

c) Prueba de correlación de Pearson (C0 vs C1 totales):

Para la prueba de correlación de Pearson, se tomaron el total de valores de concentración inicial y final (ésta tras el experimento), de modo que se valide la relación entre las variables de estudio, de modo que se valide la eficiencia determinada anteriormente.

Tabla 12. Concentraciones iniciales y finales de SST.

C0 (mg/L)	C1 (mg/L)
296,5	39,942

	35,461
	31,345
	5,951
34,3	4,931
	4,026
	3,444
18,6	2,928
	2,699

Fuente: elaboración propia.

Correlaciones

		C0G	C1G
C0G	Correlación de Pearson	1	,990**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	9	9
C1G	Correlación de Pearson	,990**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	9	9

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Figura 10. Representación de la correlación de Pearson.

Fuente: elaboración propia con SPSS.

Se formulan las siguientes hipótesis de contraste:

- H_0 : no existe una relación significativa entre la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020 (Sig. > 0,05).
- H_a : existe una relación significativa entre la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020 (Sig. < 0,05).

Se observa que el nivel de significancia estadística es menor que 0,05 ($0,000 < 0,05$), por tanto, se valida que existe una relación significativa entre la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020, contrastado también por el valor de la correlación de Pearson ($r = 0,990$), demostrando que existe una relación muy fuerte entre las variables de estudio. En relación a la hipótesis de investigación planteada, ésta también se valida, en dicho sentido la electrocoagulación demuestra ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020, debido a que demuestra una alta eficiencia de remoción (más de 80 %), tal como se observa en la tabla 08.

4.2. Discusión de resultados

Para abordar el contraste con los resultados y conclusiones reportados en los antecedentes de la investigación, es preciso iniciar con la determinación del estado de los parámetros: sólidos suspendidos totales y pH, el primero objeto de la investigación y el segundo como condicionante reportado en los mencionados antecedentes, como es el caso de lo propuesto por Aguilar (6), que menciona que el incremento de la intensidad de corriente eléctrica a 8 A también influye en el incremento del valor del pH, así como alcanza una capacidad de remoción mayor, sin embargo, aquel escenario representar un incremento de costos, directamente por el incremento de la intensidad de corriente y por el tentativo empleo de reactivos o filtros biológicos (13) para reducir el valor del pH, demostrando así que el valor reportado en la investigación (pH = 6,7; 6,8) y el alcance de valores altos de remoción de SST (promedio de 85,75 %), evidencia condiciones sin alteración significativa de la acidez o alcalinidad del agua en el contexto de estudio; así también, el autor citado (6) reporta que alcanzó hasta un 87 % de eficiencia de remoción de SST aplicando una intensidad de corriente de 5 A y tiempo de contacto de 15 minutos, lo cual se asocia con el mayor valor promedio alcanzando de eficiencia (88,00 %) respecto de la remoción de SST al haber aplicado 3 A y considerando un tiempo de contacto entre 10 a 20 minutos, donde también el mayor

tiempo de aplicación (20 minutos), alcanzó una eficiencia de remoción de 89,43 %, demostrando que los valores empleados en la investigación son representativos.

El escenario de viabilidad de la aplicación también se denota como adecuada o viable para la remoción de SST, ya que el valor de pH no alteró la capacidad de remoción, además de que no se incrementó significativamente para el experimento, evidenciado por el alcance de porcentajes de eficiencia altos y significativos estadísticamente. El experimento también se denota como representativo al emplear placas de Al y Fe en condiciones similares de intensidad de corriente y tiempo de contacto que fueron aplicados por Perozo y Abreu (7) (2 A, 10 min), los cuales también son considerados como parámetros que reflejan una mayor estabilidad o reflejaron un comportamiento estable en el experimento, concordando con la conclusión que proponen los autores mencionados, que la electrocoagulación se refleja como un sistema de tratamiento eficiente, sin embargo, es necesario considerar parámetros de campo y la consideración de su aplicación para remover otros contaminantes del agua, como manifiestan Escobar y Antonio (8), de modo que sea considerado como viable respecto de su costo de operación.

Respecto de la aplicación del Al y Fe, su empleo combinado o a la par influyó en obtener una mayor capacidad de remoción de SST, lo cual concuerda con lo reportado por Dávila *et. al.* (9), que aplicó solo electrodos de Al, alcanzando solo una capacidad de remoción del 37 % y que al aumentar la intensidad de corriente también aumentó la capacidad de remoción de sólidos, pero también se favorecía a la disolución de Al en el medio en el sistema monopolar, demostrando así que el empleo de otro electrodo de Fe estabiliza el medio de aplicación de la electrocoagulación para la remoción de sólidos suspendidos totales, mientras que la aplicación de solo Al, favorece solo a la precipitación de metales pesados como el caso del mercurio según lo reportado por Quispe (14), demostrando así que la aplicación de la electrocoagulación es eficiente para la remoción de metales pesados del agua y también para la remoción de aceites y grasas, ya que el poder de la corriente eléctrica llega a desestabilizar el equilibrio eléctrico que presentan las emulsiones y grasas, provocando su precipitación, en equivalencia a lo que sucede en el tratamiento (remoción) de sólidos suspendidos totales, según lo propuesto por Morante (15).

Respecto de la validación estadística propuesta, ésta concuerda con lo reportado por Poma y Quispe (11), que mencionan que el análisis de varianza determinó que la densidad de corriente y el tiempo de residencia (de contacto para la presente), respecto de su variación en el tratamiento, tiene un efecto significativo en la remoción de sólidos suspendidos totales, alcanzando escenarios de 91 % (2,7 A y 20 minutos) de eficiencia en la remoción de éstos, demostrando así la representatividad y significancia de los resultados de la investigación.

Finalmente, la aplicación de la electrocoagulación se observa como un método de tratamiento de aguas residuales eficiente, llegando a obtener concentraciones finales que se encuentran por debajo de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), tal como reporta Riccio (10), que recomienda controlar parámetros como el pH en el medio, así como la temperatura (la cual tiende por incrementarse en contacto por la generación e incremento de energía derivada de la intensidad de corriente eléctrica), donde también recomienda emplear recursos energéticos renovables, contribuyendo a generar escenarios donde el ambiente se preserve verdaderamente al llegar a aplicar el sistema de tratamiento, el cual se observa como viable de su implementación y operación a nivel nacional (12).

CONCLUSIONES

1. La aplicación de la electrocoagulación representa ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020, ya que la eficiencia de remoción fue alta (superior al 80 %), alcanzando hasta el 89,43 % de remoción máxima ($r = 0,990$, $\text{sig.} = 0,000$).
2. En sentido de la evaluación de la condición inicial de los parámetros fisicoquímicos sólidos suspendidos totales y pH, la concentración inicial de sólidos suspendidos totales en dos de los puntos de muestreo se mantuvo por debajo de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), mientras que en el punto ubicado aguas abajo y posterior a la población superó el valor de 100 mg/L del ECA - agua para la categoría 4, conservación del ambiente acuático, ríos de la sierra, alcanzando un valor de 296,5 mg/L. El valor del pH estuvo en un rango cercano a 6,8 medido con el equipo multiparámetro, encontrándose en el rango establecido por el ECA - agua. Tras la experimentación, el total de submuestras se mantuvieron por debajo de los ECA - agua para el parámetro SST y pH, demostrando a la electrocoagulación como una alternativa adecuada de tratamiento de dichos parámetros.
3. Las concentraciones iniciales de sólidos suspendidos totales (SST) fueron: para el punto 01 = 296,5 mg/L, para el punto 02 = 34,3 mg/L, y para el punto 03 = 18,6 mg/L, mientras que las concentraciones finales, tras la aplicación de la electrocoagulación como alternativa de tratamiento, se mantuvieron entre 3,444 mg/L - 31,345 mg/L.
4. Se aplicó 3 A de intensidad de corriente eléctrica y 20 minutos de tiempo de contacto como las condiciones de electrocoagulación para lograr una máxima remoción de los sólidos suspendidos totales (89,43 %) de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño.

RECOMENDACIONES

1. Aplicar la electrocoagulación para la precipitación y remoción de metales pesados presentes en las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño.
2. Considerar el estudio independiente de la variación de pH al emplear un rango mayor de aplicación de intensidades de corriente eléctrica, por ejemplo: 1 A, 10 A, 20 A, así como también evaluar la influencia de la temperatura de modo que se fortalezca su viabilidad de aplicación.
3. Evaluar una fuente de energía renovable, de modo que el alcance de la potencial aplicación de la electrocoagulación abarque un mayor espacio geográfico.
4. Analizar contaminantes como la DBO, DQO, aceites y grasas, entre otros, respecto de la determinación de la concentración inicial en el contexto local de estudio.
5. Aplicar distintos tiempos de contacto, así como un potencial caudal de ingreso, de modo que se complementen los resultados de la presente (pasar de un pre experimento a un cuasi experimento o experimento puro).
6. Considerar la alternativa de tratamiento de electrocoagulación en aguas donde la carga contaminante sea mayor, como en la provincia de Huancayo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SÁNCHEZ, M. Las aguas residuales en Perú, realidad al 2017. 2017.
2. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ. La situación de las aguas residuales en Lima. [En línea] Pontificia Universidad Católica del Perú, 02 de mayo de 2018. [Citado el: 03 de diciembre de 2019.] <https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/noticias/la-situacion-de-las-aguas-residuales-en-lima/>.
3. LARIOS-MEOÑO, F., GONZÁLEZ, C. y MORALES, Y. *Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú*. 2, Lima: Saber y Hacer, 2015, **2**. 2311-7613.
4. SUPERINTENDENCIA NACIONAL DE SERVICIOS DE SANEAMIENTO. *Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las EPS del Perú y propuestas de solución*. Lima: Cooperación Alemana al Desarrollo, 2008. 2008-14631.
5. CONGRESO CONSTITUYENTE DEMOCRÁTICO. *Constitución Política del Perú*. Lima: Congreso de la República, 1993.
6. AGUILAR, E. *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua*. 35, Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2015, **18**.
7. PEROZO, J. y ABREU, R. *Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable*. 1, Buenos Aires: Química Viva, 2017, **16**. 1666-7948.
8. FERIA, J., ESCOBAR, A. y ANTONIO, J. *Tratamiento de aguas residuales de origen químico mediante electrocoagulación*. 1, Colombia: AVANCES: Investigación en Ingeniería, 2014, **11**. 1794-4953.
9. DÁVILA, J., MARRIAGA, N. y MACHUCA, F. *Remoción de sólidos totales de vinazas por electrocoagulación - electroflotación*. 158, Medellín: Dyna, 2009, **76**. 0012-7353.
10. RICCIO, L. *Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector agua de las vírgenes por electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energética un panel fotovoltaico*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2015.

11. POMA, J. y QUISPE, P. *Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2016.
12. AGUILAR, E. *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2015.
13. APAZA, H. *Sistema combinado electrocoagulación - filtro biológico para la remoción de carga orgánica de los efluentes lácteos*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2018.
14. QUISPE, K. *Electrocoagulación en la remoción de mercurio de las aguas residuales en el Centro Poblado La Rinconada - Puno*. Puno: Universidad Nacional de Altiplano, 2015.
15. MORANTE, G. *Electrocoagulación de aguas residuales*. 2, Manizales : Revista Colombiana de Física, 2002, **34**.
16. ESPIGARES, M. y PÉREZ, J. *Aguas residuales, composición*. Salamanca: Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua, 2016.
17. GONZÁLEZ, C. *La turbidez. Monitoreo de la calidad del agua*. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico, 2011.
18. MARCÓ, L. y otros. *La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales*. Argentina: Higiene y Sanidad Ambiental, 2004, Vol. 4.
19. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. *Manual de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizados en Japón*. México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013.
20. MINISTERIO DEL AMBIENTE. *Tratamiento y Reuso de Aguas Residuales*. Lima: SINIA, 2015.
21. BELZONA Inc. *Tratamiento de aguas residuales*. Argentina: Mapa de la Plata, 2010.
22. ARANGO, Á. *La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. 1, Antioquía: Lasallista de Investigación, 2005, **2**. 1794-4449.

23. HERNÁNDEZ, A. *Sólidos Suspendidos Totales en agua secados a 103 - 105°C*. Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007. IDEAM TP 0088.
24. AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. Lima: Gráfica Industrial Alarcón S.R.L., 2016. 2016-03541.
25. ACOSTA, G. y OTROS. *La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales*. 2, Nueva Granada: UMNG, 2013, **9**. 1900-4699.
26. HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ-COLLADO, C. y BAPTISTA, M. *Metodología de la investigación*. México D.F.: Mc Graw Hill, 2014. 978-1-4562-2396-0.
27. ARROYO, J. *¿Cómo ejecutar un plan de investigación?* Huancayo: Fundación para el Desarrollo y Aplicación de las Ciencias, 2012.
28. TRIOLA, M. *Estadística*. México D.F.: Pearson Educación, 2009. 978-970-26-1287-2.

ANEXOS

Anexo 01. Matriz de consistencia.

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>Problema general:</p> <p>¿La electrocoagulación representa ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020?</p> <p>Problemas específicos:</p> <p>*¿Cuál es la condición inicial de los parámetros fisicoquímicos (sólidos suspendidos totales y pH) de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño?</p> <p>*¿Cuál es la concentración inicial y final, tras la aplicación de la electrocoagulación, de los sólidos suspendidos totales presentes en las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño?</p> <p>*¿Cuáles son las condiciones de la electrocoagulación para lograr una máxima remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño?</p>	<p>Objetivo general:</p> <p>Determinar si la electrocoagulación representa ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020.</p> <p>Objetivos específicos:</p> <p>*Evaluar la condición inicial de los parámetros fisicoquímicos (sólidos suspendidos totales y pH) de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño.</p> <p>*Determinar la concentración inicial y final, tras la aplicación de la electrocoagulación, de los sólidos suspendidos totales presentes en las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño.</p> <p>*Identificar las condiciones de la electrocoagulación para lograr una máxima remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño.</p>	<p>Hipótesis de investigación</p> <p>H₁: La electrocoagulación demuestra ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020, debido a que demuestra una alta eficiencia de remoción (más del 80 %).</p> <p>Hipótesis nula</p> <p>H₀: La electrocoagulación no demuestra ser una alternativa para la remoción de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales generadas en el distrito de San Pedro de Saño, Huancayo, 2020, debido a que no demuestra una alta eficiencia de remoción (menos del 80 %).</p>	<p>Variable dependiente</p> <p>Remoción de SST.</p> <p>Variable independiente</p> <p>Aplicación de la electrocoagulación.</p>	<p>Método general</p> <p>Hipotético-deductivo.</p> <p>Método específico</p> <p>Observacional.</p> <p>Tipo de investigación</p> <p>Aplicado.</p> <p>Nivel de investigación</p> <p>Correlacional.</p> <p>Diseño de investigación</p> <p>Pre experimental.</p>

Anexo 02. Cadena de custodia enviada como registro de datos asociados al muestreo inicial.



INCALAB

CADENA DE CUSTODIA DE CALIDAD DE AGUA

SIG-MCJ-P-01-F-01
 N° de Cadena : OSI-Env-21
 Pág. 1 de 1

Razón Social : Yanela Ramón Córdoba Solicitado por : Yanela Ramón Córdoba Informe de Monitoreo N° : -
 Procedencia : Huancayo - Saño Contacto : Enviropetrum S.A.C
 Referencia : Distrito Hya - Carretera Central

Muestreo : Realizado por Incalab Realizado por el Cliente

N°	Código de Estación	Fecha de Muestreo	Hora de Muestreo	Coordenadas E/Este, N/Norte, C/Cota	Tipo de muestra (RPS)	Observaciones
1	A - YR - 03	19/03	9:00am	10° 11' 44" S 76° 11' 44" W E: 3283	AR3 SST pH T°	02
2	A - YR - 02	19/03	9:30am	10° 11' 44" S 76° 11' 44" W E: 3286	AR3 SST pH T°	02
3	A - YR - 01	19/03	9:45am	10° 11' 44" S 76° 11' 44" W E: 3291	AR3 SST pH T°	02
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

Total **06**

Donde:
 (1) Información ingresada en Recepción
 (2) Categoría: AN=Agua Natural, AR=Agua Residual, AC=Agua de Uso y Consumo Humano, AS=Agua Salina, AP=Agua de Proceso
 (3) Subcategorías:

AN	AN	AC	AS	AP
1 Subterránea	3 Doméstica	6 Agua de Beberda	9 Mar	13 Agua de Circulación
2 Superficial	4 Industrial	7 Agua de Placera	10 Salobre	14 Agua de Alimentación
	5 Municipal	8 Agua de Laguna Artificial	11 Salmuera	15 Agua de Calentamiento
			12 Agua de Inyección	16 Agua de Lavado
				17 Agua Purificada
				18 Agua de Irrigación

Metales Totales : -
 Metales Pesados : -
 Información adicional : Constituyen muestra de 06 litros de agua / sometida a análisis inicial y experimento posterior.

CAUDAL:
 QV=Caudal Volumétrico, QF=Caudal Filtrador, QC=Caudal Correntómetro

RECEPCIÓN DE MUESTRAS

Nombre: _____

Firma: _____

Informe de Laboratorio N°: _____

Nombre y Firma del Analista de Monitoreo: _____

Nombre y Firma del Cliente: Yanela Ramón Córdoba

Observaciones: _____

Sello - Fecha de Recepción: _____

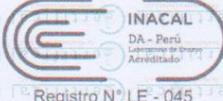
FC : Ago -11
FRV: Nov - 1508

Contacto: INCALAB del Perú S.A.C, E-mail: informes@incalab.com.pe Teléfono: 777-3834

Anexo 03. Informe de ensayo del muestro inicial.



**LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL ORGANISMO
PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL -
DA CON REGISTRO N° LE - 045**



INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Ensayo
Acreditado
Registro N° LE - 045

INFORME DE ENSAYO FQ N° 170321-014

Nombre del solicitante : Yanela Ramón Córdova.
 Dirección de la Empresa :
 Solicitado por : Enviropetrum S.A.C.

DATOS DE LA MUESTRA:

Procedencia : San Pedro de Saño, Huancayo - Junín.
 Muestreo : Realizado por el solicitante.
 Referencia : NS 21041261
 Orden de Trabajo : 04105.0921
 Cantidad de muestras : 03
 Presentación : Botella de plástico de primer uso.
 Fecha de muestreo : 19 de marzo de 2021 (proporcionado por el solicitante).
 Fecha de recepción : 20 de marzo de 2021.
 Fecha de inicio de ensayos : 22 de marzo de 2021.
 Fecha de término de ensayos : 26 de marzo de 2021.
 Condiciones de recepción : En aparente buen estado a temperatura de refrigeración.



MÉTODOS DE ENSAYO

Determinación	Norma
Sólidos suspendidos totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 23 rd Ed. 2017. Solids Total Suspended Solids Dried at 103-105 °C.

Observaciones:

- Este Informe de Ensayo tiene validez solo para la muestra descrita, por un periodo de 180 días a partir de la fecha de emisión del documento y es un documento oficial de interés público, su adulteración o uso indebido constituye delito contra la fe pública y es regulada de acuerdo a las leyes vigentes tanto en materia civil como penal.

Puntos de Muestreo	Hora de muestreo		Coordenadas		Altitud (msnm)
	Inicio	Término	Norte	Este	
A-YR-01	9:00 am	-	8677431	471039	3291
A-YR-02	9:30 am	-	8676904	470817	3286
A-YR-03	9:45 am	-	8676671	470799	3283



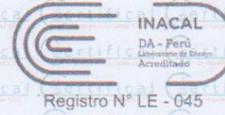
Los ensayos se han realizado bajo responsabilidad de CERTIFICAL S.A.C. Los resultados de los ensayos corresponden solo a la(s) muestra(s) del prototipo o del lote ensayado(s) no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizada. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin autorización escrita de CERTIFICAL S.A.C. FR - 65/Vs - 02

Av. Sucre N° 1361 Pueblo Libre, Teléfono: 461-1036 -- 837-4777 / E-mail: informes@certifical.com.pe

"PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO"



LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL ORGANISMO
PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL -
DA CON REGISTRO N° LE - 045



INFORME DE ENSAYO FQ N° 170321-014

Código del cliente		A-YR-01		
Descripción de punto		Carretera central		
Código de laboratorio		21041261 (3)		
Tipo de producto		Agua residual		
Fecha de muestreo		19/03/21		
Hora de muestreo		9:00 am		
ENSAYOS	UNIDAD	L.D.	L.C.	RESULTADOS
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1.70	4.26	296.5
Código del cliente		A-YR-02		
Descripción de punto		Ingreso a San Pedro de Saño		
Código de laboratorio		21041261 (3)		
Tipo de producto		Agua residual		
Fecha de muestreo		19/03/21		
Hora de muestreo		9:30 am		
ENSAYOS	UNIDAD	L.D.	L.C.	RESULTADOS
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1.70	4.26	34.3
Código del cliente		A-YR-03		
Descripción de punto		San Pedro de Saño		
Código de laboratorio		21041261 (3)		
Tipo de producto		Agua residual		
Fecha de muestreo		19/03/21		
Hora de muestreo		9:45 am		
ENSAYOS	UNIDAD	L.D.	L.C.	RESULTADOS
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1.70	4.26	18.6

Emitido en Lima, el 27 de marzo de 2021.

CERTIFICACIONES Y CALIDAD SAC
QUIRILMA SARMIENTO ZAVALA
JEFE DE OPTO LABORATORIO
C.Q.P. N° 233

Los ensayos se han realizado bajo responsabilidad de CERTIFICAL S.A.C. Los resultados de los ensayos corresponden solo a la(s) muestra(s) del protocolo o del lote ensayado(s) no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizada. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin autorización escrita de CERTIFICAL S.A.C.

FR - 65/1s - 02

Av. Sucre N° 1361 Pueblo Libre, Teléfono: 461-1036 - 637-4777 / E-mail: informes@certifical.com.pe

"PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO"

Anexo 04. Registro de datos enviados a laboratorio posterior a la experimentación, equivalente a una cadena de custodia proporcionada.



Ficha de cotejo (2)

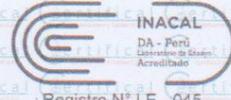
Objetivo: reportar los datos de las submuestras enviadas al laboratorio posterior al experimento.

Tesista: Bach. Yanela Ramón Córdova.

Fecha: 31/03/2021

Código de submuestra	Hora	Observación
YR-E-01	9:00 a.m.	2A, 10min.
YR-E-02	9:30 a.m.	2A, 15min.
YR-E-03	10:00 a.m.	2A, 20min.
YR-E-04	10:30 a.m.	2.5 A, 10min.
YR-E-05	11:00 a.m.	2.5 A, 15min.
YR-E-06	11:30 a.m.	2.5 A, 20min.
YR-E-07	12:00 m.	3A, 10min.
YR-E-08	12:30 p.m.	3A / 15min.
YR-E-09	1:00 p.m.	3A / 20min.

Anexo 05. Informe de ensayo de las submuestras enviadas al laboratorio tras la experimentación.


LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL ORGANISMO
PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL -
DA CON REGISTRO N° LE - 045


INFORME DE ENSAYO FQ N° 175721-014

Nombre del solicitante : Yanela Ramón Córdova.
 Dirección de la Empresa :
 Solicitado por : Enviropetrum S.A.C.

DATOS DE LA MUESTRA:

Procedencia : Huancayo - Junín.
 Muestreo : Realizado por el solicitante, posterior a experimentos.
 Referencia : NS 21041284
 Orden de Trabajo : 04116.1121
 Cantidad de muestras : 09
 Presentación : Botella de plástico de primer uso.
 Fecha de muestreo : 19, 31 de marzo de 2021 (proporcionado por el solicitante).
 Fecha de recepción : 03 de abril de 2021.
 Fecha de inicio de ensayos : 05 de abril de 2021.
 Fecha de término de ensayos : 16 de abril de 2021.
 Condiciones de recepción : En aparente buen estado a temperatura de refrigeración.

MÉTODOS DE ENSAYO

Determinación	Norma
Sólidos suspendidos totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 23 rd Ed. 2017. Solids Total Suspended Solids Dried at 103-105 °C.

Observaciones:

- Este Informe de Ensayo tiene validez solo para la muestra descrita, por un período de 180 días a partir de la fecha de emisión del documento y es un documento oficial de interés público, su adulteración o uso indebido constituye delito contra la fe pública y es regulada de acuerdo a las leyes vigentes tanto en materia civil como penal.



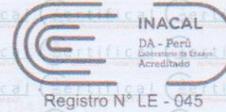

Los ensayos se han realizado bajo responsabilidad de CERTIFICAL S.A.C. Los resultados de los ensayos corresponden solo a la(s) muestra(s) del prototipo o del lote ensayado(s) no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizada. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin autorización escrita de CERTIFICAL S.A.C. FR - 65/Vs - 02

Av. Sucre N° 1361 Pueblo Libre, Teléfono: 461-1036 - 637-4777 / E-mail: informes@certifical.com.pe

"PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO"



LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL ORGANISMO
PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL -
DA CON REGISTRO N° LE - 045



INFORME DE ENSAYO FQ N° 175721-014

Puntos de Muestreo	Hora de muestreo	
	Inicio	Termino
YR-E-01	9:00 am	9:25 am
YR-E-02	9:30 am	9:55 am
YR-E-03	10:00 am	10:25 am
YR-E-04	10:30 am	10:55 am
YR-E-05	11:00 am	11:25 am
YR-E-06	11:30 am	11:55 am
YR-E-07	12:00 m	12:25 pm
YR-E-08	12:30 pm	12:55 pm
YR-E-09	1:00 pm	1:25 pm



Código del cliente		YR-E-01		
Código de laboratorio		21041284 (9)		
Tipo de producto		Agua tratada - experimento		
Fecha de muestreo		19-31/03/21		
Hora de muestreo		9:00 am		
ENSAYOS	UNIDAD	L.D.	L.C.	RESULTADOS
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1.70	4.26	3.444
Código del cliente		YR-E-02		
Código de laboratorio		21041284 (9)		
Tipo de producto		Agua tratada - experimento		
Fecha de muestreo		19-31/03/21		
Hora de muestreo		9:30 am		
ENSAYOS	UNIDAD	L.D.	L.C.	RESULTADOS
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1.70	4.26	2.928
Código del cliente		YR-E-03		
Código de laboratorio		21041284 (9)		
Tipo de producto		Agua tratada - experimento		
Fecha de muestreo		19-31/03/21		
Hora de muestreo		10:00 am		
ENSAYOS	UNIDAD	L.D.	L.C.	RESULTADOS
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1.70	4.26	2.699
Código del cliente		YR-E-04		
Código de laboratorio		21041284 (9)		
Tipo de producto		Agua tratada - experimento		
Fecha de muestreo		19-31/03/21		
Hora de muestreo		10:30 am		

Los ensayos se han realizado bajo responsabilidad de CERTIFICAL S.A.C. Los resultados de los ensayos corresponden solo a la(s) muestra(s) del prototipo o del lote ensayado(s) no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizado. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin autorización escrita de CERTIFICAL S.A.C.

FR - 65/V6 - 02

Av. Sucre N° 1361 Pueblo Libre, Teléfono: 461-1036 - 637-4777 / E-mail: informes@certifical.com.pe

"PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO"

ENSAYOS	UNIDAD	L.D.	L.C.	RESULTADOS
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1.70	4.26	5.951
	Código del cliente	YR-E-05		
	Código de laboratorio	21041284 (9)		
	Tipo de producto	Agua tratada - experimento		
	Fecha de muestreo	19-31/03/21		
	Hora de muestreo	11:00 am		
ENSAYOS	UNIDAD	L.D.	L.C.	RESULTADOS
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1.70	4.26	4.931
	Código del cliente	YR-E-06		
	Código de laboratorio	21041284 (9)		
	Tipo de producto	Agua tratada - experimento		
	Fecha de muestreo	19-31/03/21		
	Hora de muestreo	11:30 am		
ENSAYOS	UNIDAD	L.D.	L.C.	RESULTADOS
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1.70	4.26	4.026
	Código del cliente	YR-E-07		
	Código de laboratorio	21041284 (9)		
	Tipo de producto	Agua tratada - experimento		
	Fecha de muestreo	19-31/03/21		
	Hora de muestreo	12:00 m		
ENSAYOS	UNIDAD	L.D.	L.C.	RESULTADOS
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1.70	4.26	39.942
	Código del cliente	YR-E-08		
	Código de laboratorio	21041284 (9)		
	Tipo de producto	Agua tratada - experimento		
	Fecha de muestreo	19-31/03/21		
	Hora de muestreo	12:30 pm		
ENSAYOS	UNIDAD	L.D.	L.C.	RESULTADOS
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1.70	4.26	35.461
	Código del cliente	YR-E-09		
	Descripción del punto	-		
	Código de laboratorio	21041284 (9)		
	Tipo de producto	Agua tratada - experimento		
	Fecha de muestreo	19-31/03/21		
	Hora de muestreo	1:00 pm		
ENSAYOS	UNIDAD	L.D.	L.C.	RESULTADOS
Sólidos suspendidos totales	mg/L	1.70	4.26	31.345

Emitido en Lima, el 17 de abril de 2021.

CERTIFICACIONES Y CALIDAD SAC

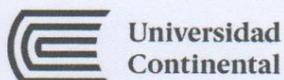
 QUIM VILMA SARMIENTO ZAVALA
 JEFE DE DPTO LABORATORIO
 C.Q.P. N° 253

Los ensayos se han realizado bajo responsabilidad de CERTIFICAL S.A.C. Los resultados de los ensayos corresponden solo a la(s) muestra(s) del prototipo o del lote ensayado(s) no pudiendo extenderse los resultados del informe a ninguna otra unidad o lote que no haya sido analizada. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin autorización escrita de CERTIFICAL S.A.C. FR - 65/Vs - 02

Av. Sucre N° 1361 Pueblo Libre, Teléfono: 461-1036 - 637-4777 / E-mail: informes@certifical.com.pe

"PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO"

Anexo 06. Guía de observación de campo para los puntos de muestreo inicial (complemento).



Universidad
Continental

Guía de observación de campo

Objetivo: identificar las condiciones y características del medio circundante a cada punto de análisis, con la finalidad de aportar información asociada a la concentración inicial de sólidos suspendidos totales (SST) de las muestras de la investigación.

Tesista: Bach. Yanela Ramón Córdova.

Fecha: 19/03/2021

Punto 01 - A-YR-01
<ul style="list-style-type: none">• Ubicación: Carretera Central, aguas abajo de la población.• Características:<ul style="list-style-type: none">◦ Presencia de residuos sólidos.◦ Turbidez aparentemente alta derivada de procesos productivos (cintrebr).◦ Presencia de vegetación en mayor proporción pastizal.◦ Falta de mantenimiento de la infraestructura asociada a la carretera central.
Punto 02 - A-YR-02
<ul style="list-style-type: none">• Ubicación: Punto intermedio respecto del distrito de Sanb.• Características:<ul style="list-style-type: none">◦ Presencia de restos de vegetación arborea.◦ Mayor ancho del río.◦ Menor presencia de actividades productivas.
Punto 03 - A-YR-03
<ul style="list-style-type: none">• Ubicación: Parcela a la población del distrito de Sanb (aguas arriba).• Características:<ul style="list-style-type: none">◦ Canalización.◦ Presencia de pastizal.◦ Caudal constante.◦ Presencia de vegetación en el agua.

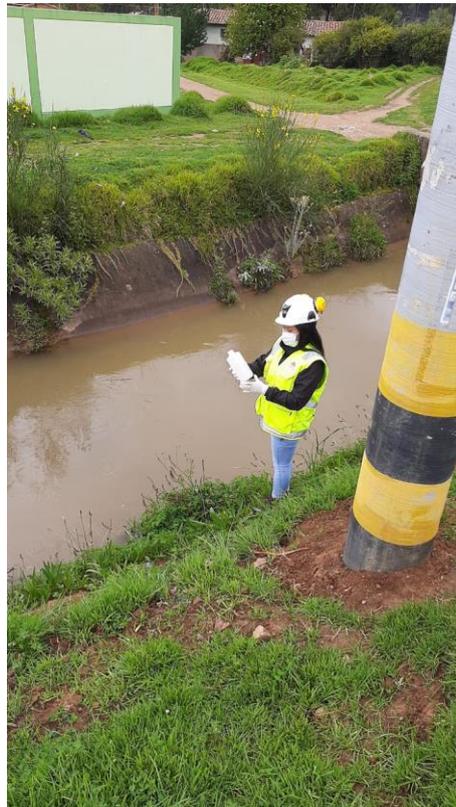
Anexo 07. Panel fotográfico.



Fotografía 01. Ingreso al distrito de San Pedro de Saño.



Fotografía 02. Toma de muestra.



Fotografías 03, 04 y 05. Rellenado de cadena de custodia, rotulado de envases y verificación de la muestra.



Fotografías 06, 07 y 08. Aplicación de la guía de observación elaborada en gabinete.



Fotografías 09 y 10. Preparación para el entorno experimental.



Fotografías 11 y 12. Verificación de la intensidad de corriente eléctrica aplicada.



Fotografía 13. Rotulado de los envases contenedores de la submuestras posterior a la experimentación.



Fotografía 14. Aviso que notifica sobre el no arrojo de residuos sólidos al cauce natural.

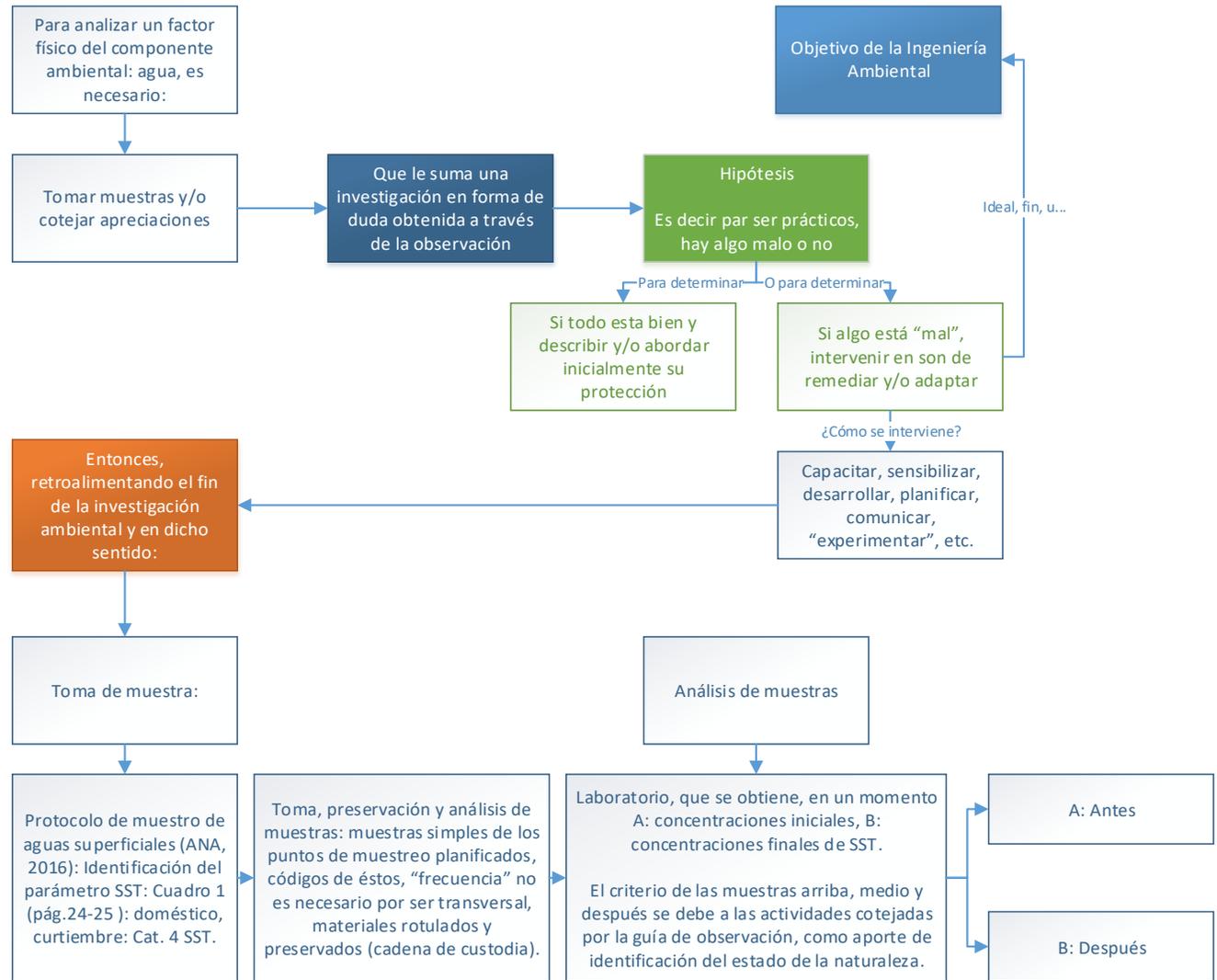
Anexo 08. Extracto de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, denótese la Categoría 4. Conservación del ambiente acuático, para el parámetro Sólidos Suspendidos Totales.

18 NORMAS LEGALES Miércoles 7 de junio de 2017 / El Peruano						
Categoría 4: Conservación del ambiente acuático						
Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Ríos		E3: Ecosistemas costeros y marinos	
			Costa y sierra	Selva	Estuarios	Marinos
FÍSICOS-QUÍMICOS						
Aceites y Grasas (MEH)	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Cianuro Libre	mg/L	0,0052	0,0052	0,0052	0,001	0,001
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	20 (a)	20 (a)	20 (a)	**	**
Clorofila A	mg/L	0,008	**	**	**	**
Conductividad	(µS/cm)	1 000	1 000	1 000	**	**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	5	10	10	15	10
Fenoles	mg/L	2,56	2,56	2,56	5,8	5,8
Fósforo total	mg/L	0,035	0,05	0,05	0,124	0,062
Nitratos (NO ₃ -) (c)	mg/L	13	13	13	200	200
Amoníaco Total (NH ₃ -)	mg/L	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)
Nitrógeno Total	mg/L	0,315	**	**	**	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 4	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,8 - 8,5	6,8 - 8,5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	≤ 25	≤ 100	≤ 400	≤ 100	≤ 30
Sulfuros	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	Δ 3	Δ 2	Δ 2
INORGÁNICOS						
Antimonio	mg/L	0,64	0,64	0,64	**	**
Arsénico	mg/L	0,15	0,15	0,15	0,036	0,036
Bario	mg/L	0,7	0,7	1	1	**
Cadmio Disuelto	mg/L	0,00025	0,00025	0,00025	0,0088	0,0088
Cobre	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05
Cromo VI	mg/L	0,011	0,011	0,011	0,05	0,05
Mercurio	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Níquel	mg/L	0,052	0,052	0,052	0,0082	0,0082
Plomo	mg/L	0,0025	0,0025	0,0025	0,0081	0,0081
Selenio	mg/L	0,005	0,005	0,005	0,071	0,071
Taio	mg/L	0,0008	0,0008	0,0008	**	**
Zinc	mg/L	0,12	0,12	0,12	0,081	0,081
ORGÁNICOS						

Anexo 09. Valor crítico de prueba de t de student, según el apéndice A-3 del libro de Triola (28).

Grados de libertad	Área en una cola				
	0.005	0.01	0.025	0.05	0.10
	Área en dos colas				
	0.01	0.02	0.05	0.10	0.20
1	63.657	31.821	12.706	6.314	3.078
2	9.925	6.965	4.303	2.920	1.886
3	5.841	4.541	3.182	2.353	1.638
4	4.604	3.747	2.776	2.132	1.533
5	4.032	3.365	2.571	2.015	1.476

Anexo 10. Esquema del fundamento metodológico y toma de muestras.



Anexo 11. Esquema del fundamento experimental.

