



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA
ELECTROCOAGULACIÓN COMO TRATAMIENTO
COMPLEMENTARIO PARA LAS AGUAS DEL RÍO SURCO EN
LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE SAN BORJA (PTSB), LIMA-
PERÚ, 2021”**

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Presentado por:

Ana Paola Velásquez León (0000-0002-1866-9170)

Asesor:

Fernando Javier Chávez Zegarra (0000-0002-2606-6556)

Lima – Perú

2022

Copia de acta de sustentación

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 12 de octubre del 2022.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Mg. Blga. Catherine Mariela Coronado León
Miembro: Mg. Ing. Jimmy Castillo Becerra
Miembro: Dra. Ing. Sara Regina Purca Cuicapusa

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:

"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN COMO TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO PARA LAS AGUAS DEL RÍO SURCO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE SAN BORJA (PTSB), LIMA-PERÚ, 2021"

Presentada por la/el estudiante/bachiller:

- **Ana Paola Velásquez León**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesorado por: Mg. Ing. Fernando Javier Chávez Zegarra

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño del estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental en la sustentación, concluyen de manera unánime () por mayoría simple (X) calificar a:

Tesis: Ana Paola Velásquez León		Nota (en letras): 17 (DIECISIETE)	
Aprobado ()	Aprobado - Muy buena (X)	Aprobado Sobresaliente ()	Desaprobado ()

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.



Mg. Blga. Catherine Mariela Coronado León
Presidente



Mg. Ing. Jimmy Castillo Becerra
Miembro 1



Dra. Ing. Sara Regina Purca Cuicapusa
Miembro 2



Mg. Ing. Fernando Javier Chávez Zegarra
Asesor

INFORME DE REVISIÓN DE ORIGINALIDAD

Título del documento evaluado. Evaluación de la eficiencia de la electrocoagulación como tratamiento complementario para las aguas del río Surco en la planta de tratamiento de San Borja (PTSB), Lima-Perú, 2021

Autores. Ana Paola Velásquez Leon

Mecanismo de revisión de originalidad. Evaluación con Turnitin (ID 1985087573).

Resultado de la evaluación. 8%

Revisado por. Magaly Kelly Guerrero Huaracallo.

Comentarios sobre la revisión. Filtros usados: excluir fuentes de menos de 12 palabras.

Evaluación de la eficiencia		
INFORME DE ORIGINALIDAD		
8%	8%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES
		1%
		TRABAJOS DEL ESTUDIANTE
FUENTES PRIMARIAS		
1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	cimogsys.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1%
3	visorsig.oefa.gob.pe Fuente de Internet	<1%
4	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1%
6	Carla Terrón Santiago. "Desarrollo e implementación de un banco de ensayos virtual de aerogeneradores para diferentes regímenes de funcionamiento y condiciones de fallo", Universitat Politecnica de Valencia, 2022 Publicación	<1%

DEDICATORIA

La presente investigación se la dedico a mi familia, en especial a mi mamá Inés Milagros León Chirinos, ya que a pesar de la distancia y todos sus sacrificios, siempre estuvo ahí para mí, para apoyarme, guiarme, enseñarme a hacer lo correcto, darme valor e impulso para seguir a delante, a luchar por mis sueños y me demostró que todo con esfuerzo, tiempo y dedicación se puede lograr y, sobre todo, gracias por enseñarme a creer en mí misma. Gracias mama por darme todo y más de lo que necesitaba.

También le dedico este esfuerzo a mi papá, Arnaldo Sabino Velásquez Alvares, que desde el cielo y que en paz descansa, pues fue él mi motivación principal para dejar atrás mis miedos e inseguridades, y que las transforme en disciplina, entusiasmo y positivismo para que me ayude a salir adelante y alcanzar todo lo que me proponga, porque para él siempre seré su “campeona”.

Y, por último, quiero dedicar con mucho cariño este trabajo a papá Robert Siggle, quien, a pesar de no ser mi familia de sangre, él es, fue y será una de las personas más importantes para mí, porque siempre hizo de mis problemas; los suyos también, de mis guerras; las tuyas, de mis alegrías; las tuyas y de mis éxitos sus festejos. Gracias.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi asesor de tesis Ing. Fernando Javier Chávez Zegarra quien fue la guía principal para poder presentar mi trabajo de investigación.

También quiero agradecer el apoyo de la Municipalidad de San Borja, en especial a la Gerencia de Medio Ambiente y Sostenibilidad por el apoyo y las facilidades brindadas para llevar a cabo mi experimento.

Por último, quiero dar mi agradecimiento especial a Gonzalo Mansilla Chávez, quien me con mucho cariño me apoyo en todo momento y sobre todo él fue quién me acompañó en este proceso, para la toma y recolección de muestras, así como también para la aplicación del experimento.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
INDICE GENERAL.....	5
INDICE DE FIGURAS.....	10
INDICE DE IMÁGENES	12
INDICE DE TABLAS.....	13
INDICE DE ANEXOS	15
RESUMEN.....	16
ABSTRACT	17
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
II. MARCO TEÓRICO	20
2.1. Aguas Contaminadas en Perú	20
2.1.1. Indicadores de Calidad de Agua	21
2.1.2. Operaciones Unitarias para el Tratamiento de Aguas Contaminadas	22
2.2. Aguas Residuales en Perú.	23
2.2.1. Fuentes de Aguas Residuales	23
2.2.2. Indicadores de Calidad de Aguas Residuales.....	23
2.2.3. Tipos de tratamientos para Aguas Residuales	24
2.3. Contaminación del Recurso Hídrico por Aguas Residuales	25

2.4.	Consecuencias del Riego con Aguas Contaminadas o Aguas Residuales	25
2.5.	Río Surco	26
2.5.1.	Contaminación del río Surco y sus efectos.....	27
2.5.2.	Puntos críticos de contaminación	28
2.6.	Planta de Tratamiento de San Borja	29
2.6.1.	Ubicación	30
2.6.2.	Etapas del tratamiento de la PTSB	30
2.6.3.	Abastecimiento.....	32
2.6.4.	Aplicación de aguas tratadas por la Planta de Tratamiento San Borja	33
2.6.5.	Problemática de la Planta de Tratamiento San Borja	33
2.7.	Electrocoagulación.....	34
2.7.1.	Etapas del tratamiento de la electrocoagulación.....	35
2.7.2.	Interacciones y reacciones dentro del tratamiento de la electrocoagulación.	37
2.7.3.	Eficiencia de la Electrocoagulación	39
2.7.4.	Beneficios de la Electrocoagulación	40
III.	OBJETIVOS/HIPÓTESIS	43
3.1.	Objetivo general	43
3.2.	Objetivos específicos	43
3.3.	Hipótesis general	44
3.4.	Hipótesis específicas.....	44

IV. METODOLOGÍA.....	44
4.1 Área de estudio.....	45
4.2 Planta de tratamiento de la Municipalidad de San Borja.....	46
4.3 Prototipo de la Celda de Electrocoagulación.....	47
4.3.1. Diseño de la Celda para la Electrocoagulación.....	48
4.3.2. Tiempo de aplicación.....	48
4.3.3. Intensidad de Corriente (Amperaje).....	48
4.3.4. Fuente de energía.....	48
4.3.5. Electrodos, características e instalación.....	49
4.4 Tipo y Diseño de la Investigación.....	51
4.4.1. Tipo: Aplicada	51
4.4.2. Diseño: Experimental	51
4.4.3. Alcance: Descriptiva e Inferencial	52
4.4.4. Enfoque: Cuantitativo.....	52
4.4.5. Tratamiento de la muestra	52
4.4.6. Unidad de Análisis	53
4.4.7. Variables del Estudio	53
4.4.8. Tamaño y Selección de la Muestra.....	53
4.4.9. Técnicas de recolección de las Muestras	54
4.5. Medición de parámetros	55

4.5.1.	Parámetros de Campo (in situ).....	55
4.5.2.	Parámetros de Laboratorio	56
4.5.3.	Eficiencia del tratamiento de electrocoagulación.....	57
4.6.	Análisis de datos	58
4.7.	Aspectos éticos	58
V.	RESULTADOS.....	59
5.1.	Caracterización de análisis físico-químico y microbiológico	59
5.2.	Análisis e interpretación de resultados	62
5.2.1.	Objetivo Específico N° 1:	62
5.2.2.	Objetivo Específico N°2:	68
5.2.3.	Objetivo Específico N°3:	73
5.3.	Contrastación de Hipótesis	76
5.3.1.	Hipótesis Específica N° 1.....	76
5.3.2.	Hipótesis Específica N° 2.....	83
5.3.3.	Hipótesis Específica N° 3.....	83
5.3.4.	Hipótesis General	85
VI.	DISCUSIÓN	86
VII.	CONCLUSIONES.....	98
VIII.	RECOMENDACIONES	100
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

X. ABREVIATURAS	112
XI. ANEXOS.....	115

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Mapa del recorrido del Río Suco desde su captación hasta su desembocadura.....	27
Figura 2.- Fotografía de la PTSB vista desde la parte de arriba.....	30
Figura 3.- Esquema del proceso del agua del río Surco en la PTSB.....	32
Figura 4.- Gráfica de interacciones del tratamiento de electrocoagulación.....	38
Figura 7.-Diagrama de la Celda de Electrocoagulación de las partes que la conforman	47
Figura 8.- Dimensiones y diseño de los electrodos para el tratamiento de electrocoagulación	49
Figura 9.- Distancia y distribución de los electrodos de Al y Fe	50
Figura 10.-Diseño Experimental de la Investigación reflejado en un diagrama.....	51
Figura 11.-Diseño, tamaño y selección de la muestra para la aplicación de los tratamientos con EC bajo diferentes corrientes eléctricas y tiempos.	54
Figura 12.- Remoción de Arsénico antes y después de tratamiento	62
Figura 13.- Remoción de Cadmio antes y después de tratamiento	63
Figura 14.- Remoción de Plomo antes y después de tratamiento	63
Figura 15.- Remoción de Hierro antes y después de tratamiento	64
Figura 16.- Remoción de DBO ₅ antes y después de tratamiento.....	65
Figura 17.- Remoción de Coliformes Termotolerantes antes y después de tratamiento	65
Figura 18.- Reducción de Conductividad antes y después de tratamiento.....	67

Figura 19.- Incremento de Temperatura antes y después de tratamiento.....	67
Figura 20.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para Arsénico.....	68
Figura 21.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para Cadmio	69
Figura 22.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para Plomo	69
Figura 23.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para Hierro	70
Figura 24.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para DBO ₅	70
Figura 25.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para Coliformes Termotolerantes.....	71
Figura 26.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para pH	71
Figura 27.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para conductividad	72
Figura 28.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para Temperatura	72
Figura 29.- Eficiencia de remoción de Arsénico	73
Figura 30.- Eficiencia de remoción de Cadmio	73
Figura 31.- Eficiencia de remoción de Plomo	74
Figura 32. Eficiencia de remoción de Hierro	74
Figura 33.- Eficiencia de remoción de Coliformes Termotolerantes.....	75
Figura 34.- Eficiencia de remoción de DBO ₅	75

INDICE DE IMÁGENES

Imagen 1.- Conexión de electrodos a la fuente de poder mediante cables con pinzas positivos y negativos.	50
Imagen 2.- Fotografías del tanque homogeneizador del agua del río Surco	55
Imagen 3.- Fotografías del equipo multiparámetro junto a sus componentes	56
Imagen 4.- Fotografías de la recolección de muestras para los parámetros de laboratorio (DBO ₅ , CTT, Metales Totes)	57
Imagen 5.- Contaminación del Río Surco por residuos sólidos y otros.	61

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.-	Indicadores de Calidad de Aguas	22
Tabla 2.-	Operaciones / Procesos para Aguas Contaminadas	22
Tabla 3.-	Tipos de fuentes donde provienen las aguas residuales	23
Tabla 4.-	Tipos de Tratamiento para Aguas Residuales	24
Tabla 5.-	Clasificación de los tratamientos aplicados en el proceso de la PTSB.....	29
Tabla 6.-	Métodos de riego aplicados para la irrigación de las áreas verdes del distrito de San Borja	33
Tabla 7.-	Definición de los aspectos que componen la electrocoagulación - EC.....	34
Tabla 8.-	Etapas del tratamiento de EC para AC y AR	35
Tabla 9.-	Reacciones electroquímicas en durante el tratamiento de la electrocoagulación	39
Tabla 10.-	Beneficios de la aplicación del tratamiento de electrocoagulación	41
Tabla 11.-	Beneficios Económicos por la aplicación del tratamiento de electrocoagulación	41
Tabla 12.-	Beneficios Ambientales de la aplicación del tratamiento de electrocoagulación	42
Tabla 13.-	Capacidad de tratamiento de la PTSB vs. la Celda de EC	47
Tabla 14.-	Características y dimensiones de la Celda de Electrocoagulación	48
Tabla 15.-	Matriz del diseño de la investigación	52
Tabla 16.-	Esquema identificación de las variables de estudio.....	53

Tabla 17.-	Parámetros de campo muestreados	56
Tabla 18.-	Tabla de medición y análisis de parámetros de laboratorio.	57
Tabla 19.-	Resultados de los parámetros de los Controles	60
Tabla 20.-	Variación de Oxígeno Disuelto antes y después de tratamiento	66
Tabla 21.-	Variación de pH antes y después de tratamiento	66
Tabla 22.-	Cumplimiento de Normativa de Arsénico según tratamiento	77
Tabla 23.-	Cumplimiento de Normativa de Cadmio según tratamiento.....	77
Tabla 24.-	Cumplimiento de Normativa de Plomo según tratamiento.....	78
Tabla 25.-	Cumplimiento de Normativa de Hierro según tratamiento.....	79
Tabla 26.-	Cumplimiento de Normativa de DBO5 según tratamiento.....	79
Tabla 27.-	Cumplimiento de Normativa de Coliformes Termotolerantes según tratamiento	80
Tabla 28.-	Cumplimiento de Normativa de Oxígeno Disuelto según tratamiento ...	81
Tabla 29.-	Cumplimiento de Normativa de pH según tratamiento.....	81
Tabla 30.-	Cumplimiento de Normativa de Conductividad según tratamiento.....	82
Tabla 31.-	Cumplimiento de Normativa de Temperatura según tratamiento.....	83
Tabla 32.-	Eficiencia de remoción de Coliformes Termotolerantes.....	84
Tabla 33.-	Eficiencia de remoción de DBO ₅	84
Tabla 34.-	Eficiencia de remoción de Metales pesados	85

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1.- Solicitud de información y autorización para realizar el trabajo de investigación a la Municipalidad de San Borja.	115
Anexo 2.- Carta de la Municipalidad de San Borja para la aceptación a la solicitud de información y autorización para realizar el trabajo investigación.	117
Anexo 3.- Cadenas de custodia de muestras de agua	118
Anexo 4.- Certificados de calibración de multiparámetro HACH	120
Anexo 5.- Informe de Ensayo de Laboratorio	122
Anexo 6.- Tablas de Resultados Generales	122
Anexo 7.- Evidencias fotográficas	125

RESUMEN

La contaminación del río Surco originada por el vertimiento clandestino de residuos y aguas residuales domésticas e industriales, afecta el ambiente acuático, la vida y salud humana; por ese motivo, el distrito de San Borja trata sus aguas antes de utilizarlas para riego de sus áreas verdes. Sin embargo, la capacidad de su planta es insuficiente. Una alternativa tecnológica eficiente para incrementar la capacidad de tratamiento y cumplir con las normativas ambientales vigentes es el tratamiento de electrocoagulación (EC). El tratamiento se basó en la construcción de una celda tipo *batch* de 30 L (representa el 0.5% de capacidad real la PTSB); donde se instalaron 20 electrodos en distribución paralela (10 de Al y 10 de Fe) y, se aplicó de 6 a 12 A de intensidad de corriente al tratamiento, durante tiempo de 10, 20 y 30 min a un total de 28 muestras, siendo cuatro de ellas controles y el resto tratamientos. Los resultados obtenidos permitieron determinar que los factores que influyen en la eficiencia de la EC fueron el tiempo de aplicación del tratamiento (30 min) y la densidad de corriente (12 A). La experimentación y aplicación de la EC demostró tener un resultado óptimo para ser implementado como un tratamiento complementario en la PTSB, lográndose una reducción de concentración de 98.1% de As, 86.26% de Cd, 91.37% de Pb y 88.88% de Fe, un 94.55% de DBO₅, 99.99% de coliformes termotolerantes (CTT), y una disminución de conductividad de 439.4 a 36.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$; mientras que el resto de parámetros variaron entre 4.6 y 8.8 mg/L el oxígeno disuelto, entre 6.5 y 7.8 el pH, y la temperatura $\Delta 0.8$ y $\Delta 6.2$ °C.

Palabras clave: Electrocoagulación, eficiencia, tiempo, corriente, tratamiento, agua, planta de tratamiento, contaminación, río.

ABSTRACT

The pollution of the Surco River caused by the clandestine dumping of waste and domestic and industrial wastewater, affects the aquatic environment, human life, and health; For this reason, the district of San Borja treats its water before using it to irrigate its green areas. However, the capacity of your plant is insufficient. An efficient technological alternative to increase treatment capacity and comply with current environmental regulations is electrocoagulation (EC) treatment. The treatment was based on the construction of a 30 L batch cell (the PTSB represents 0.5% of real capacity); where 20 electrodes were installed in parallel distribution (10 Al and 10 Fe) and 6 to 12 A of current intensity was applied to the treatment, for a time of 10, 20 and 30 min to a total of 28 samples, being four of them controls and the rest treatments. The results obtained made it possible to determine that the factors that influence the EC efficiency were mainly the treatment application time (30 min) and the current density (12 A). The experimentation and application of CE proved to have an optimal result to be implemented as a complementary treatment in PTSB, achieving a concentration reduction of 98.1% As, 86.26% Cd, 91.37% Pb and 88.88% Fe, a 94.55% BOD₅, 99.99% thermotolerant coliforms (TTC), and a decrease in conductivity from 439.4 a 36.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$; while the rest of the parameters varied between 4.6 and 8.8 mg/L for dissolved oxygen, between 6.5 and 7.8 for pH, and temperature Δ 0.8 and Δ 6.2 °C.

Keywords: Electrocoagulation, efficiency, time, current, treatment, water, treatment plant, contamination, river.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es un recurso natural al cual todos tenemos acceso, siendo constantemente aprovechado para múltiples actividades, ya sea para consumo poblacional o industrial, para actividades agrícolas, recreativas o como fuente de energía renovable (hidroeléctrica, mareomotriz, otros); aquellas que, como consecuencia del desarrollo humano, han traído como resultado la contaminación global de este recurso.

En el Perú, se viene invirtiendo en proyectos para mejorar la gestión del recurso hídrico, controlar el consumo del agua e incrementar la eficiencia de los tratamientos para las aguas residuales y recuperación de cuerpos de agua contaminados (Meoño et. al, 2015). La implementación de fiscalizaciones y sanciones por parte del Estado a modo de promover el cumplimiento de las leyes y normativas para la conservación en cuanto a calidad y cantidad de este recurso, siguen sin darse abasto. El crecimiento acelerado de la población; la necesidad de efectuar sistemas de manejo y gestión que, respondan a la demanda y a la realidad que enfrenta el país para frenar la contaminación, sigue siendo un reto para todos.

Por consideraciones socioambientales, de salud pública y económicas, las aguas residuales no pueden ser reusadas con fines agrícolas o de uso poblacional sin tratamiento previo, ni deben ser vertidas directamente a los océanos, ríos, lagos y/o lagunas. Sin embargo, el Perú alcanzó alrededor de 35 672 m³/h (34.6% del total) de agua residual descargada sin tratamiento a fuentes superficiales en el 2016 (SUNASS, 2017). Asimismo, para el año 2020, de acuerdo con el Plan Nacional de Saneamiento 2022-2026; el porcentaje de aguas residuales que continúan siendo vertidas representa un 29.6% (SUNASS, 2021)

El riego de áreas verdes y zonas de agricultura con agua contaminada (por agua residual, residuos, otros) crean un ciclo sin fin de contaminación, provocan bioacumulación de contaminantes, incrementan los impactos negativos irreversibles y acumulativos como la contaminación del suelo y agua subterránea por la infiltración de contaminantes, así como problemas de sanidad y salud pública.

El distrito de San Borja (Lima) cuenta con más de 50 áreas verdes irrigadas en su mayoría (poco más del 80%) por el agua del río Surco, el cual tiene más de 25 puntos de vertimiento no autorizados de aguas residuales identificados en los 29.5 km del canal (ANA, 2018), que provienen de desagües clandestinos y residuos sólidos acumulados en las orillas. El agua debe ser previamente tratada, ya que presenta un alto grado de contaminación. Adicional a ello, la PTSB muestra una capacidad restringida de tratamiento (250 m³/día), por lo que debe considerarse la compra y transporte de agua dulce de otros establecimientos. El problema no solo se relaciona a contaminación físico-química y bacteriológica presente en las aguas del río Surco, sino que también está relacionada a capacidad de la planta para cubrir la necesidad real del distrito para el riego todas sus zonas verdes.

Por lo tanto, existe la necesidad de implementar un tratamiento complementario eficiente y sostenible para el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental, resguardando la seguridad y salud pública para cubrir la demanda y necesidades de la población y, a su vez, recuperar, reutilizar y conservar del agua dulce disponible.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Aguas Contaminadas en Perú

Las aguas contaminadas (en adelante, “AC”) en el Perú, nacen producto del vertimiento y acumulación de sustancias tóxicas que se encuentran en concentraciones muy altas y representan un riesgo significativo para la seguridad y salud de las personas y para el ambiente. Los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, presentan una alta incidencia en el vertimiento de residuos sólidos y líquidos a la vez; lo que ocasiona a su vez un desequilibrio en su ciclo natural. Las AC son consideradas como focos de contaminación, que afectan la calidad del suelo cuando entran en contacto con él, se infiltran y tienen potencial para contaminar acuíferos. Los cambios significativos en los parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua son los que van a determinar el impacto ambiental que van a ocasionar. (Ley General del Medio Ambiente en Perú N° 28611, Art. 31, 2005 y Meoño et al, 2015).

Uno de los más grandes desafíos para el Perú y el mundo, es la conservación y protección de la cantidad y calidad del agua dulce. Actualmente contamos con la Ley de Recursos Hídricos - N° 29338 creada en el 2009; donde su función principal es regular el uso y la gestión tanto del agua superficial, como la subterránea y la continental (Autoridad Nacional del Agua, 2018). También se aprobaron guías y protocolos para poder identificar y clasificar los cuerpos de agua, así como también estándares de calidad ambiental para agua (en adelante, “ECA Agua”). Los ECA Agua (2017), son el instrumento de medición de la concentración de elementos y sustancias presentes en el agua (parámetros físicos, químicos, microbiológicos).

2.1.1. *Indicadores de Calidad de Agua*

Están representados por parámetros con concentraciones y valores establecidos por la normativa peruana que permiten evaluar la calidad del agua mediante el instrumento conocido como los Índices de Calidad del Agua (en adelante, "ICA") para fuentes superficiales o subterráneas en un tiempo determinado (ANA, 2018). Los ICA tienen un valor de 0 a 1, el cual representa la calidad del cuerpo de agua en términos de salud y bienestar humano (Resolución Jefatural N° 068 -2018-ANA). Otro instrumento internacional para la evaluación de fuentes de agua son los ICO (Índices de Contaminación de Agua), donde su valor oscila entre 0 y 100. Ambos índices, los ICO e ICA básicamente consisten en definir a través de una expresión numérica la combinación de los resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, los cuales son los indicadores que permitirán la clasificación del cuerpo de agua evaluado de acuerdo al rango asignado y su descripción cualitativa del nivel de contaminación (Fernández y Solano, 2005; Samboni, et al., 2007, Samboni, et al., 2011)

Así mismo, de acuerdo con el ANA (2018), los indicadores de calidad de agua son una herramienta que es comúnmente utilizada medir la calidad del recurso. Sin embargo, se debe definir los parámetros que servirán como indicadores, por ello se tienen identificados y agrupados de forma general cuales son aquellos que corresponden a fines básicos (habituales), agrarios, identificación de presencia de metales y/o compuestos tóxicos para la salud y ambiente (ver Tabla 1).

Tabla 1.- Indicadores de Calidad de Aguas

Indicadores de Calidad de Agua:			
Básicos	Con fines Agrícolas	Para evaluar presencia de metales	Para evaluar compuestos tóxicos para la salud
Variación de la Temperatura ($\Delta T^{\circ}\text{C}$)	Cloruros – mg/L	Arsénico (As) – mg/L	Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) – mg/L
Potencial de Hidrógeno (pH)	Carbonatos – mg/L	Mercurio (Hg) – mg/L	Bifenilos Policlorados (PBCs) – mg/L
Oxígeno Disuelto (ODmg/L)	Nitratos – mg/L	Cadmio (Cd) – mg/L	Agroquímicos – mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅ mg/L)	Potasio (K) – mg/L	Plomo (Pb) – mg/L	Compuestos Orgánicos Persistentes (COPs) – mg/L
	Sulfatos – mg/L	Cromo (Cr) – mg/L	
	Calcio (Ca) – mg/L	Manganeso (Mn) – mg/L	
Coliformes Termotolerantes (NMP/100 ml)	Bicarbonatos – mg/L	Cobre (Co) – mg/L	Plaguicidas – mg/L
	Boro (B) – mg/L	Hierro (Fe) – mg/L	Otros, etc.
Solidos Suspendidos Totales (STT mg/L)	Magnesio (Mg) – mg/L	-	-
	Dureza – mg/L	-	-

Nota: ICA básicos para fines agrícolas, presencia de metales y compuestos tóxicos para la salud.

2.1.2. Operaciones Unitarias para el Tratamiento de Aguas Contaminadas

De acuerdo con las características fisicoquímicas, microbiológicas y/o parasitológicas presentes en aguas contaminadas, se cuentan con diversos procesos y operaciones unitarias para su tratamiento y recuperación (Metcalf y Eddy, 1996); se definen de forma general según el siguiente cuadro:

Tabla 2.- Operaciones / Procesos para Aguas Contaminadas

Operaciones /Procesos Tratamiento de Aguas Contaminadas	Descripción
Físicos	Remoción de contaminantes en el agua a través de una separación, sedimentación y suspensión (fuerza física), no incluye la introducción de sustancias químicas que alteren o modifiquen la estructura inicial del agua.
Químicos	Consiste en añadir sustancias químicas (sales) que permitan desestabilizar los componentes contaminantes y formar floculantes y coagulantes (macromoléculas) que puedan ser removidas con mayor facilidad.
Biológicos	Se basa en la introducción de microorganismos anaeróbicos o aeróbicos que degraden el material orgánico para su propio consumo. La eficiencia del tratamiento radica en que los microorganismos cuenten con las condiciones óptimas de crecimiento y reproducción.
Combinados	Los tratamientos combinados, son los más comunes, entre ellos existen los fisicoquímicos, bioquímicos y biofísicos. Su aplicación dependerá de los componentes que se desean remover y las condiciones de agua a tratar.

Nota: López et al. (2008)

2.2. Aguas Residuales en Perú.

Las aguas residuales (en adelante, “AR”) se consideran a aquellas aguas transformadas por actividades antropogénicas (Meoño et. al, 2015), donde la composición depende del lugar de proveniencia y la aplicación que se les dé. Se encuentran representadas por 99.9% en estado líquido y 0.1% estado sólido. En su composición contienen elementos químicos, elementos microbiológicos, restos de materiales, residuos líquidos y sólidos que las vuelven inutilizables producto de las alteraciones en la composición natural del agua (Ramalho, 2003).

2.2.1. Fuentes de Aguas Residuales

Las fuentes de AR son aquellas donde se generan las aguas residuales y dependen de la actividad que se desarrolle en ellas para poder clasificarlas de la siguiente manera:

Tabla 3.- Tipos de fuentes donde provienen las aguas residuales

Fuente	Abreviación	Descripción
Aguas Residuales Domésticas	ARD	Proviene de los asentamientos humanos, de actividades domésticas y dentro de estas se clasifican entre aguas grises (fluidos con heces y bacterias fecales) y aguas negras (fluidos con detergentes y otros, provenientes de lavabos, bañeras, lavadoras, etc.)
Aguas Residuales Industriales	ARI	Su composición es muy variada, dependerá de las actividades y rubro en el que se encuentran.
Aguas Residuales Comerciales (Municipales)	ARC	Provenientes de centros comerciales, municipalidades, y lugares públicos y mercados
Aguas Residuales por Infiltraciones y Drenaje Pluvial	ARY	Se consideran a aquellas aguas pluviales y de infiltración que suman o aportan al caudal de las aguas residuales por los alcantarillados municipales.

Nota: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental – OEFA (2014).

2.2.2. Indicadores de Calidad de Aguas Residuales

Para controlar, analizar y monitorear los efluentes de AR tratadas provenientes de PTAR, se tienen a los Límites Máximos Permisibles (LMP). Así como, para monitorear y analizar de la afectación de los cuerpos superficiales con potencial de riesgo a ser contaminados

por el vertimiento de estas AR tratadas, se los indicadores establecidos son los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para cuerpos de aguas de acuerdo con el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, los cuales dependiendo de la clasificación del cuerpo de agua y su ubicación; se cuentan con valores máximos establecidos que la normativa ambiental peruana exige su cumplimiento (D.S. N° 004-2017-MINAM). Adicionalmente, es importante monitorear también aquellas AR que ingresan (afluentes) al igual que las que salen (efluentes), para evaluar la eficacia del tratamiento (Iriarte, 2019).

2.2.3. Tipos de tratamientos para Aguas Residuales

Existen diferentes etapas en los procesos para el tratamiento de las AR, se consideran cuatro como las principales y son utilizadas de acuerdo al grado de contaminación determinada en la evaluación y el análisis previo (Aziz et.al, 2019).

Tabla 4.- Tipos de Tratamiento para Aguas Residuales

Tipos de Tratamiento	Descripción
Preliminar	Considerado como etapa de adecuación y homogenización de los caudales de las AR. Sirve para ajustar parámetros, remover arena, materiales gruesos y de gran tamaño. Otra función es controlar el agua residual que ingresa para que no afecte el resto de los tratamientos que vienen después.
Primario	Etapa donde se aplican procesos físicos y sirve para la remoción de partículas por sedimentación (sólidos en suspensión), también está la remoción materia orgánica (más adelante MO).
Secundario	Se realizan actividades para controlar las propiedades químicas y microbiológicas, logrando un estado óptimo que permita la reutilización o vertimiento de las aguas tratadas.
Terciario	Considerados como los tratamientos más específicos, especializados para tratar un contaminante en especial y/o desinfección (metales pesados, nutrientes, iones específicos, sólidos disueltos, etc). Muchas veces, los tratamientos secundarios no son suficiente para alcanzar los parámetros que requiere la normativa, es por eso que para lograr una mayor eficiencia de remoción de contaminantes y mejoras en el agua se utilizan los tratamientos terciarios.
Complementario	Son tratamientos que, si bien pueden ser considerados como post-tratamientos, también pueden ser aplicados de forma paralela, con el fin de cubrir la demanda de tratamiento de agua. También pueden ser específicos para poder remover contaminantes específicos que las otras etapas no han logrado eliminar.

Nota: Aziz, et al. (2019).

Sin embargo, no es necesario que se implementen todas las etapas de tratamiento, ya que existirán procesos en los que no será necesario llegar a tratamientos terciarios y/o

avanzados. Existen AR que pueden tener procesos más simples (primarios y secundarios). La elección para el diseño de las plantas de tratamiento de aguas residuales (en adelante, “PTAR”) y las metodologías que se van a emplear para cada etapa está directamente relacionada con la composición de las AR a tratar.

2.3. Contaminación del Recurso Hídrico por Aguas Residuales

Una de las causas principales de la contaminación del recurso hídrico es el vertimiento de las AR sin tratamientos previos y en lugares no autorizados, así como también descargas de aguas tratadas pero que todavía contienen altas concentraciones de contaminantes por falta de monitoreo y por tratamientos ineficientes (Autoridad Nacional del Agua-ANA, 2018). Como resultado se obtienen impactos en los ecosistemas acuáticos y terrestres, contaminación de los cuerpos de agua, del (Araujo, 2017; Hakizimana et. al., 2017).

2.4. Consecuencias del Riego con Aguas Contaminadas o Aguas Residuales

El uso de AC y/o AR no tratadas para riego tiene efectos perjudiciales para la seguridad y salud de las personas y sobre todo para el ambiente. El grado de afectación dependerá de la concentración de contaminantes presentes en dichas aguas, la constancia de riego, así como también tipo de suelo (alta o baja capacidad de infiltración).

Las áreas verdes, parques y zonas públicas, suelen utilizar agua de canales que captan de los ríos o reutilizan agua residual, con el fin de economizar el presupuesto, ya que comprar agua dulce potabilizada es inaccesible económicamente hablando. Estas áreas por lo general están llenas de pastos, flores ornamentales, arboles e inclusive biohuertos que suelen ser irrigados de 3 a 5 veces por semana (Municipalidad de San Borja, 2005).

Las AR suelen contener altos porcentajes de fosfatos, nitratos y materia orgánica que puede mejorar la fertilidad de suelos. Sin embargo, dependiendo de su composición también contendrán metales pesados como cadmio, cromo, arsénico, plomo, mercurio y demás sustancias tóxicas con efectos nocivos para la salud y el ambiente. También es muy común que contengan grandes cantidades de microorganismos patógenos como coliformes fecales, huevos de helmintos, y otros que pueden ocasionar la proliferación de vectores y de enfermedades sanitarias (Aziz, et al., 2019).

2.5. Río Surco

El río Surco, también conocido como canal Surco se encuentra en la cuenca río Rímac, cuenta con un caudal promedio de 5 m³/s intermitente, y un caudal máximo de 10 m³/s el cual es directamente influenciado por las aguas del río Rímac. El agua ingresa por medio de una bocatoma en el distrito de Ate Vitarte, la cual es la responsable de formación del canal que tiene como función la irrigación y mantenimiento de las áreas verdes de 17 distritos de Lima, de los cuales 12 de ellos son por donde transcurre su trayecto hasta desembocar en la playa La Chira en Chorrillos (Ver Figura 1). Desde el 2016 son más de 50 usuarios registrados y autorizados para el uso de estas aguas, las cuales son utilizadas para el riego de más de 600 parques en Lima (Municipalidad de San Borja, 2005).

El distrito de San Borja es parte de los usuarios registrados por la Comisión de Regantes de Surco más adelante CMS, quien tiene a su cargo la administración y gestión del canal. San Borja es uno de los distritos por donde atraviesan las aguas del río Surco ingresando a la altura del intercambio vial de Monterrico hasta el cruce de la Av. San Luis con A. Angamos (Municipalidad de San Borja, 2005). El recorrido en el distrito alcanza los 3.2

km aproximadamente. Se utilizan las aguas del río para el mantenimiento y para el riego de sus áreas verdes y zonas de recreación como la laguna artificial del parque de la Felicidad (Lizarzaburu, 2018).

Sin embargo, debido a la alta carga de contaminantes, basura y maleza; estas aguas no deben ser utilizadas sin previo tratamiento por no cumplir con los estándares de calidad para la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales, Subcategoría D1: Riego restringido y no restringido (Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM; Quispe, 2018).



Figura 1.- Mapa del recorrido del Río Suco desde su captación hasta su desembocadura.
Fuente: Google Earth 2021

2.5.1. Contaminación del río Surco y sus efectos

El río Surco es uno de los ríos que se encuentra catalogado en la lista de preocupación por recurso contaminado especialmente por el vertimiento de AR y residuos sólidos, que son arrojados por los ciudadanos de los distritos colindantes. En la cuenca alta del río es donde se realiza con mayor frecuencia estos delitos ambientales.

Por este motivo, el AC del río representa una de las principales causas que contaminan los suelos y las áreas verdes de los Distritos de Lima, ya que sus aguas presentan

microrganismos patógenos, metales pesados, sales y otros, que contribuyen a la proliferación de vectores y representan un riesgo para la salud y el ambiente (Municipalidad de San Borja, 2005).

Los suelos y áreas verdes que son regados por el agua del río Surco contienen metales como arsénico, plomo, mercurio, fosfatos y nitratos principalmente, así como también coliformes fecales (Tello, Jave y Guerrero, 2018). Ello se debe a que el agua presenta los mismos indicadores los cuales al entrar en continuo contacto con el suelo por el mismo riego; algunos se infiltran y otros se acumulan hasta afectar su calidad perenne.

2.5.2. Puntos críticos de contaminación

Actualmente, las aguas del río Surco se encuentran en estado latente de contaminación, es decir, existen más de 25 los puntos críticos registrados a lo largo de todo el recorrido (29.5 km), principalmente los distritos de ATE, Santa Anita y El Agustino por el norte, y por el sur en Surco y Chorrillos (ANA, 2018). Sumado a ello, se encuentran también aquellos vertimientos domésticos clandestinos que no han sido identificados y aún no han podido ser intervenidos. El vertimiento no autorizado (ilegal) de agua residual doméstica, industrial, de residuos sólidos e inclusive pasivos industriales (cuenca alta) al río; representa una fuerte sobrecarga de contaminación e incremento de la concentración de metales pesados, microorganismos y/o parásitos (Ortiz, 2019).

Pese a los esfuerzos de la Comisión de Regantes de Surco y la Autoridad Nacional del Agua, la construcción de plantas de tratamiento, inspecciones y la concientización de la ciudadanía, sanciones a industrias, no se ha logrado controlar el problema (Ortiz, 2017).

Según la investigación de la autora Ortiz (2019); se ha identificado que el distrito de Santa Anita cuenta con denuncias por vertimientos industriales no autorizados al cauce

del río Surco. Así mismo, distritos como Surco y Chorrillos, tienen mayor influencia de contaminación debido al urbanismo y modificaciones de construcciones no autorizadas en el cauce del río.

2.6. Planta de Tratamiento de San Borja

La Planta de Tratamiento de San Borja (en adelante, “PTSB”); capta las aguas del río Surco, para aprovecharlas en el riego y mantenimiento de las áreas verdes del Distrito. Cuenta con tratamiento biofísico, que incluye tratamiento preliminar, primario (Sedimentación y decantación) y secundario (micro y fitobiológico) para la estabilización de los parámetros presentes en el agua captada (Ver Tabla 5).

Esta PTSB no genera residuos químicos, ni emite olores, además de tener una capacidad de 250 m³/día, equivalente a 3 L/seg. Pero está restringida a tratar solo agua contaminada por agua residual doméstica con bajo grado de contaminación, mas no elimina en su totalidad parásitos, bacterias y otros microorganismos (Huiman, 2015).

Tabla 5.- Clasificación de los tratamientos aplicados en el proceso de la PTSB

Clasificación de Tratamiento	Técnica/Proceso	Contaminante	Material o Método
Preliminar (Físico)	Remoción de Materiales	Residuos de gran tamaño	Rejillas gruesas
		Residuos de tamaño medio	Rejillas finas
Primario (Físico)	Sedimentación	Partículas de menor tamaño	Cámara de sedimentación
	Decantación	Aceites y grasas	Separación de fluidos por diferencia de gravedad
Secundario (Biológico)	Biofiltración fofolítica	DBO ₅	Piedras pome y microorganismos aeróbicos fotosintéticos
	Biorremediación	Metales	Piscina de filtración con macrófitas que absorben metales pesados
	Desinfección UV	Microorganismos patógenos y	Sistema de desinfeccion con rayos UV.

Nota: Huiman (2015).

2.6.1. Ubicación

La PTSB capta las aguas del canal que derivadas del río Surco dentro del distrito de San Borja perteneciente al departamento de Lima. Se encuentra situada en el Parque de la Felicidad por donde atraviesa el río Surco (Figura 2), las coordenadas en UTM WGS 84: 8 661 335.20 Sur y 283 467.84 Este en el cuadrante 18 L, a 159 m s.n. m. (Ver Figura 2)



Figura 2.- Fotografía de la PTSB vista desde la parte de arriba.
Nota: Se delimita la ubicación de la PTSB en el parque de la Felicidad.
Fotografía propia

2.6.2. Etapas del tratamiento de la PTSB

La PTSB aplica un tratamiento biofísico diseñado para bioestabilizar la calidad del agua del río Surco con el fin de no producir acondicionar el agua para que alcance los estándares permitidos para su uso. La PTSB incluye las siguientes etapas de tratamiento (Municipalidad de San Borja, 2021):

- a. **Captación:** El proceso inicia con captación de agua a través de un canal lineal que transporta el agua hacia un tanque de almacenamiento.
- b. **Trampa de rejas y desarenador:** El agua se dirige a al ingreso de la PTSB la cual cuenta con unas rejillas encargadas de retener sólidos de gran tamaño.

Luego pasa al tanque desarenador que consta de dos pantallas, una que se dirige al río para descargar los lodos, y la otra a la cámara de bombeo que eleva y lleva el agua a la parte alta, donde se encuentra la cisterna de carga (tratamiento primario).

- c. **Sedimentador y desengrasador:** El agua pasa por dos fases en el tratamiento físico (desengrasador y sedimentador). Por acción de la gravedad los sedimentos terminan en la parte inferior y los aceites y grasas quedan en la parte superior, donde es removida por un técnico y/o personal encargado.
- d. **Biofiltro:** El biofiltro, también conocido como filtro de percolación o biofiltro fotosintético aeróbico, está construido con paneles de vidrio (transparente) para que la luz ingrese fácilmente, y permita a las bacterias aeróbicas fotosintéticas eliminar contaminantes biológicos (material orgánico, bacterias y parásitos). El material de relleno del biofiltro son piedras pómez donde se forma una capa de microorganismo que absorben y mineralizan las sustancias contaminantes.
- e. **Filtro de Macrófitas:** El agua transcurre por una especie de piscina en forma de laberinto, donde se hallan las plantas de Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*), estas macrófitas en sus raíces tienen la capacidad de absorber metales pesados y cuando mueren son removidas y desechadas.
- f. **Equipos Ultra Violeta (UV):** La última etapa del tratamiento es la remoción de patógenos y desinfección general del agua que ayuda a disminuir el contenido de materia orgánica y eliminar las cloraminas (Ver Figura 3).

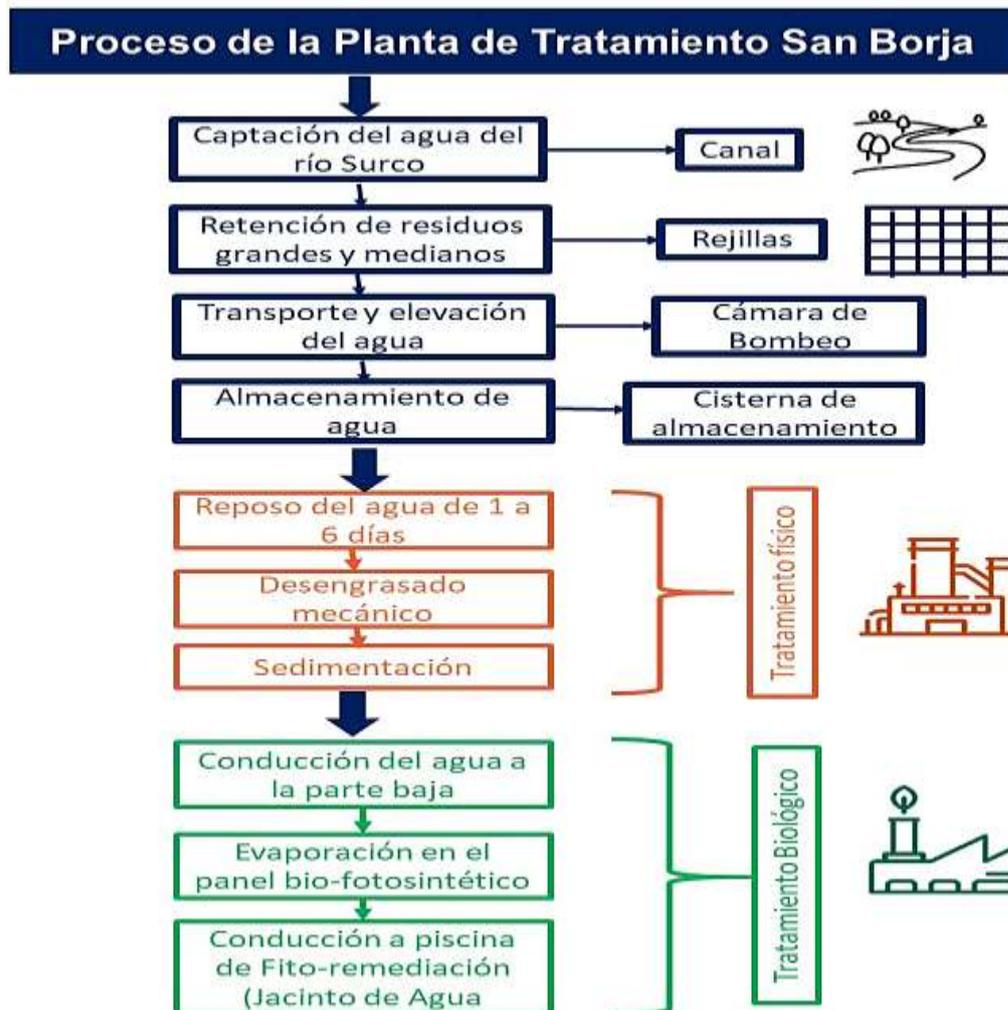


Figura 1.- Esquema del proceso del agua del río Surco en la PTSB

Nota: En la figura se muestra el esquema del proceso por el que pasa el agua captada del río Surco para ser tratada en la PTSB y se detalla los sistemas o mecanismos de tratamiento utilizados.

2.6.3. Abastecimiento

La distribución de agua para el riego y mantenimiento de las áreas verdes en el Distrito San Borja se divide en 12 sectores. Ello incluye parques, avenidas, triángulos verdes, pasajes, andenes, biohuertos y otras áreas que en total alcanzan un aproximado 1 353 725.20 m². Donde poco más del 80% (1 200 625 00 m² aprox.) es abastecido por el agua tratada por la PTSB debido a que su capacidad no alcanza para cubrir el 100%. El 20 % restante es abastecido por la compra de agua clarificada a SEDAPAL, que extrae agua de un pozo subterráneo y la distribuye a través de una cisterna (Tabla 6).

2.6.4. Aplicación de aguas tratadas por la Planta de Tratamiento San Borja

Las aguas tratadas de la planta de tratamiento biofísica de San Borja (en adelante, “PTSB”) son utilizadas para el riego y abastecen 1 240 521.4 m² (80% de áreas verdes). Más del 65% de esta agua tratada se utiliza para riego por gravedad, 20% riego tecnificado por aspersión, 10 % cisterna móvil y el 5% con una motobomba (Tabla 6).

Tabla 6.- Métodos de riego aplicados para la irrigación de las áreas verdes del distrito de San Borja

Fuente de Agua	Método de riego	Descripción	Área (m2)	Porcentaje (%)
PTSB (+80%)	Por gravedad	Distribución del agua por medio de un surco o canal, puede recorrer largas distancias.	826 672.40	61%
	Aspersión (Tecnificado)	Sistema automatizado, transporta agua a través de una red de tuberías hasta los aspersores que distribuyen el agua en forma de lluvia localizada	269 052.00	20%
	Motobomba	Motor que impulsa la distribución de agua a través de los conductos conectados para distribuir el agua.	55 286.00	4%
	Cisterna Móvil	Transporte de agua mediante una cisterna con 6000 galones de capacidad.	89 511.00	7%
Agua de SEDAPAL (-20%)	Cisterna Móvil	Transporte de agua mediante una cisterna con 9000 galones de capacidad.	113 203.80	8%

Nota: Cerca del 80% de las áreas verdes en San Borja son regadas por el agua tratada de la PTSB, mientras que 20% es agua adquirida de un usuario externo a través del servicio de transporte de agua mediante una cisterna. Información obtenida de Huiman, (2015) y Municipalidad de San Borja; 2021².

2.6.5. Problemática de la Planta de Tratamiento San Borja

En ocasiones la PTSB ha presentado indicadores que no cumplen con el ECA Agua (2017) para riego sobre todo en DBO, coliformes totales y fecales, parásitos, metales pesados entre otros. Esto se debe a la fuerte incidencia por la descarga de AR que supera las condiciones máximas del tratamiento biofísico.

No obstante, como ya se mencionó la capacidad de la PTSB no logra abastecer el 100% de las áreas verdes por ello se compra agua dulce extra de un pozo que no solo incrementa el costo de mantenimiento de las áreas verdes, si no también reduce la disponibilidad de agua dulce subterránea que podría necesitarse en un futuro. Teniendo

en cuenta ello, es de suma importancia proponer soluciones que permiten conservar la cantidad y calidad del agua disponible, y aprovechar al máximo las fuentes que ya se tienen y no consumir más de lo necesario.

2.7. Electrocoagulación

La electrocoagulación (en adelante, “EC”), es una tecnología confiable e innovadora que ha surgido bajo el principio básico de la electroquímica, la cual involucra reacciones de óxido-reducción entre las partículas presentes en el agua y el campo eléctrico producto de la inyección de electricidad (Ezechi, et al., 2020). La EC se compone de dos aspectos importantes, la **1)** corriente eléctrica y la **2)** coagulación:

Tabla 7.- Definición de los aspectos que componen la electrocoagulación - EC

	Aspectos Involucrados	Objetivo
Electrocoagulación (EC)	Corriente Eléctrica (Ánodo – Cátodo)	La inyección de corriente eléctrica a través de una fuente de poder hacia el ánodo y cátodo dan como resultado un campo eléctrico que reacciona bruscamente con las partículas presentes en el agua para desestabilizarlas.
	Coagulación	La reacción de óxido-reducción origina la liberación de agentes coagulantes, es decir, se generan complejos de hidróxido metálico para neutralizar y atrapar las partículas contaminantes con el fin de formar aglomerados que precipiten o floten por su diferencia de densidades.

Nota: Ezechi, Affam, y Muda (2020, pp. 404-431).

El tratamiento con EC se caracteriza por ser una tecnología de amplio alcance y con alta capacidad para la recuperación de efluentes y AC. Es también un método simple, sencillo y eficiente que permite la eliminación de agentes contaminantes creando afinidad entre la reacción de oxidación del ánodo de sacrificio bajo la influencia de la corriente eléctrica y las partículas desestabilizadas presentes en el agua, formándose macromoléculas (coágulos, aglomeraciones) que precipiten o floten en la superficie por la diferencia de densidades (Aguilar, 2015; Ozay, et. al., 2018, Ezechi, et al., 2020).

2.7.1. *Etapas del tratamiento de la electrocoagulación*

El tratamiento de la EC es una tecnología que se divide en tres etapas principales y dos secundarias (Elazzouzi, et al., 2018; Sher, et al., 2020); **1)** la primera etapa es donde se forman los agentes coagulantes mediante la oxidación electrolítica debido al sacrificio del ánodo que liberan iones metálicos que reaccionan con los iones hidroxilo (cátodo) los cuales poseen facilidad para atrapar las partículas del agua contaminada (Sher et al., 2020), **2)** la segunda etapa es la desestabilización de las partículas contaminantes, deterioro, emulsión y suspensión producto del campo eléctrico (An et. al, 2017; Derban, et. al., 2020; Sher, et. al., 2020), los cuales generan una carga electrostática opuesta, lo que finalmente lleva a **3)** la tercera etapa de formación de coágulos debido a que cuando los contaminantes ya se encuentran desestabilizados comienzan a formar una fuerte atracción con los hidroxilos metálicos (Feng et al., 2016; Hashim et al., 2019; Elazzouzi, et. al., 2018; Sher et. al., 2020). Las etapas secundarias se componen por **1)** formación de un campo eléctrico influencia el proceso de óxido-reducción que permite la liberación de iones metálicos y iones hidroxilos; y por **2)** la eliminación de los sedimentos, emulsiones, floculas que se irán al fondo de la celda o flotarán en la parte superficial para finalmente ser retirados por los orificios de salida del reactor de EC. A continuación de describen las etapas correspondientes al tratamiento de la EC:

Tabla 8.- *Etapas del tratamiento de EC para AC y AR*

Etapas	Descripción	Objetivo
Formación de Campo Eléctrico	La corriente eléctrica que ingresa a través de los cables de conducción hacia los electrodos (ánodo y cátodo) al entrar en contacto con el agua, crean un campo eléctrico.	Generar un campo eléctrico desestabilizador que inflencie el proceso de óxido-reducción.
Oxidación electrolítica	El electrodo de sacrificio (ánodo) pasa por una reacción redox la cual libera iones metálicos que reaccionen con iones hidroxilos para la formación de hidróxidos metálicos (agentes coagulantes).	Liberación de agentes coagulantes

Desestabilización de las partículas contaminantes	Las partículas desestabilizadas por el campo eléctrico pueden ser fácilmente separadas del agua contaminada o agua residual	Separar las partículas contaminantes de la fuente de agua a tratada
Formación de aglomeraciones	La liberación de los agentes coagulantes al entrar en contacto con las partículas desestabilizadas tiene afinidad para aglomerarse y formar emulsiones o flóculos que sedimentaran o flotarán.	Unión de las partículas desestabilizadas con los agentes coagulantes
Sedimentación – Flotación	Los aglomerados que se formaran producto del tratamiento de EC, flotarán o precipitarán, lo que permitirá mayor facilidad para ser retirados.	Eliminación de las partículas contaminantes del agua

Nota: El cuadro resume las cinco etapas del tratamiento de EC. Información obtenida de Sher, et al (2020).

Este tratamiento utiliza la electricidad para crear un campo eléctrico por medio de los electrodos (ánodo y cátodo) para eliminar, remover y reducir contaminantes presentes en las AR, a través de la atracción de los hidróxidos metálicos liberados y las partículas desestabilizadas que permiten neutralizar y remover las macromoléculas (contaminantes aglomerados) a través de la decantación y sedimentación (Ezechi, et al., 2020; Sher, et al., 2020).

Este proceso puede remover o reducir diversos parámetros presentes en AR, como sólidos suspendidos, metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos, reducir la DQO y la DBO, incrementar el oxígeno disuelto, estabilizar el pH, eliminar microorganismos y patógenos debido a su amplio alcance de tratamiento y eficiencia (Walsh, 2001; Riyanto y Hidayatillah, 2014; Fekete, 2016; Al-Qodah, et al., 2019).

Por ello, la EC es considerada como un método autocatalizador, es decir, no necesita la intervención de sustancias extras, químicos o microorganismos para producción de agentes coagulantes que generen aglomeraciones y ni para producir lodos residuales (Bazrafshan et al, 2015; AlJaberi, 2018; Ezechi, et al., 2020).

2.7.2. *Interacciones y reacciones dentro del tratamiento de la electrocoagulación.*

a. *Interacciones del Tratamiento de Electrocoagulación*

Este es un método de formación de coagulantes de manera in situ, que, a diferencia de la coagulación química, la EC no necesita la aplicación de químicos durante el proceso para producir reacciones directas de óxido-reducción (Feng et al, 2016), por ello, las disoluciones de los iones metálicos que se generan gracias a un electrodo de sacrificio tienen el mismo comportamiento que de las sustancias químicas añadidas para formar coagulantes (Restrepo, 2006; Hashim et al., 2019).

El tratamiento electroquímico combina las ventajas de los tratamientos convencionales; coagulación y floculación tradicional para la remoción de contaminantes y estabilización de parámetros físicos, químicos y microbiológicos (Feng, Yang, Liu y Logan, 2016; Aljaberi, 2018; Hashim et al., 2019).

Las reacciones de electrodos (cátodo y ánodo) por efecto del campo eléctrico, inducen las formaciones iónicas que provocan la desestabilización en las cargas de las partículas contaminantes. Una vez neutralizadas, se aglomeran y forman agregados de mayor tamaño y mayor densidad (Tahreen, et. al., 2020). El cátodo es el responsable de la formación de burbujas de H₂ (electroflotación), movilizandolas hacia la parte superior de la celda (Sher, et al., 2020). Los agregados (conglomerados) también pueden precipitar, ello dependerá de su densidad y su tamaño (Feng et al., 2016; Hashim et al., 2019).

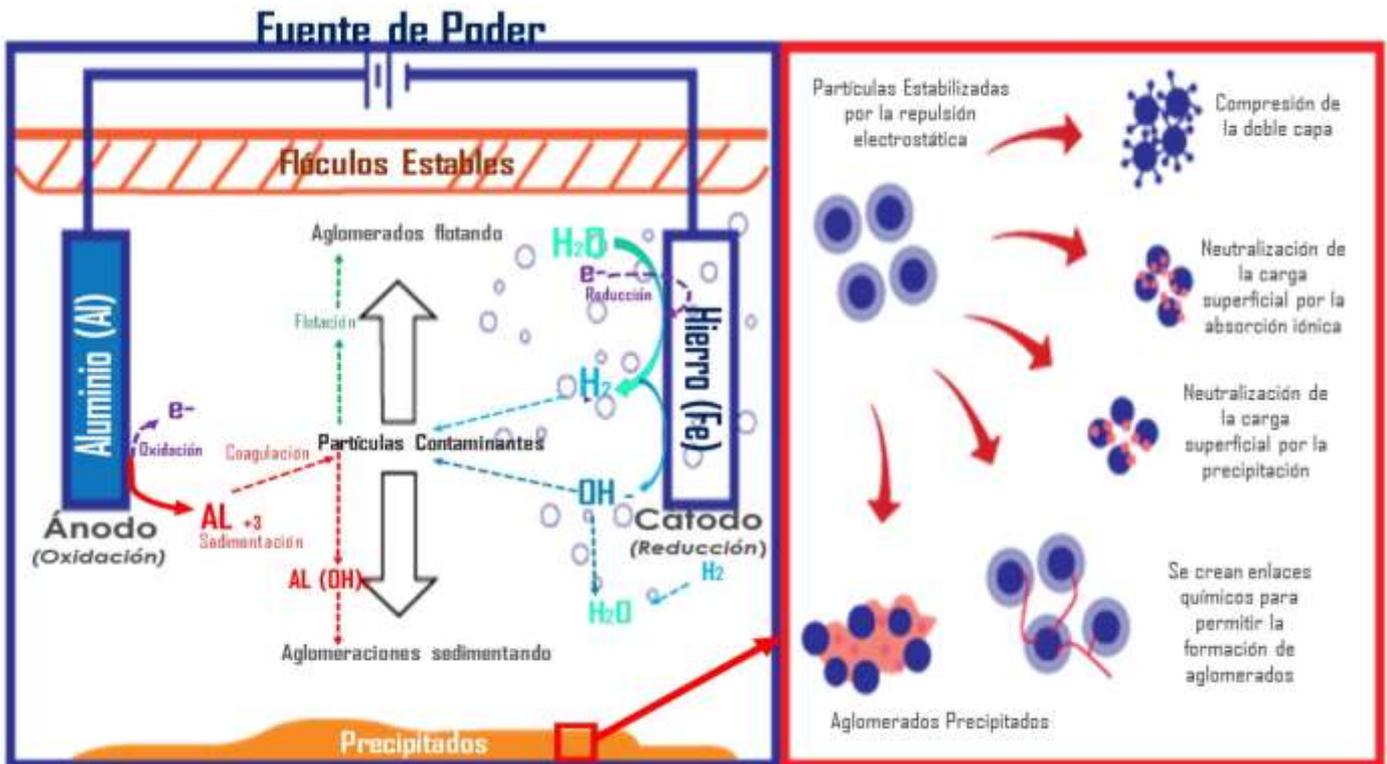


Figura 2.- Gráfica de interacciones del tratamiento de electrocoagulación

Nota: En la figura se observa las principales reacciones in-situ que se desarrollando durante el tratamiento, empezando por la liberación de iones para la desestabilización de los contaminantes y las aglomeraciones que se producen por la atracción de las moléculas, donde por la diferencia de densidades algunas tienden a precipitar, y otras tienden a flotar. Información obtenida de Darban et al., (2020).

b. Reacciones electroquímicas

Las reacciones electroquímicas que se producen en el tratamiento de la EC son producto del intercambio iónico de electrodos, el medio (agua) y la interacción de las partículas presentes. El hierro (Fe) y aluminio (Al) son los materiales más comunes para ser utilizados como cátodo y ánodo respectivamente o viceversa, ello debido a su alto potencial de producción de iones metálicos que favorecen la eficiencia del tratamiento (Sher, et. al., 2020). Sin embargo, el material del electrodo puede ser variado (Aguilar, 2015). Lo recomendando es utilizar un material (metal) con alta capacidad de trasmisión de electricidad y que sean resistentes a oxidación. Otro punto importante es que estos electrodos deben ser de bajo costo y fáciles de conseguir (Sher, et al., 2020).

Las reacciones que ocurren en los electrodos de hierro (Fe^{2+}) y de aluminio (Al^{+3}) forman y liberan iones positivos (e^+) y también negativos (e^-). El ánodo, o “electrodo de sacrificio” libera los iones metálicos y eventualmente se disuelve; a diferencia del cátodo, no se disuelve y permanece estable. Los iones metálicos por efecto del impulso del campo eléctrico (Ezechi, et al., 2020; Sher, et al., 2020), formarán hidróxidos metálicos durante las reacciones electroquímicas (Ezechi, et al., 2020) como los hidróxidos $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Tahreen, et al., 2020). Estos hidróxidos metálicos serán los agentes coagulantes que atraerán contaminantes (Sher, et al., 2020), para posteriormente ser removidos (Tahreen, et al., 2020).

Tabla 9.- Reacciones electroquímicas en durante el tratamiento de la electrocoagulación

Reacciones electroquímicas para la formación de posibles coagulantes cuando el ánodo es el Hierro	
Reacción 1: Formación de Hidróxido de Hierro: a) Hidróxido Férrico $\text{Fe}(\text{OH})_2$ b) Hidróxido Férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$	Reacción 2: Formación de Hidróxido de Aluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$
Ánodo: a) $\text{Fe (s)} \rightarrow \text{Fe}^{2+}_{(\text{ac})} + 2 e^-$ b) $4\text{Fe (s)} \rightarrow 4\text{Fe}^{2+}_{(\text{ac})} + 8 e^-$	Ánodo: $\text{Al (s)} \rightarrow \text{Al}^{3+}_{(\text{ac})} + 3 e^-$
Cátodo: a) $2 \text{H}_2 \text{O (l)} + 2e^- \rightarrow \text{H}_2 \text{(g)} + 2 \text{OH}^-$ b) $8\text{H}^+_{(\text{ac})} + 8 e^- \rightarrow 4\text{H}_2 \text{(g)}$	Cátodo: $3 \text{H}_2 \text{O (l)} + 3e^- \rightarrow \frac{3}{2} \text{H}_2 \text{(g)} + 3 \text{OH}^-$
Reacción completa: a) $\text{Fe (s)} + 2 \text{H}_2 \text{O (l)} \rightarrow \text{Fe (OH)}_2 + \text{H}_2$ b) $4\text{Fe (s)} + 10\text{H}_2 \text{O (l)} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe (OH)}_3 + 4\text{H}_2$	Reacción completa: $\text{Al}^{3+}_{(\text{ac})} + 3 \text{H}_2 \text{O (l)} \rightarrow \text{Al (OH)}_3 + 3\text{H}^+_{(\text{ac})}$

Nota: En la tabla se muestran las opciones de reacciones que pueden llevarse a cabo, dependiente de que electrodo (metal) se elige para que sea el ánodo. Información obtenida de Sher, et al., (2020)..

2.7.3. Eficiencia de la Electrocoagulación

La determinación de la eficiencia de la electrocoagulación (en adelante, “EEC”) es una variable de estudio que se evalúa de forma cuantitativa y cualitativa de acuerdo al grado de eliminación o reducción de contaminantes, y mejora de la calidad del agua (Nawarkar

y Salkar, 2019; Thareen, et al., 2020); por ello se evalúan los parámetros físicos como temperatura, sólidos totales y disueltos, turbidez; químicos como pH, conductividad eléctrica, demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, oxígeno disuelto, concentración de metales; y biológicos como microorganismos y parásitos (Sher, et al. 2020).

La EEC también va a depender de la densidad de corriente eléctrica aplicada en el reactor, así como el material de los electrodos (ánodo y cátodo), tiempo de aplicación del tratamiento de EC, el pH del medio acuoso (Nawarkar y Salkar, 2019; Derban, et al., 2020), la presencia de interferencias que afectaran la reacción redox entre el campo eléctrico y las partículas presentes en el agua, así como la formación de aglomerados (Derban, et al., 2020; Thareen, et al., 2020).

Lo ideal para optimización del tratamiento y una adecuada eliminación de contaminantes, deben evaluarse las muestras para que no influyan de manera negativa al tratamiento (Nawarkar y Salkar, 2019; Ezechi, et al., 2020). Por ello se debe determinar la densidad de corriente eléctrica adecuada para la capacidad del reactor, así como la homogenización del pH del fluido y la estandarización del tiempo de aplicación del tratamiento (Ibáñez et al., 1997; Escobar, Soto-Salazar, Toro, 2006; Sher, et al., 2020; Thareen, et al., 2020).

2.7.4. Beneficios de la Electrocoagulación

a. Técnicos

Promueve el uso de nuevas tecnologías para la recuperación de la calidad del agua superficial. Contribuye a mantener y cuidar el agua evitando su contaminación, por ser un recurso indispensable para todas las personas, animales y plantas.

Tabla 10.- Beneficios de la aplicación del tratamiento de electrocoagulación

Clase de Beneficio	Descripción de Beneficio
Técnicos	Incorporación de nuevas alternativas de tratamiento y recuperación de AC.
	Disminución de riesgos sanitarios.
	Evita la reducción de agua dulce disponible.
	Genera mayor conciencia y responsabilidad ambiental
	Evita conflictos socioambientales relacionados a la contaminación del agua.
	Mejora la calidad de vida de las personas manteniendo un ambiente sano y saludable.
	Incentiva mayor esfuerzo en la investigación del tratamiento para hacerlo más eficiente y rentable a la vez.

Nota: Tamani, (2017); Ezechi, et. al., (2020) y Tahreen, Jami y Ali (2020).

b. Económicos

La inversión para el tratamiento de EC trae beneficios económicos ya que en comparación a otros métodos convencionales que incluyen altos costos en cuanto a construcción, operación y mantenimiento, que a su vez incluyen diversas limitaciones. La EC es una alternativa prometedora que disminuiría la inversión en los costos operativos, capacitación del personal, costos de disposición y tratamiento de lodos residuales, entre otros (Ezechi, et al. 2020). Así mismo, permitiría alcanzar los estándares de calidad exigidos cumpliendo con las normativas vigentes para evitar multas y sanciones de la OEFA o el ANA. Además, es más económico prevenir y controlar (no contaminar), que invertir para descontaminar o reparar algún daño ambiental.

Tabla 11.- Beneficios Económicos por la aplicación del tratamiento de electrocoagulación

Tipo	Beneficios
Económicos	Menores costos operativos.
	Menor tiempo de aplicación del tratamiento de EC.
	Menor costo de construcción e implementación del reactor de EC.
	No se necesita personal continuamente capacitado y especializado para operar y mantener el reactor de EC.
	No necesita la aplicación de insumos químicos, reduce costos y consumo de materiales.
	Genera menor cantidad de lodos residuales, reduciendo la inversión en el tratamiento y disposición final.
	Alcanza los ECA Agua (2017) para cumplir con la normativa vigente.
	Evita sanciones impuestas por entidades fiscalizadoras
	Disminuye el costo de proyectos de inversión para revertir la contaminación.
	No necesita tener tratamientos adicionales costosos para remover los contaminantes residuales.

	Impulsa la generación y aplicación de energías renovables más sustentables con el planeta.
--	--

Fuente: Ezechi, et al. 2020); Aguilar E. (2015) y Tahreen, Jami y Ali, (2020).

c. Ambientales

Prevenir impactos ambientales en el recurso hídrico representa un beneficio socioeconómico y ambiental muy importante, ya que el agua da vida, se tiene que cuidar y respetar. Contribuir evitando la contaminación mediante tratamientos innovadores permitirá mantener un ambiente sano y saludable.

Tabla 12.- Beneficios Ambientales de la aplicación del tratamiento de electrocoagulación

Tipo	Beneficios
Ambiental	Reduce la contaminación presente en el agua.
	Genera menor cantidad de lodos (menos del 50%)
	Permite la reutilización del agua residual o contaminada.
	Evita que se produzcan impactos ambientales sinérgicos o acumulativos.
	Disminuye el consumo de agua dulce disponible.
	Minimiza el impacto del uso y contaminación del agua hacia los ecosistemas.
	Previene el desarrollo de plagas y propagación de vectores.
	Garantiza la eliminación de productos químicos dañinos de modo seguro.
	Reduce la contaminación del suelo y efectos negativos en la agricultura
	Evita la infiltración de contaminantes a la napa freática

Fuente: Aguilar E. (2015); Arboleda y Herrera, (2015)

III. OBJETIVOS/HIPÓTESIS

3.1. Objetivo general

- Evaluar la eficiencia de la electrocoagulación como tratamiento complementario para aguas del Río Surco en la Planta de Tratamiento de San Borja, Lima.

3.2. Objetivos específicos

- Identificar la calidad del agua del río Surco antes y después de ser tratadas por el tratamiento de electrocoagulación.
- Determinar la influencia del tiempo de aplicación y grado o intensidad de corriente (amperaje) para el tratamiento más óptimo.
- Lograr la eficiencia a partir del 80% de remoción de Coliformes Termotolerantes (CTT), Demanda Química de Oxígeno (DBO_5) y Metales Pesados (Arsénico, Cadmio, Hierro y Plomo) del tratamiento complementario de la electrocoagulación.

3.3. Hipótesis general

- El tratamiento de electrocoagulación será adecuado para trabajar como un tratamiento complementario y/o adicional en la planta de tratamiento de San Borja, siendo eficiente para cumplir con los estándares de calidad ambiental requeridos.

3.4. Hipótesis específicas

- El agua del río Surco no cumple con los estándares de calidad de ambiental de agua, sin embargo, después del tratamiento complementario de electrocoagulación sí cumplirá con la normativa legal vigente.
- La intensidad de corriente (amperaje) y el tiempo de aplicación tendrá influencia directa proporcional en relación a la eficiencia del tratamiento complementario de electrocoagulación.
- La eficiencia de remoción de Coliformes Termotolerantes (CTT), Demanda Química de Oxígeno (DBO₅) y Metales Pesados (Arsénico, Cadmio, Hierro y Plomo) del tratamiento complementario de la electrocoagulación será mayor al 80%.

IV. METODOLOGÍA

4.1 Área de estudio

La PTSB pertenece a la Municipalidad de San Borja, la cual encuentra ubicada en el departamento de Lima, capta las aguas del canal provenientes del río Surco, donde son tratadas bajo un proceso biofísico para irrigar las áreas verdes del distrito. La PTSB se encuentra construida en el Parque de la Felicidad, frente al Cuartel del Ejército Peruano, ubicado en las coordenadas 8 661 335.20 Sur y 283 467.84 Este en la zona 18 L, a 159 m s.n. m (Ver Figura 5).



Figura 3.- Mapa de la distribución espacial del Distrito de San Borja, áreas verdes y área de estudio

Fuente: Google Earth (2021)

El acceso hacia la PTSB se puede realizar mediante tres vías principales: la primera es por la Av. San Borja Sur, la segunda vía es por la Av. San Borja Norte, y la tercera es la Av. Boulevard de Surco o Jirón Paseo del Bosque (Ver Figura 6).



Figura 4.-Mapa Satelital del área de estudio donde se tomarán las muestras del agua que ingresa.

Fuente: Google Earth (2021).

4.2. Planta de tratamiento de la Municipalidad de San Borja

La PTSB está restringida a tratar solo agua del canal del río Surco, tiene una capacidad máxima de tratamiento de agua de 250 m³/día, equivalente a 174 L/min o 3L/s. El agua tratada se almacena en tanques para su posterior distribución. Cabe resaltar que esta PTSB no está diseñada para tratar directamente AR debido a que no presentan la misma concentración de contaminantes, por lo que cuando incrementa la contaminación de esta fuente de agua para irrigación puede representar un riesgo ambiental, social y de salubridad para la población (Human, 2015). Por ello, se realiza un monitoreo de calidad de agua anualmente con el fin de supervisar que se cumpla con los estándares de calidad del agua para riego que fueron utilizados para la evaluación de su eficiencia (Municipalidad de San Borja, 2021).

4.3. Prototipo de la Celda de Electrocoagulación

Para la construcción del prototipo de la celda de EC siguió el diseño tipo *batch* (ver figura 3.), correspondiente a un recipiente rectangular con la instalación de los electrodos posicionados de forma paralela conectados a una fuente de poder que conduzca la corriente suficiente para el tratamiento (Arboleda y Herrera, 2015).

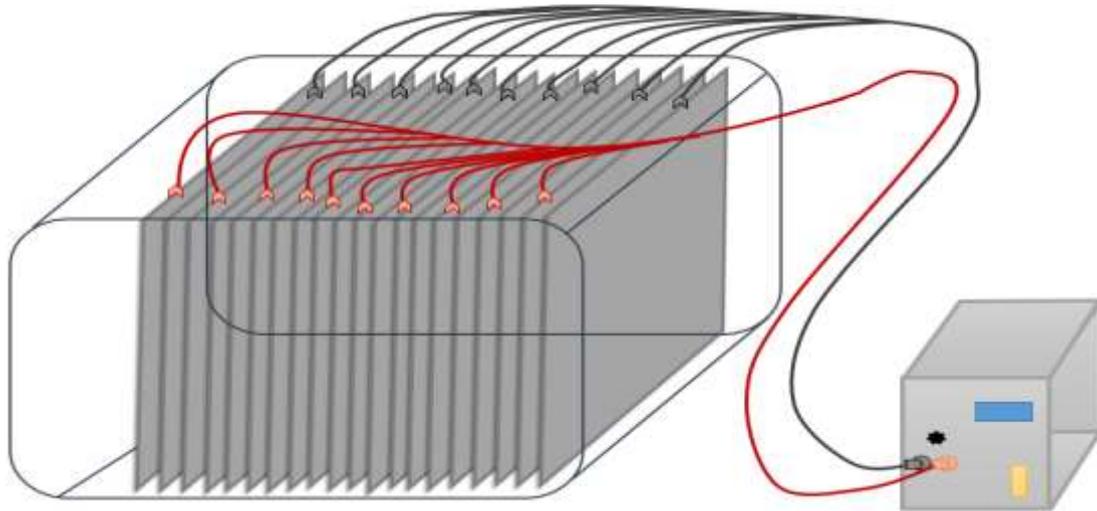


Figura 5.-Diagrama de la Celda de Electrocoagulación de las partes que la conforman
Nota: Se muestra la distribución paralela de los electrodos en la celda de EC, así como también las conexiones hacia la fuente de poder. Referido de Aguilar, (2015).

La celda fue diseñada para alcanzar el tratamiento de 0.5% de la capacidad real de PTSB (en adelante, “0.5% de PTASB”) por tratarse de un prototipo. Por ello, el volumen útil de la celda calculado fue de 30 L de agua (Ver Tabla 13), aplicándose el tratamiento de EC durante tres tiempos, es decir por 10, 20 y 30 min, el cual al día representaría un volumen de tratamiento entre 1.3 a 1.4 m³/ día.

Tabla 13.- Capacidad de tratamiento de la PTSB vs. la Celda de EC

Tratamiento	Capacidad Máxima de Tratamiento de Agua		
Biofísico- PTSB (100%)	250 m ³ /día	174 L/ min	3L/seg
Celda de EC (0.5%)	1.3m ³ /día a 1.4m ³ /día	0.9 L/min 1 L/min	0.015 L/seg a 0.017 L/seg

4.3.1. *Diseño de la Celda para la Electrocoagulación*

Para el prototipo de la celda de EC, se utilizó un recipiente rectangular con dimensiones de 31.2 cm de ancho, 32 cm de largo y 42 cm de altura. El volumen total del prototipo fue de 37 L, mientras que la capacidad real para el tratamiento fue de 30 L.

Tabla 14.- *Características y dimensiones de la Celda de Electrocoagulación*

Características	Dimensiones
Largo (cm)	42
Ancho (cm)	31.2
Altura (cm)	32
Volumen Total de la Celda (L)	37
Volumen Útil de la Celda (L)	30

4.3.2. *Tiempo de aplicación*

Para realizar el experimento se consideró tres tiempos para la inyección de corriente eléctrica al agua colectada para el tratamiento de electrocoagulación. Los tiempos a los que sometió el agua a tratar del río surco concurren entre los 10, 20 y 30 min (ver tabla 15). Con la finalidad de alcanzar caudal de tratamiento al 0.5% de la capacidad real de la planta actual, es decir, entre 0.9 L/min a 1 L/min.

4.3.3. *Intensidad de Corriente (Amperaje)*

Donde a su vez se inyectó dos intensidades eléctricas (en adelante, “corriente”) medida en amperios (A): a) 6 A y b) 12 A, bajo una presión de energía de 12 Voltios (V) respectivamente para evaluar la influencia de la corriente eléctrica en la EEC (Ver Tabla 15).

4.3.4. *Fuente de energía*

La fuente de poder tiene las siguientes características: Un voltaje de entrada es de 220 VAC 60 Hz y la salida es de 0 a 30 V con una corriente gradual de 0 a 12 A regulable.

Tiene un interruptor de encendido/apagado y un enchufe para conectar a un tomacorriente. La carcasa es de metal resistente y con corte automático a sobrecargas. Es un equipo genérico de 2.5 kg que cuenta con dos puertos para conectar los cables de polo positivo y polo negativo. Para las pruebas de un correcto funcionamiento, se utilizó un voltímetro digital y un cronómetro para calcular el tiempo del tratamiento (Aguilar, 2015; Poma y Quispe, 2016).

4.3.5. Electrodo, características e instalación

El material de los electrodos fue de aluminio (Al) y hierro (Fe) con forma cuadrada (Arboleda y Herrera, 2015). Se utilizaron un total 20 láminas, donde 10 de ellas fueron de Al (Electrodo positivo) y 10 de Fe (Electrodos negativos) de acuerdo a la metodología de Arango y Garcés (2007) (Tamani, 2017). Las dimensiones de las láminas tanto para el Al y el Fe fueron de 35x30 cm y de un grosor de 1/20 de pulgada (0.127 cm). Ver figura 4.

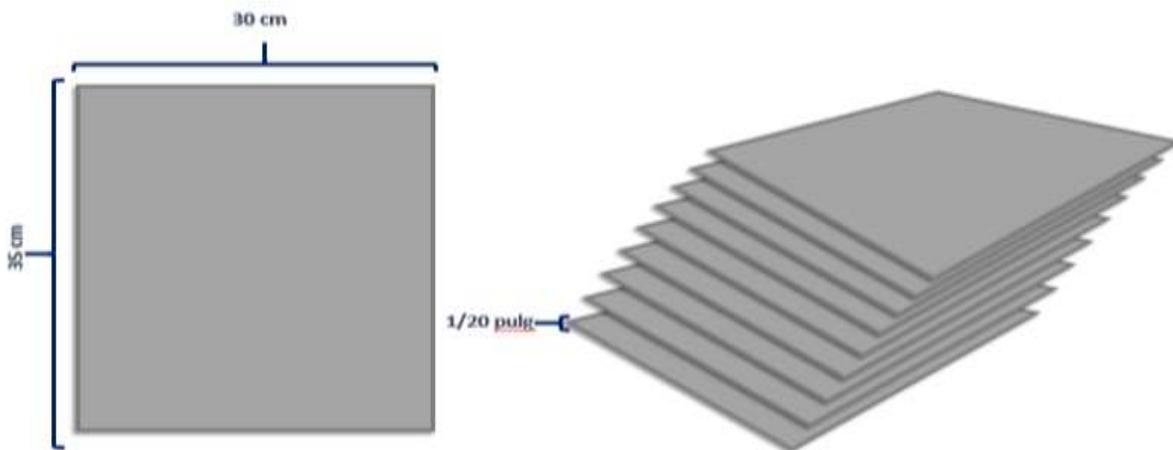


Figura 6.- Dimensiones y diseño de los electrodos para el tratamiento de electrocoagulación
Nota: Se muestra el diseño de los electrodos a utilizar, como las dimensiones y el grosor.

Cabe mencionar que fueron ubicados en la celda de forma intercalada y sostenidos por la tapa de plástico de la celda, la cual contaba con aberturas exactas para colocar de

forma vertical los electrodos. Las aberturas realizadas a la tapa tuvieron una distancia de 1.50 cm (Ver figura 5).

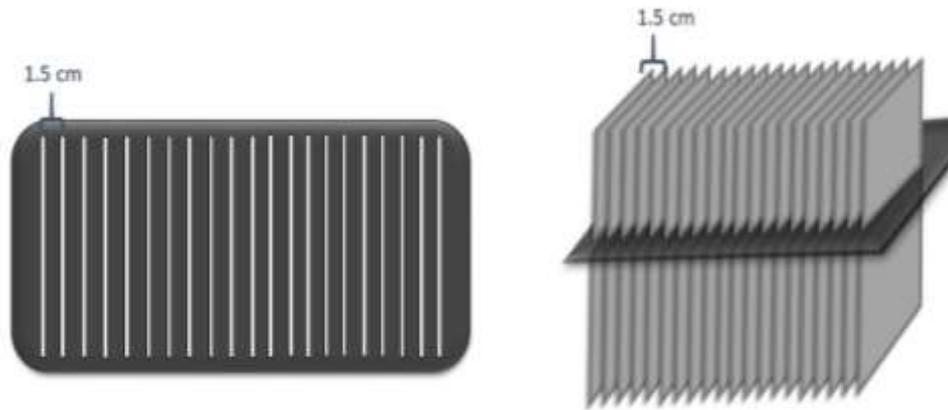


Figura 7.- Distancia y distribución de los electrodos de Al y Fe
Nota: Se muestra las divisiones y la distribución de los electrodos.

Los 20 electrodos fueron instalados como se muestra a una distancia de 1.5 cm cada uno, de acuerdo a las aberturas de la tapa de plástico; donde posteriormente se procedió a engancharlos a las pinzas soldadas a cables de conducción de energía interconectados con la fuente de poder (Mollah et. al, 2001; Aguilar, 2015).



Imagen 1.- Conexión de electrodos a la fuente de poder mediante cables con pinzas positivos y negativos.
Nota: El polo positivo es de color rojo, y el polo negativo es color negro.

4.4. Tipo y Diseño de la Investigación

4.4.1. Tipo: Aplicada

La presente investigación es de tipo aplicada, puesto que la EC es un tratamiento que ya existe, pero va a ser aplicado en una situación real a escala piloto; para determinar si la eficiencia del tratamiento cumple con los requerimientos de la PTSB y la normativa ambiental vigente.

4.4.2. Diseño: Experimental

Cuenta con un diseño experimental porque se manipuló la variable independiente (X), para observar el cambio en la variable dependiente (Y). Al operar la variable (X) de forma controlada (tiempo y corriente definida), permite la evaluación de la relación de causa-efecto de la presente investigación. Las variables fueron medidas de forma cuantitativa a fin de determinar el porcentaje de eficiencia del tratamiento de EC (mayor al 80%).

- Variables X → Variable Y
- Independiente → Dependiente
- Tratamiento Complementario de EC → Aguas del río Surco

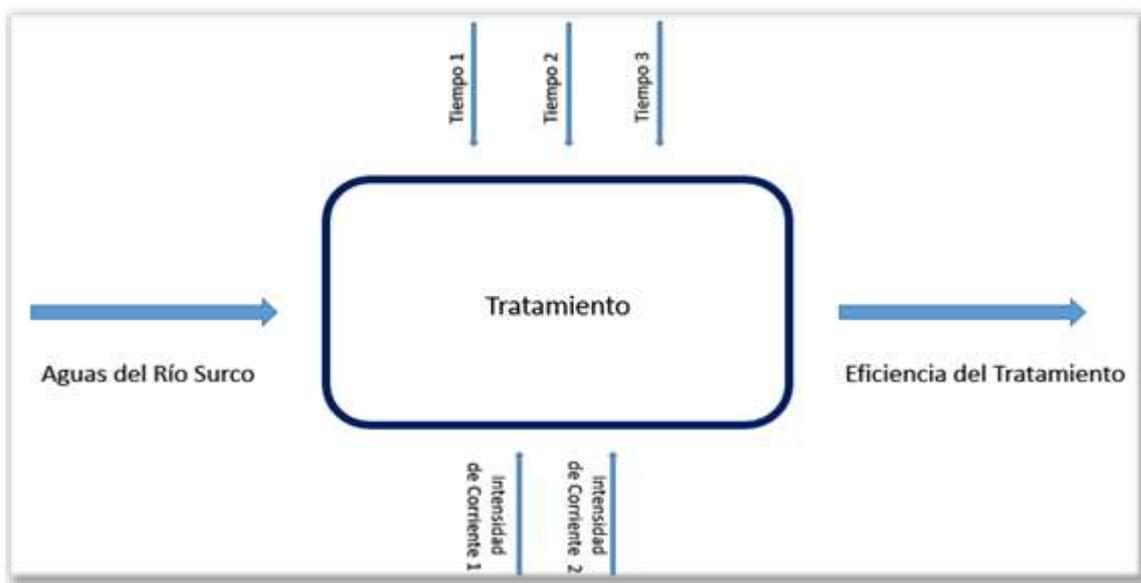


Figura 8.-Diseño Experimental de la Investigación reflejado en un diagrama

4.4.3. Alcance: Descriptiva e Inferencial

El nivel de alcance de los resultados obtenidos en la parte experimental de la investigación; es descriptiva e inferencial, ya que se cuenta con una base de comprensión sobre los efectos de EC sobre las aguas tratadas, que permite describir los resultados de forma deductiva, comparando los resultados iniciales y finales después del tratamiento.

4.4.4. Enfoque: Cuantitativo

El estudio tiene un enfoque cuantitativo, ya que por medio de números como la concentración de los parámetros analizados y porcentajes de remoción o mejora serán medidas las variables.

4.4.5. Tratamiento de la muestra

El tratamiento complementario al que se sometieron las muestras fue la EC, esto se realizó a escala piloto, donde se construyó un reactor de tipo *batch* portátil (Aguilar, 2015; Poma, y Quispe, 2016) capaz de tratar el 0.5% de la capacidad real (1.3 a 1.4 m³/día). El tiempo y la corriente aplicada permitió la operación del tratamiento. Se aplicaron seis (06) combinaciones de tratamientos de EC. Por cada combinación, se aplicaron cuatro (04) repeticiones para validar el tratamiento (Ver Tabla 15).

Tabla 15.- Matriz del diseño de la investigación

Diseño del tratamiento de las muestras								
Tiempo (min)	Corriente (A)	N° de Electrodo del Reactor	Material Electrodo	Distancia entre cada electrodo (cm)	N° de Pruebas	Volumen agua a tratar	Parámetros (Laboratorio)	Parámetros <i>in-situ</i>
0	0	0	N.A	N.A	4	30L	CTT, DBO ₅ y MT	pH, CE, T° y OD
10	6	20	Al y Fe	1.5	4	30L	CTT, DBO ₅ y MT	pH, CE, T° y OD
	12	20	Al y Fe	1.5	4	30L	CTT, DBO ₅ y MT	pH, CE, T° y OD
20	6	20	Al y Fe	1.5	4	30L	CTT, DBO ₅ y MT	pH, CE, T° y OD
	12	20	Al y Fe	1.5	4	30L	CTT, DBO ₅ y MT	pH, CE, T° y OD
30	6	20	Al y Fe	1.5	4	30L	CTT, DBO ₅ y MT	pH, CE, T° y OD
	12	20	Al y Fe	1.5	4	30L	CTT, DBO ₅ y MT	pH, CE, T° y OD

Nota: N. A= No Aplica; A= Amperios; CTT= Coliformes Termotolerantes o fecales; DBO₅= Demanda Bioquímica de Oxígeno; MT= Metales Totales (Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb) y Hierro (Fe); pH= Potencial de Hidrógeno; CE=Conductividad Eléctrica; T°= Temperatura y OD=Oxígeno disuelto.

4.4.6. Unidad de Análisis

La unidad de análisis de la investigación son las AC del río Surco que transcurren por el Distrito de San Borja y son tratadas en la PTSB.

4.4.7. Variables del Estudio

Las variables identificadas en el estudio fueron el tratamiento complementario de la electrocoagulación, como variable independiente, y la variable dependiente es la calidad del agua del río Surco.

Tabla 16.- Esquema identificación de las variables de estudio

Variables	Dimensiones	Tipo	Característica
X: Tratamiento Complementario Electrocoagulación	X1: Tiempo de aplicación	Independiente	Cuantitativa
	X2: Intensidad de Corriente	Independiente	Cuantitativa
Y: Calidad de las aguas del río Surco	Y1: DBO ₅	Dependiente	Cuantitativa
	Y2: Coliformes Termotolerantes	Dependiente	Cuantitativa
	Y3: Metales Totales (As, Cd, Pb, Fe)	Dependiente	Cuantitativa

4.4.8. Tamaño y Selección de la Muestra

El tamaño del muestreo corresponde a la suma de cuatro (04) repeticiones (pruebas) y de cuatro (04) muestras control. Se aplicaron seis (06) tratamientos basados en tres tiempos de aplicación (10, 20 y 30 min) y dos corrientes (6 y 12 A). El tamaño total de las muestras corresponde a 28 considerando los cuatro (04) controles.

En el siguiente gráfico, se detalla el desarrollo de los tratamientos y los parámetros evaluados:



Figura 9.-Diseño, tamaño y selección de la muestra para la aplicación de los tratamientos con EC bajo diferentes corrientes eléctricas y tiempos.

Nota: MC= Muestra compuesta; CTT= Coliformes Termotolerantes o fecales; DBO= Demanda Bioquímica de Oxígeno; MT= Metales Totales (Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb) y Hierro (Fe)); pH= Potencial de Hidrógeno; CE=Conductividad Eléctrica; T°= Temperatura y OD=Oxígeno disuelto.

4.4.9. Técnicas de recolección de las Muestras

Se siguió la técnica de recolección para muestras compuestas (más adelante, “MC”), la cual constaba de la combinación de muestras individuales recolectadas en tres horarios (9:00 am, 12:00 pm; 15:00 pm), con intervalos de tiempo de 3 h, con el fin de reducir la

variabilidad de la muestra individual. Se recolectaron cerca de 60 L por horario y se almacenaron en un tanque de capacidad de 180 L (ver Imagen. - 3).



Imagen 2.- Fotografías del tanque homogeneizador del agua del río Surco

4.5. Medición de parámetros

Una vez finalizado el tratamiento, se procedió con la toma de parámetros de campo con el multiparámetro, el cual nos permitió obtener los datos de potencial de hidrógeno (en adelante, pH), conductividad eléctrica (en adelante, “CE”), oxígeno disuelto (en adelante, “OD” y temperatura (en adelante, “T°”).

En cuanto a los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (en adelante, “DBO₅”), coliformes termotolerantes (CTT) y Metales Totales (As, Cd, Pb y Fe), se tomaron las muestras siguiendo las referencias del “Protocolo Nacional de Monitoreo de la calidad de los Recursos Hídricos Superficiales” (Resolución Jefatural N° 010 – 2016 -ANA).

4.5.1. *Parámetros de Campo (in situ)*

Para la determinación de los parámetros de forma *in situ* como el pH, CE, OD, y T°; se utilizó el multiparámetro de la empresa TECH, previo a la medición, se corroboró con los *buffers* que se encontrara correctamente calibrado (Vyasa y Jethoob, 2015).



Imagen 3.- Fotografías del equipo multiparámetro junto a sus componentes

Los resultados se anotaron en una tabla de Excel y se transcribieron la cadena de custodia solicitada por el laboratorio ALAB.

Tabla 17.- Parámetros de campo muestreados

Parámetros	Equipos /Metodología
pH	Multiparámetro calibrado de la empresa Tech Perú Industrial S.A.C. Marca: HACH Unidad de pH: Unidad de pH
CE	Multiparámetro calibrado de la empresa Tech Perú Industrial S.A.C. Marca: HACH Unidad de CE: $\mu\text{S}/\text{cm}$
OD	Multiparámetro calibrado de la empresa Tech Perú Industrial S.A.C. Marca: HACH Unidad: mg/L
T°	Multiparámetro calibrado de la empresa Tech Perú Industrial S.A.C. Marca: HACH Unidad de medida: Grados Celsius (C°)

Nota: En el Anexo 5 se encuentran los certificados de calibración de la empresa Tech Perú Industrial S.A.C. para los parámetros de campo pH, CE, OD, y T°.

4.5.2. Parámetros de Laboratorio

Para el análisis de CTT, DBO₅ y Metales Totales (As, Cd, Pb, Fe) se enviaron las muestras rotuladas al laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (en adelante, “INACAL”), Analytical Laboratory E.I.R.L (en adelante, “ALAB”) junto a las cadenas de custodia del monitoreo (Ver Anexo 4).



Imagen 4.- Fotografías de la recolección de muestras para los parámetros de laboratorio (DBO₅, CTT, MT)
Nota: Las muestras no necesitaron ser refrigeradas porque fueron analizadas en menos de 24 horas por el Laboratorio. Se le aplicó los preservantes para las muestras que correspondían (Ver Anexo 4).

En la Tabla 20 se detalla la metodología aplicada para la determinación de los siguientes parámetros:

Tabla 18.- Tabla de medición y análisis de parámetros de laboratorio.

Parámetros	Equipos /Metodología
CTT	Analizado por el laboratorio Acreditado ALAB Método: SMEWW 9221 F.2, 23 rd. Ed. 2017 Acreditado por: IAS (<i>Internacional Accreditation Service</i>) Unidad de Medida: NMP/100ml
DBO ₅	Analizado por el laboratorio Acreditado ALAB Método: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 23 rd Ed. 2017 Acreditado por: IAS (<i>Internacional Accreditation Service</i>) Unidad de Medida: mgDBO ₅ /L
Metales Totales (As, Cd, Pb, Fe)	Analizado por el laboratorio Acreditado ALAB Método: <i>Method 200.8, Revision 5.4 1994</i> (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance), 2021 Acreditado por: INACAL (Instituto Nacional de Calidad del Perú. Unidad de Medida: mg/L

Nota: Los parámetros CTT, DBO₅, y Metales Totales determinados por el Laboratorio.

4.5.3. Eficiencia del tratamiento de electrocoagulación

Para la determinación de la EEC, se determinará con porcentaje de remoción y mejora de los parámetros evaluados de acuerdo con las siguientes formulas (Aguilar, 2015):

$$EEC = \left(1 - \left(\frac{P_x}{P_0} \right) \right) * 100\%$$

EEC= Eficiencia de remoción de la Electrocoagulación para los parámetros: CTT, MT, y DBO₅

P₀= Parámetro Inicial

P_x= Parámetro después del tratamiento

X= Tratamiento (1;2;3;4; 5 o 6)

$$VEC = P_x - P_0$$

VEC= Variación de los parámetros: CE, OD, pH, y Temperatura; por la Electrocoagulación

P₀= Parámetro Inicial

P_x= Parámetro después del tratamiento

X= Tratamiento (1;2;3;4; 5 o 6)

4.6. Análisis de datos

Los resultados están distribuidos según los objetivos planteados en esta investigación, cada resultado viene acompañado de su descripción, además de ello, se realiza la contratación de hipótesis para poder dar mayor validez a los resultados obtenidos.

El análisis de datos ha sido realizado en el software Microsoft Excel 365, se utilizó una estadística descriptiva debido al alcance/nivel de la investigación, la cual según lo obtenido se deduce los resultados.

Los datos del control fueron analizados y contrastados con los resultados después de los tratamientos, para corroborar si hubo una reducción de contaminantes y mejora de calidad del agua después de la EC.

Se obtuvo un promedio de los resultados para determinar el porcentaje de remoción de contaminantes por cada variable medida.

Se considerará eficiente el tratamiento de electrocoagulación para aquellos parámetros que alcancen o superen el 80% de eficiencia en la remoción de los contaminantes. Del mismo modo se comparan con la normativa vigente del Estado peruano según el D.S. N° 004-2017-MINAM.

4.7. Aspectos éticos

Se solicitó la autorización a la Municipalidad de San Borja, Gerencia de Medio ambiente y Sostenibilidad para dar acceso a la información de la Planta de Tratamiento y a monitorios previos para evaluar el historial del agua canal de río Surco. Asimismo, también se solicitó la autorización para realizar la recolección de muestras bajo su supervisión (Ver anexo 1 y 2).

V. RESULTADOS

5.1. Caracterización de análisis físico-químico y microbiológico

El agua del río fue almacenada en un tanque de capacidad 180 L para la obtención de una MC y homogénea para la posterior aplicación de los tratamientos de EC. Se realizaron cuatro (04) repeticiones para la toma de muestra del control en diferentes fechas. La MC y por ende el control fue distinto en cada repetición.

Como se observa en la Tabla. - 19, el parámetro de pH tiene un rango de 5.98 a 7.02, en promedio el agua tiene una característica ligeramente ácida. En cuanto a la conductividad se encuentra entre 145.7 y 675 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (promedio=439.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$), la temperatura inicial se encuentra dentro de los 17.1 y 18.1 °C. El oxígeno disuelto se encuentra entre 3.86 y 5.52 y el DBO_5 tiene una concentración alta, entre los 85.5 y 380 mg/L, al igual que los Coliformes Termotolerantes, los resultados indican que entre 1600 y 44000 NMP/100 mL. En el caso de los metales analizados por el laboratorio, la concentración de Arsénico se encontraba 0.161 y 0.450 mg/L, el Cadmio entre 0.0124 y 0.0446 mg/L, el Plomo y el Hierro sus concentraciones variaron entre 0.0289 a 0.102 mg/L; y de 0.042 a 1.496, respectivamente.

Tabla 19.- Resultados de los parámetros de los Controles

Parámetro	Unidad	Resultados del Control (Agua de río Surco)			
		Control 1	Control 2	Control 3	Control 4
pH	Unidad de pH	6.47	6.43	7.02	5.98
Conductividad	μS/cm	675	450	145.7	486
Oxígeno Disuelto	mg/L	4.12	4.81	3.86	5.52
Temperatura	°C	18.1	18.4	17.9	17.01
DBO ₅	mg/L	279.9	380	85.5	128
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	44000	3900	1600	2300
Metales Totales (Arsénico)	mg/L	0.161	0.189	0.450	0.227
Metales Totales (Cadmio)	mg/L	0.0446	0.0124	0.0289	0.042
Metales Totales (Plomo)	mg/L	0.054	0.0689	0.0289	0.102
Metales Totales (Hierro)	mg/L	1.0895	0.280	0.042	1.496

Nota:

00	Valor que no cumple con ECA Agua (2017) – Categoría 3: D1- Riego de Vegetales
00	Valor que no cumple con ECA Agua (2017) – Categoría 4: E2- Ríos (Costa y Sierra)
00	Valor que no cumple con ECA Agua (2017) – Categoría 3 y 4: D1 Riego de Vegetales y E2- Ríos (Costa y Sierra)

El agua seleccionada para realizar la experimentación fue captada del río Surco, específicamente en el canal que conecta el agua del río a la PTSB.

Los resultados de los parámetros *in situ* evaluados en campo para la MC inicial (el control en sus cuatro repeticiones) muestran niveles de excedencia a la normativa del Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM (en adelante, “D.S. N° 004-2017”) en la Categoría 3 Riego y Bebida Animal – Riego de Vegetales (en adelante, “Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales”) y la Categoría 4 Conservación del Ambiente Acuático – Ríos Costa y Sierra (en adelante, “Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra”) en los parámetros de pH y oxígeno disuelto.

Para el análisis del laboratorio, el agua del río Surco fue recolectada y homogenizada, en las muestras control (previo a la aplicación de los tratamientos), se evidencia niveles de excedencia en las concentraciones de CTT, DBO₅, y los metales de Arsénico y Plomo para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales y la Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra.

En cuanto a los resultados del parámetro Cadmio, estos superan los niveles de excedencia para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales. El resto de parámetros como el Hierro, no muestran desviación o excedencia a la normativa en comparación.

Asimismo, cabe indicar que los datos obtenidos tanto por el laboratorio como los muestreados en campo evidencian que el agua proveniente del río Surco trasgreden los ECA Agua para ambas categorías (Cat. 3 y Cat. 4). Adicionalmente, se evidencia en la Imagen 5; la presencia de residuos sólidos en el canal, por lo que se presume que todavía existen descargas de efluentes domésticos e industriales activas, que implican una de las principales causas de su contaminación.



Imagen 5.- Contaminación del Río Surco por residuos sólidos y otros.

Nota: Se evidencia una alta concentración de residuos sólidos como bolsas de plástico, papeles, restos y empaques de comida, residuos vehiculares, metales y demás. También se observó gran cantidad de algas

5.2. Análisis e interpretación de resultados

5.2.1. Objetivo Específico N° 1:

Identificar la calidad del agua del río Surco antes y después de ser tratadas por el tratamiento complementario de electrocoagulación (PTSB)

En la Figura 12, se aprecia la remoción de arsénico antes y después del tratamiento de EC, se puede visualizar, mientras se aumenta el tiempo y la corriente eléctrica (eje X), se logra disminuir la concentración de arsénico hasta un valor muy cercano al 95% de remoción, tal como se puede apreciar en el eje Y.

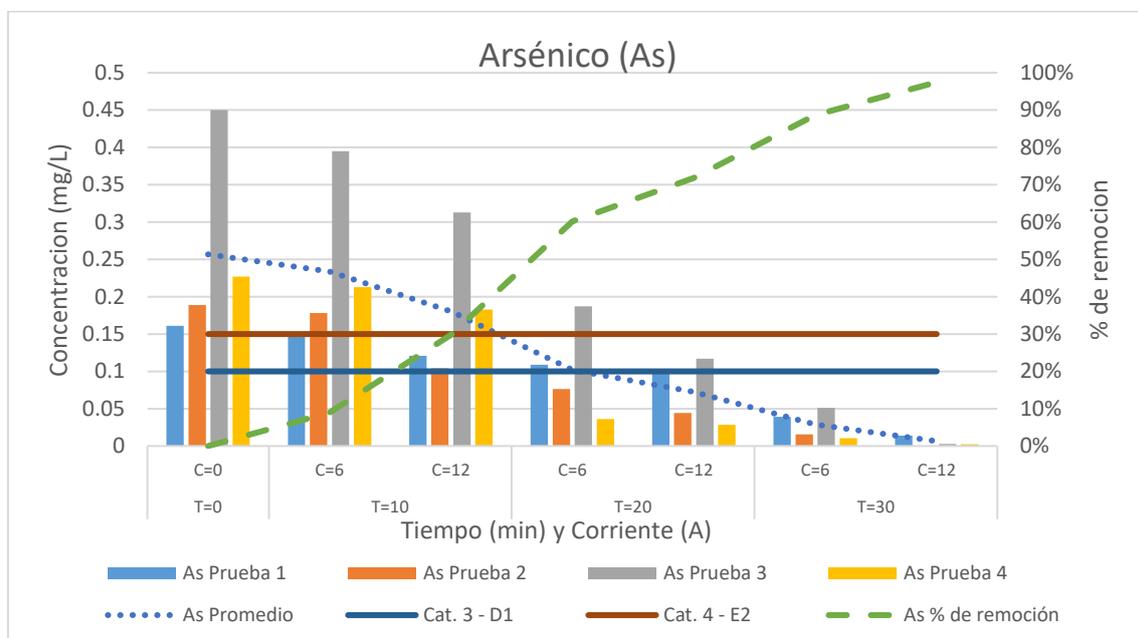


Figura 10.- Remoción de Arsénico antes y después de tratamiento

En la Figura 13, se aprecia la remoción de cadmio antes y después del tratamiento de EC, se puede visualizar que, mientras se aumenta el tiempo y la corriente eléctrica (eje X), se logra disminuir la concentración de cadmio hasta un valor muy cercano al 90% de remoción, tal como se puede apreciar en el eje Y.

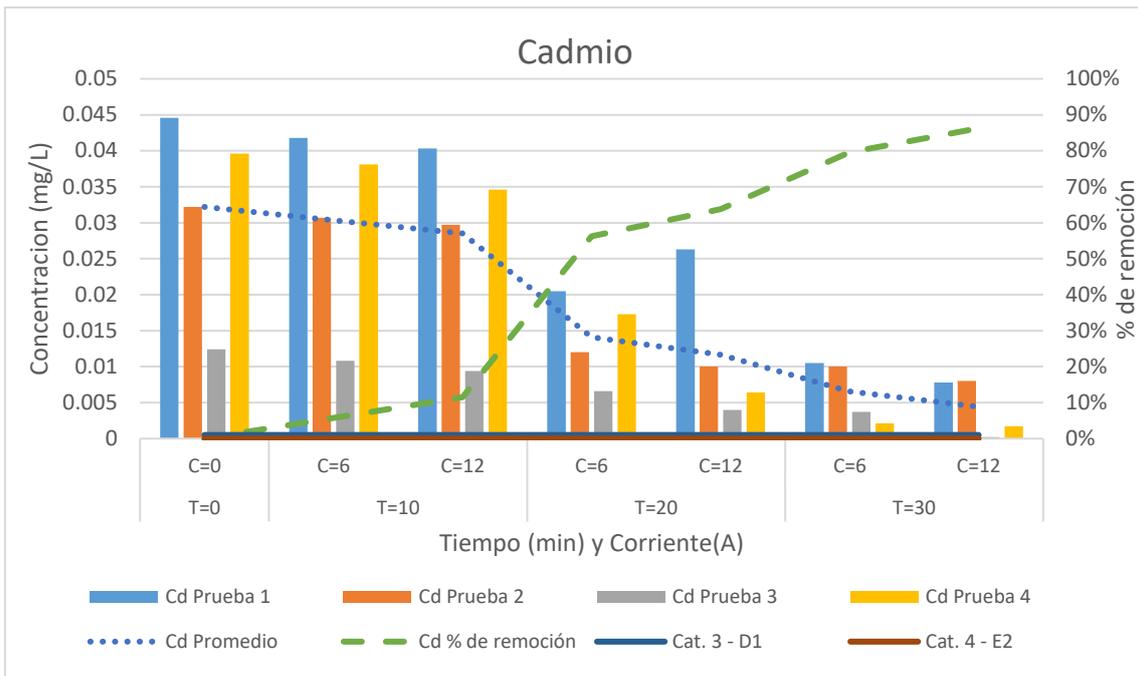


Figura 11.- Remoción de Cadmio antes y después de tratamiento

En la Figura 14, se aprecia la remoción de plomo antes y después del tratamiento de EC, se puede visualizar que, mientras se aumenta el tiempo y la corriente eléctrica (eje X), se logra disminuir la concentración de plomo hasta un valor aproximado al 90% de remoción, tal como se puede apreciar en el eje Y.

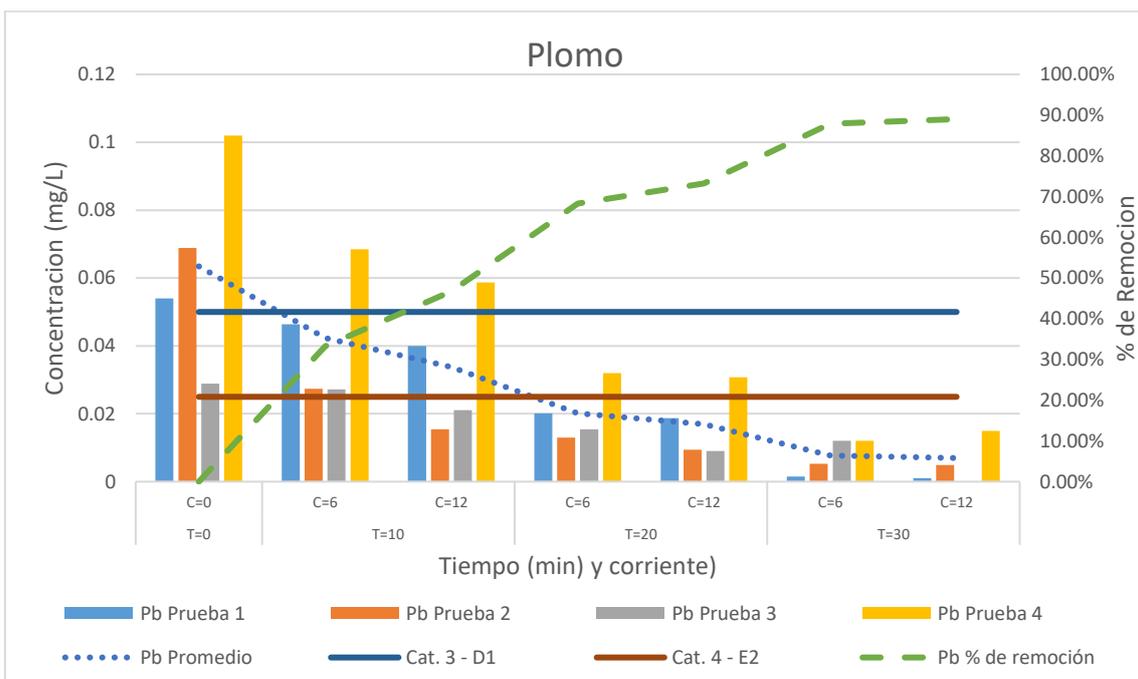


Figura 12.- Remoción de Plomo antes y después de tratamiento

En la Figura 15, se aprecia la remoción de hierro antes y después del tratamiento de EC, se puede visualizar que, mientras se aumenta el tiempo y la corriente eléctrica (eje X), se logra disminuir la concentración de hierro hasta un valor aproximado del 90% de remoción, tal como se puede apreciar en el eje Y.

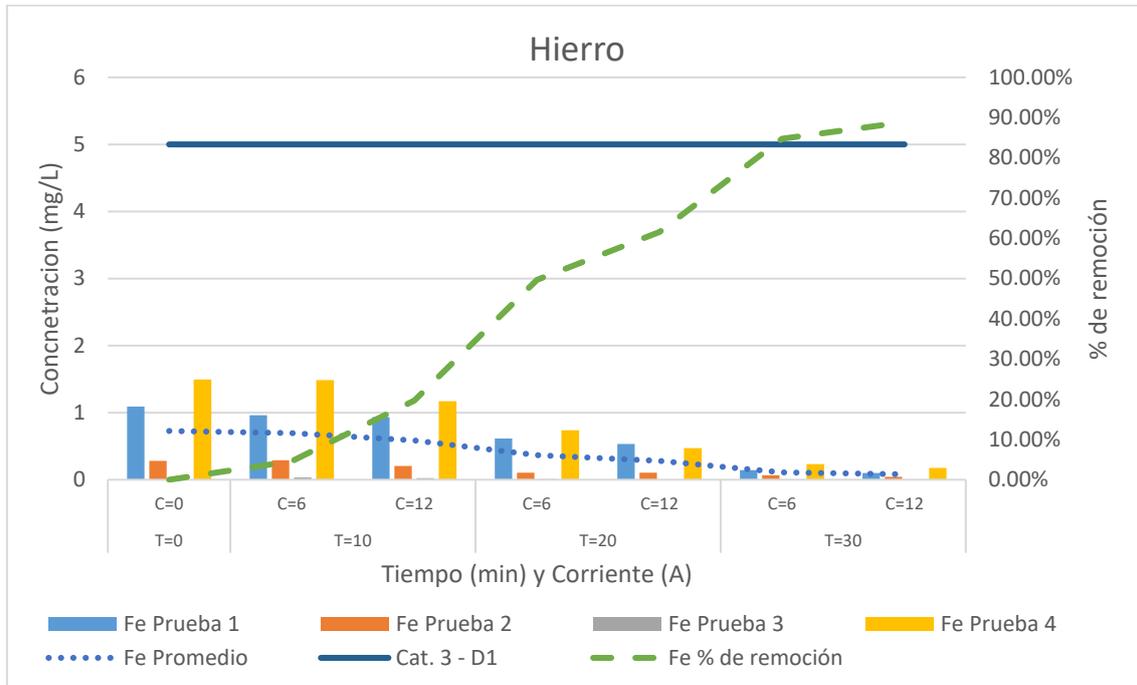


Figura 13.- Remoción de Hierro antes y después de tratamiento

En la Figura 16, se aprecia la remoción de DBO₅ antes y después del tratamiento de EC, se puede visualizar que, mientras se aumenta el tiempo y la corriente eléctrica (eje X), se logra disminuir la concentración de DBO₅ hasta un valor promedio de del 94.5%, tal como se puede apreciar en el eje Y.

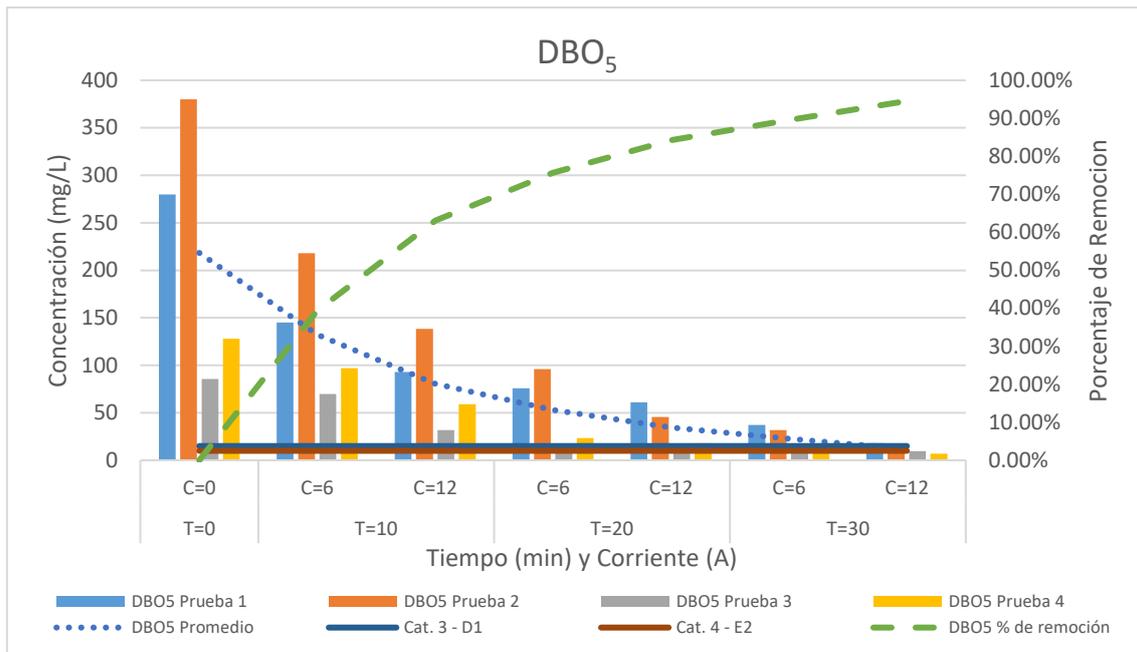


Figura 14.- Remoción de DBO₅ antes y después de tratamiento

En la Figura 17, se aprecia la remoción de coliformes termotolerantes antes y después del tratamiento de EC, se puede visualizar que, mientras se aumenta el tiempo y la corriente eléctrica (eje X), se logra disminuir la concentración de CTT hasta un valor cercano al 100% de remoción, tal como se puede apreciar en el eje Y.

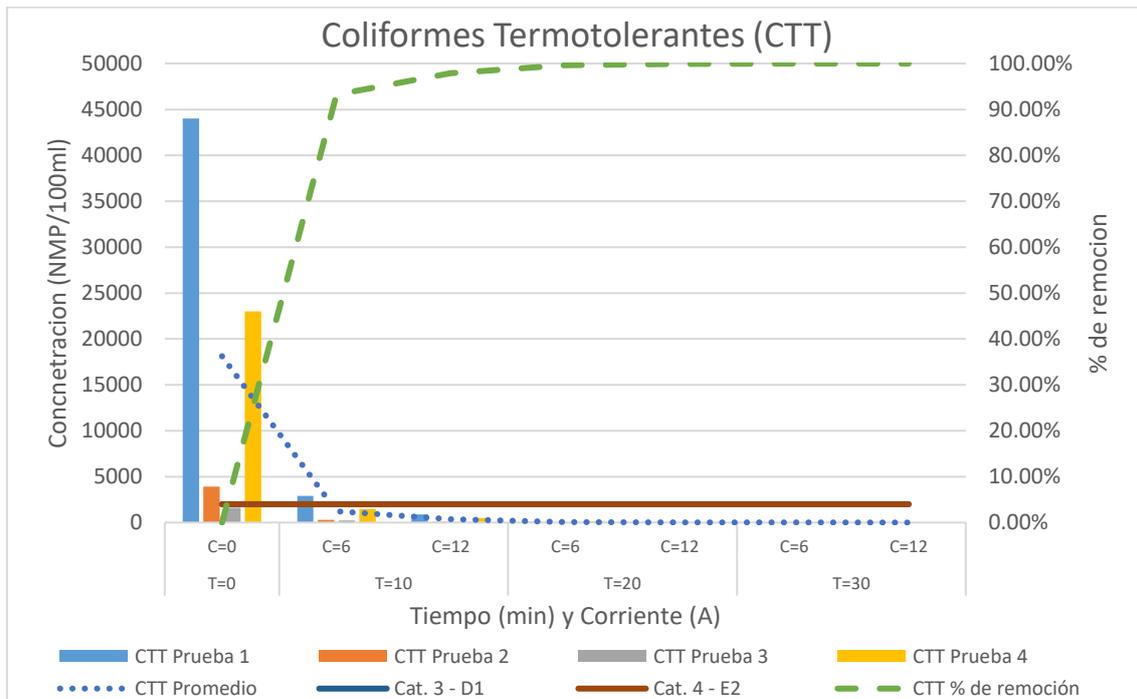


Figura 15.- Remoción de Coliformes Termotolerantes antes y después de tratamiento

En la Tabla 20, se aprecia la variación del oxígeno disuelto antes y después del tratamiento de EC, se puede visualizar que, mientras aumenta el tiempo y la corriente eléctrica, incrementa la concentración de oxígeno disuelto de 4.58 a 8.88 mg/L.

Tabla 20.- Variación de Oxígeno Disuelto antes y después de tratamiento

Tiempo	Corriente	Oxígeno Disuelto (mg/L)	
		Promedio	Variación P _x -P _o
T=0	C=0	4.5775	0
T=10	C=6	6.255	1.68
	C=12	6.6	2.02
T=20	C=6	7.8625	3.28
	C=12	8.335	3.75
T=30	C=6	8.295	3.72
	C=12	8.8825	4.30

En la Tabla 21, se aprecia la variación del pH antes y después del tratamiento de EC, se puede visualizar que, mientras aumenta el tiempo y la corriente eléctrica, el pH se eleva de 6.47 hasta 7.73 en promedio.

Tabla 21.- Variación de pH antes y después de tratamiento

Tiempo	Corriente	pH	
		Promedio	Variación P _x -P _o
T=0	C=0	6.475	0
T=10	C=6	6.84	0.34
	C=12	6.92	0.37
T=20	C=6	7.16	0.66
	C=12	7.2375	0.72
T=30	C=6	7.5275	1.03
	C=12	7.7375	1.21

En la Figura 18, se aprecia la reducción de la conductividad antes y después del tratamiento de EC, se puede visualizar que, mientras se aumenta el tiempo y la corriente eléctrica (eje X), se logra reducir la conductividad 439,4 a 36.3 μ S/cm (90% menos), tal como se puede apreciar en el eje Y.

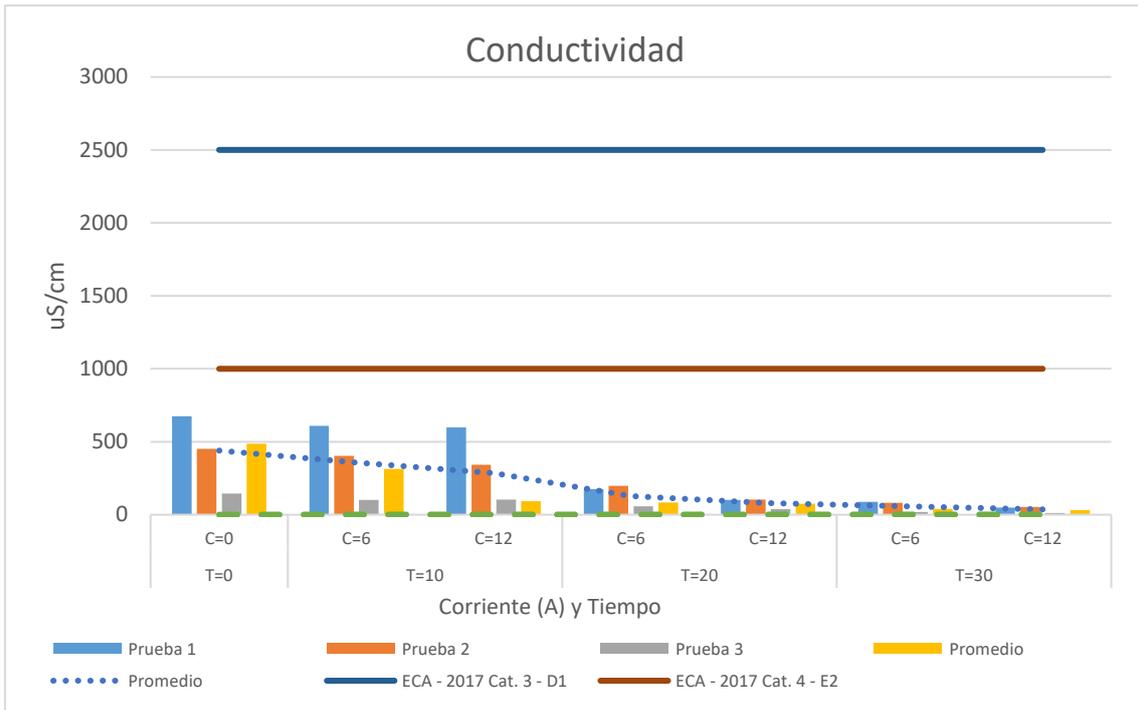


Figura 18.- Reducción de Conductividad antes y después de tratamiento

En la Figura 19, se aprecia el incremento de la T° antes y después del tratamiento de EC, se visualiza que, mientras se aumenta el tiempo y la corriente eléctrica (eje X), se incrementa la temperatura de 17.85 a 24.07 °C, tal como se puede apreciar en el eje Y.

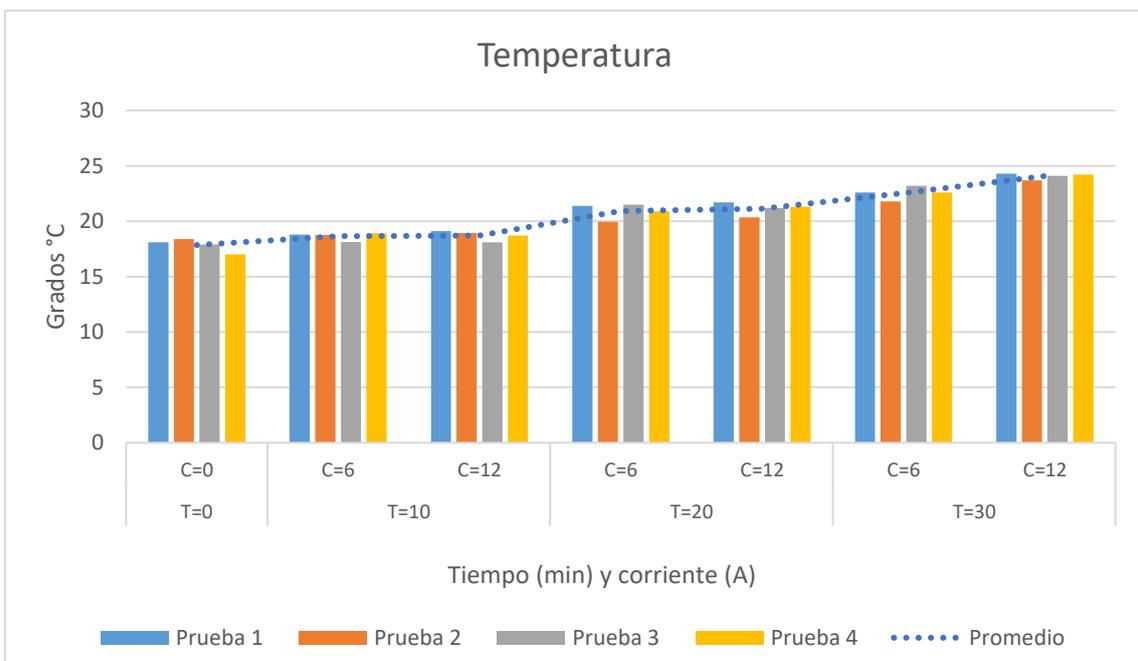


Figura 16.- Incremento de Temperatura antes y después de tratamiento

5.2.2. *Objetivo Específico N°2:*

Determinar la influencia del tiempo de aplicación y grado o intensidad de corriente (amperaje) para el tratamiento más óptimo.

En la Figura 20 se muestra el tiempo de aplicación y la intensidad de corriente para el arsénico, se puede apreciar que a un tiempo de 30 min y a una corriente eléctrica de 12 A, se logra reducir la concentración de arsénico.

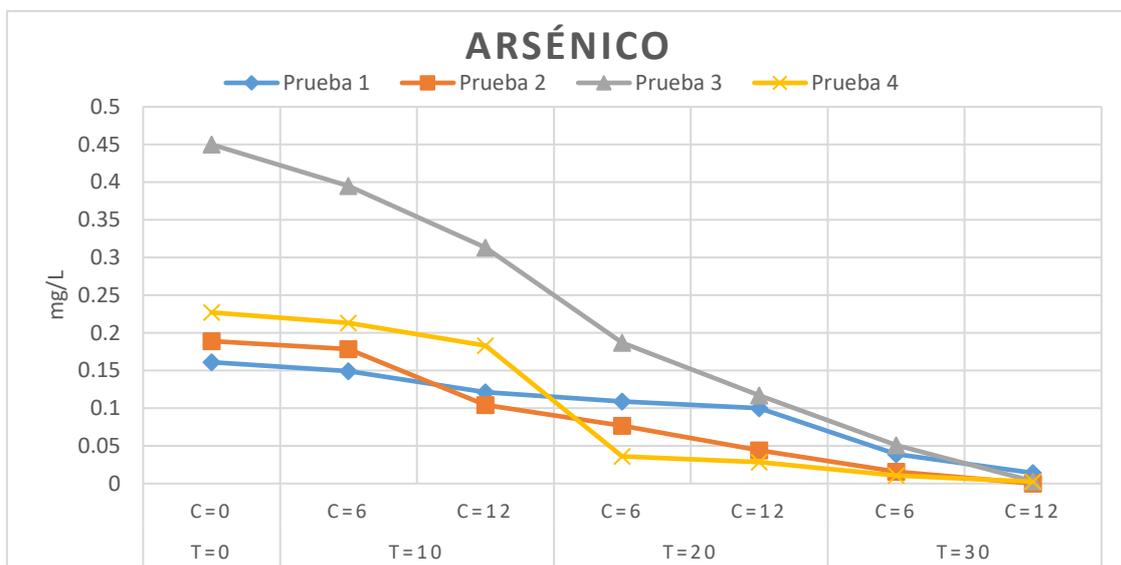


Figura 170.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para Arsénico

En la Figura 21 se muestra el tiempo de aplicación y la intensidad de corriente para el cadmio, se puede apreciar que a un tiempo de 30 min y a una corriente eléctrica de 12 A, se logra reducir la concentración de cadmio.

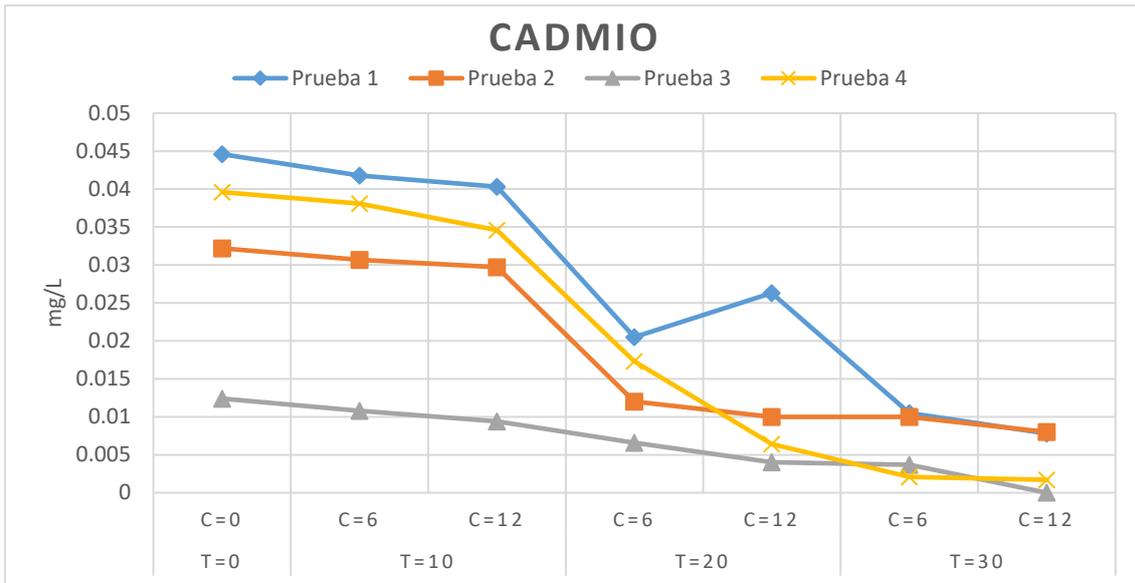


Figura 181.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para Cadmio

En la Figura 22 se muestra el tiempo de aplicación y la intensidad de corriente para el plomo, se puede apreciar que a un tiempo de 30 min y a una corriente eléctrica de 12 A, se logra reducir la concentración de plomo.

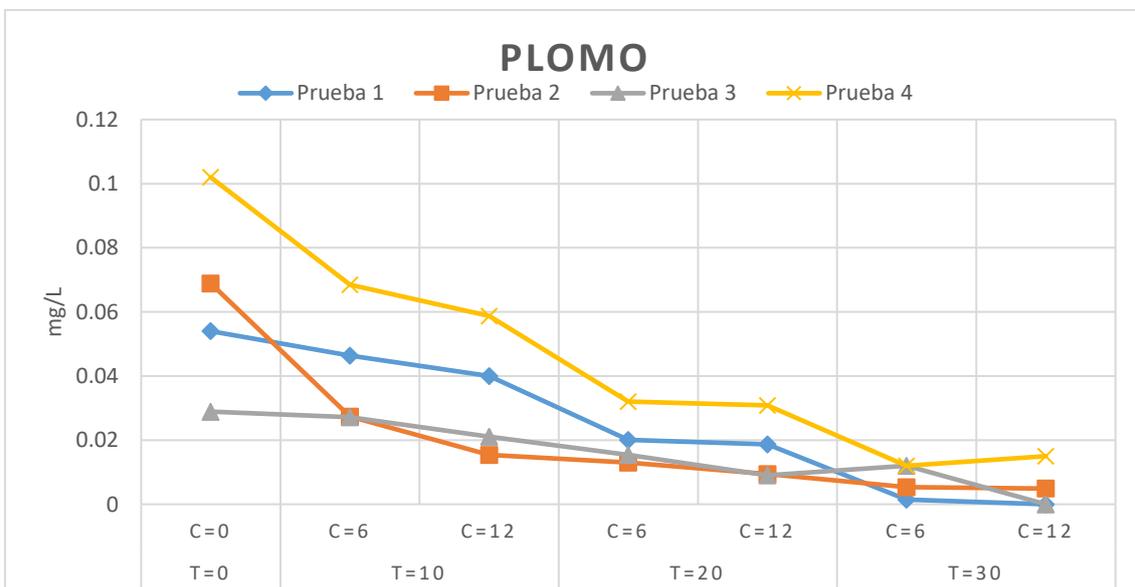


Figura 192.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para Plomo

En la Figura 23 se muestra el tiempo de aplicación y la intensidad de corriente para el hierro, se puede apreciar que a un tiempo de 30 min y a una corriente eléctrica de 12 A, se logra reducir la concentración de hierro.

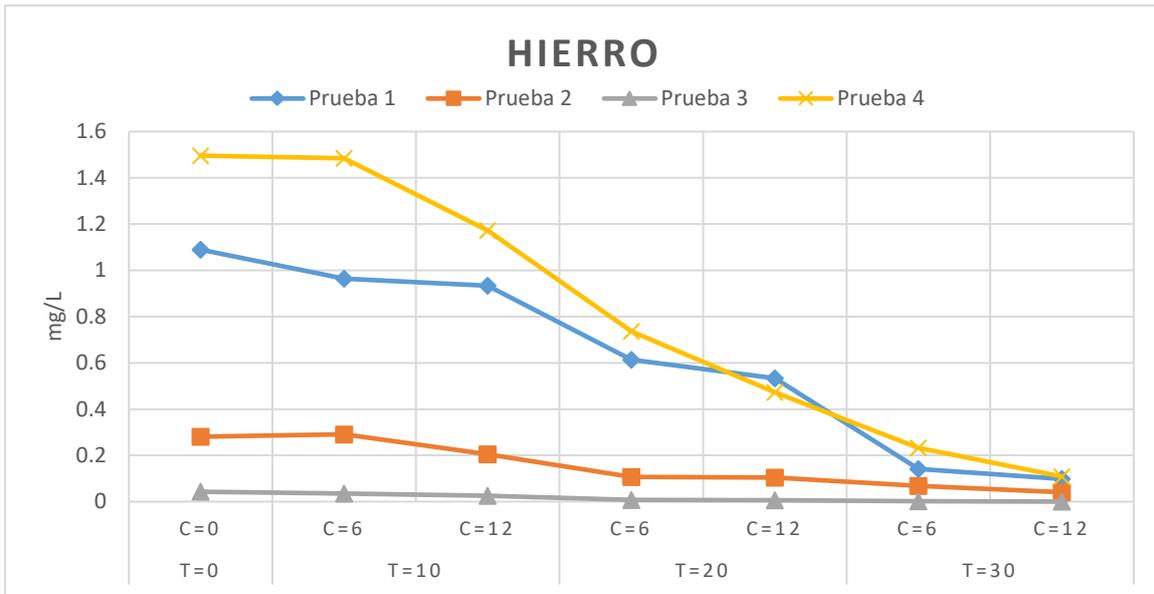


Figura 203.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para Hierro

En la Figura 24 se muestra el tiempo de aplicación y la intensidad de corriente para el DBO₅, se puede apreciar que a un tiempo de 30 min y a una corriente eléctrica de 12 A, se logra reducir la concentración de DBO₅.

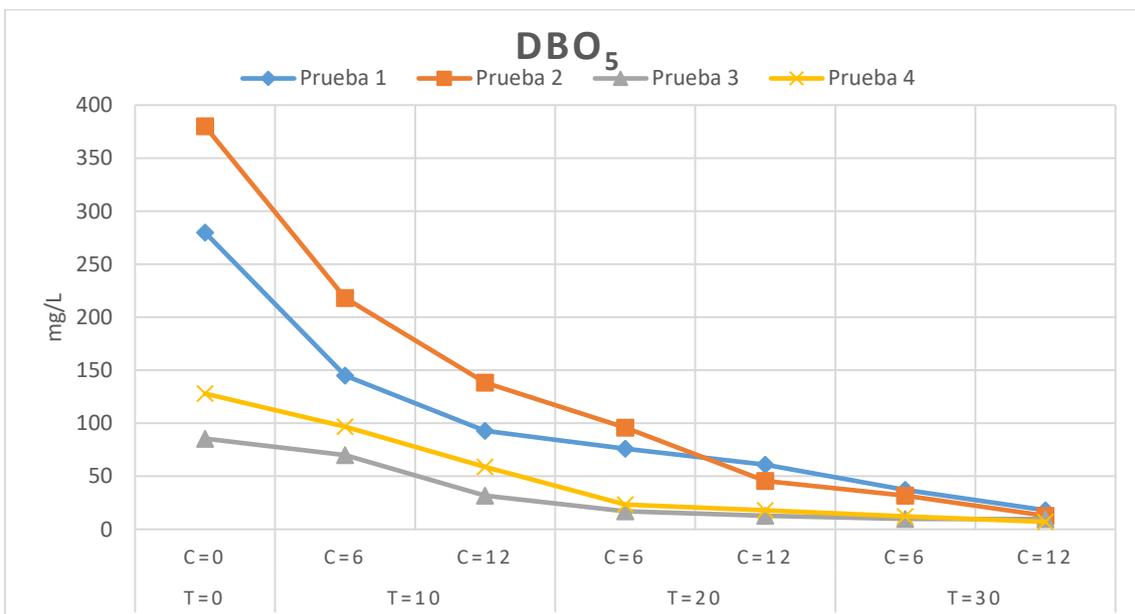


Figura 214.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para DBO₅

En la Figura 25 se muestra el tiempo de aplicación y la intensidad de corriente para los coliformes termotolerantes, se puede apreciar que a partir de un tiempo de 10 min y a una corriente eléctrica de 6 A, se logra reducir la concentración de coliformes termotolerantes.

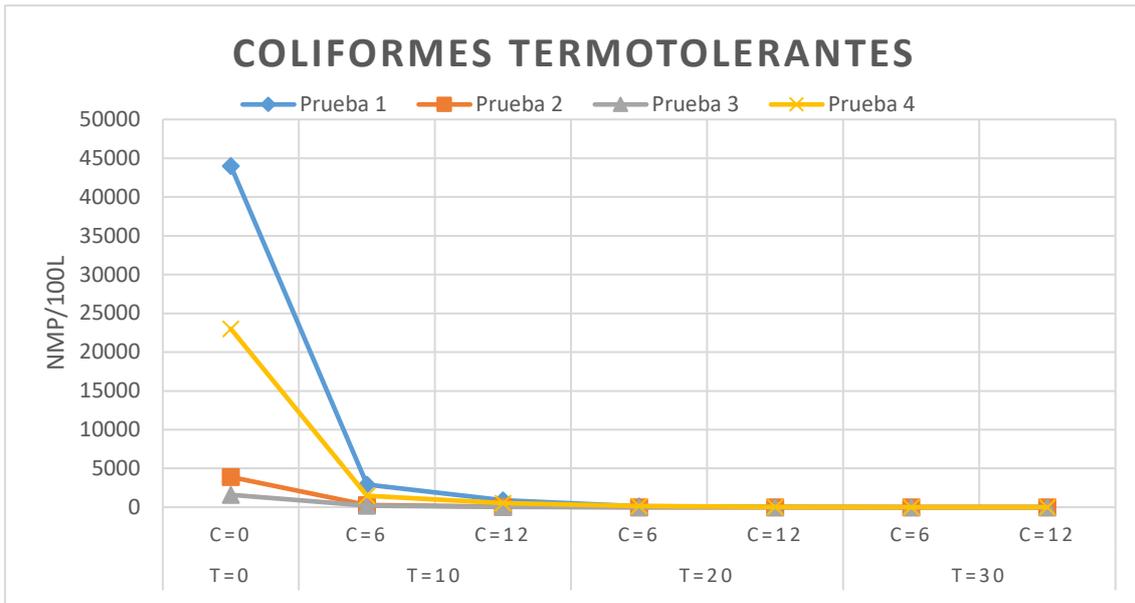


Figura 225.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para Coliformes Termotolerantes

En la Figura 26 se muestra el tiempo de aplicación y la intensidad de corriente para el pH disuelto, se puede apreciar que a partir de un tiempo de 20 min y a una corriente eléctrica de 6 A, se logra aumentar el pH.

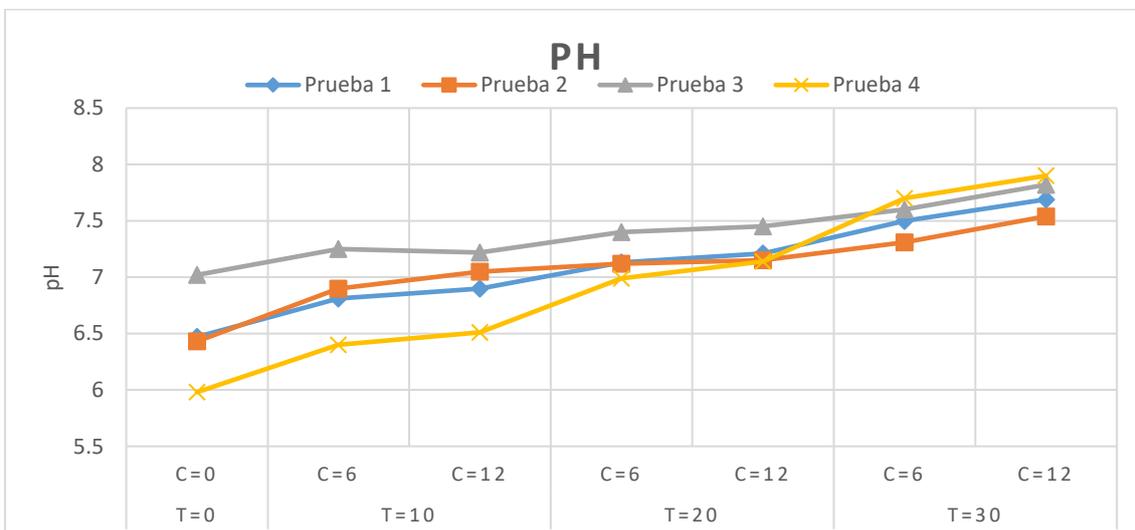


Figura 236.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para pH

En la Figura 27 se muestra el tiempo de aplicación y la intensidad de corriente para la conductividad, se puede apreciar que a partir de un tiempo de 20 min y a una corriente eléctrica de 6 A, se logra reducir significativamente la conductividad.

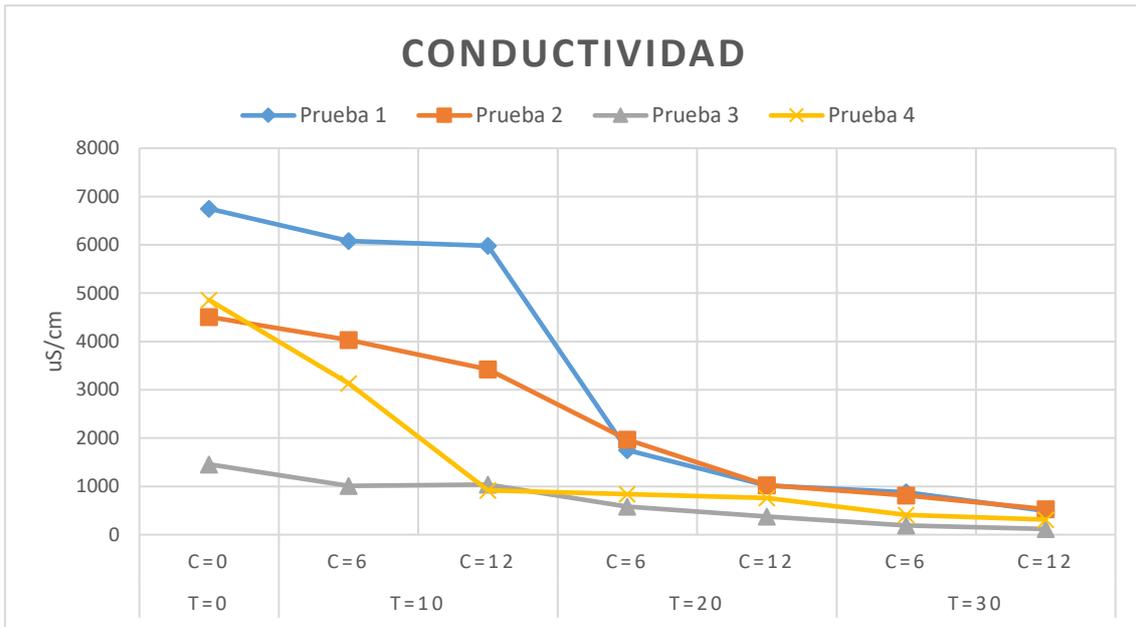


Figura 24.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para conductividad

En la Figura 28 se muestra el tiempo de aplicación y la intensidad de corriente para la temperatura, se puede apreciar que a partir de un tiempo de 20 min y a una corriente eléctrica de 6 A, se logra aumentar significativamente la temperatura.

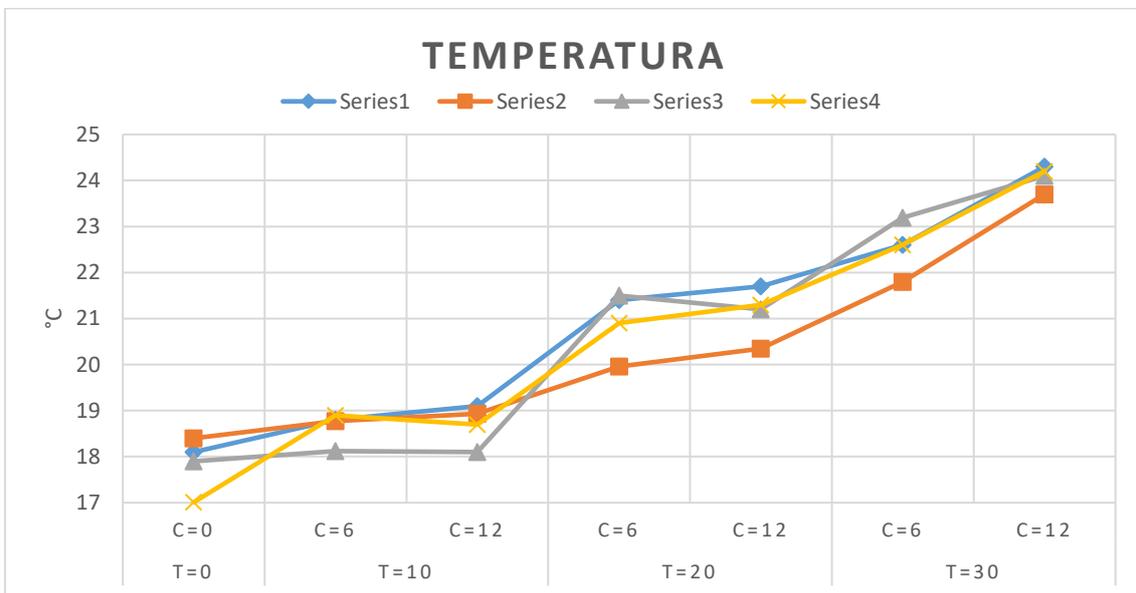


Figura 25.- Tiempo de aplicación e intensidad de corriente para Temperatura

5.2.3. Objetivo Específico N°3:

Determinar la eficiencia a partir del 80% de remoción de Coliformes Termotolerantes (CTT), Demanda Química de Oxígeno (DBO₅) y Metales Pesados (Arsénico, Cadmio, Hierro y Plomo) del tratamiento complementario de la electrocoagulación.

En la Figura 29 se muestra la EEC en remoción de arsénico, se puede apreciar que existe una remoción que se aproxima al 100%.

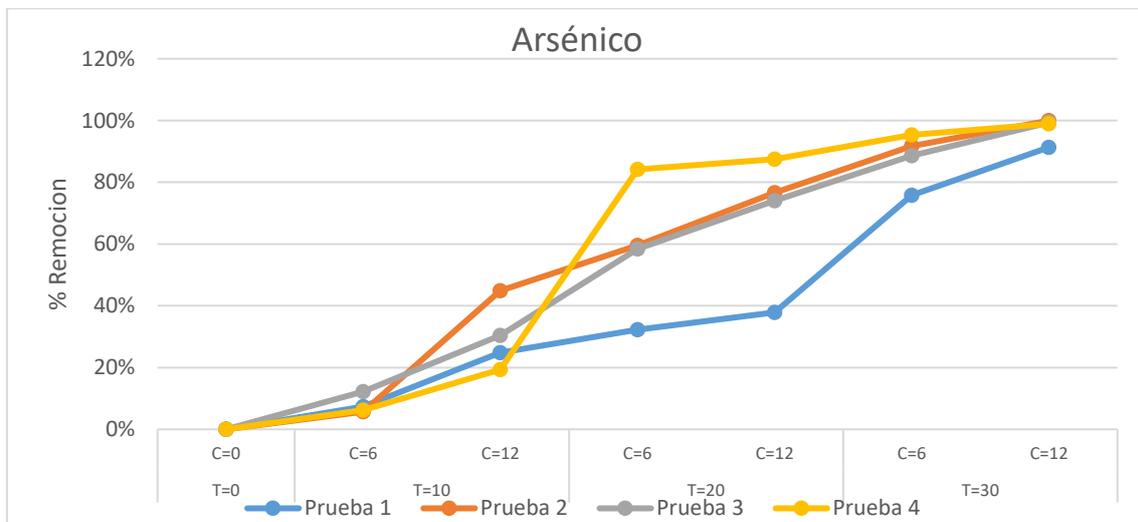


Figura 269.- Eficiencia de remoción de Arsénico

En la Figura 30 se muestra la EEC en la remoción de cadmio, se puede apreciar que existe una remoción que se aproxima al 100%.

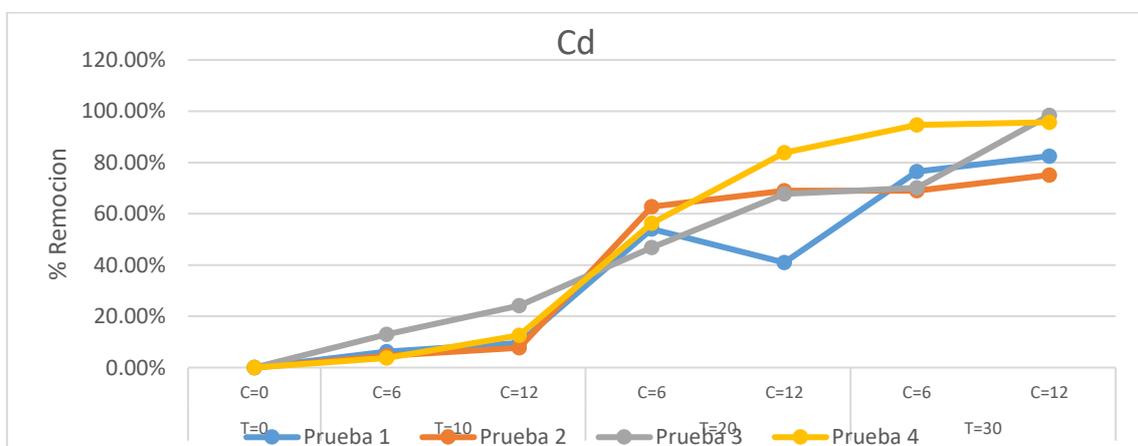


Figura 270.- Eficiencia de remoción de Cadmio

En la Figura 31 se muestra la EEC en la remoción de plomo, se puede apreciar que existe una remoción que se aproxima al 100%.

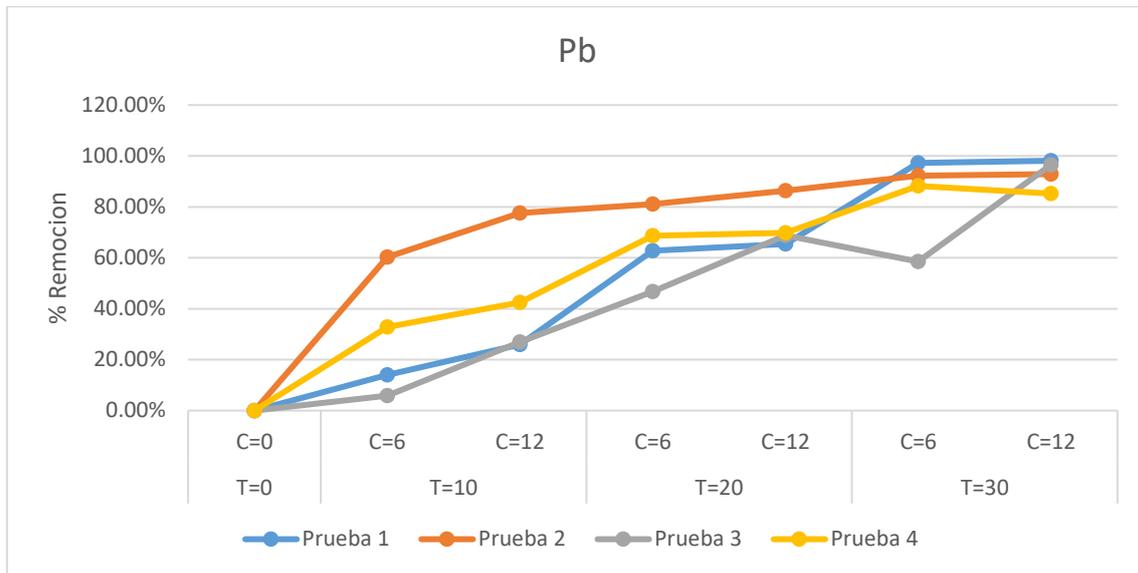


Figura 281.- Eficiencia de remoción de Plomo

En la Figura 32 se muestra la EEC en la remoción de hierro, se puede apreciar que existe una remoción que se aproxima al 90%.

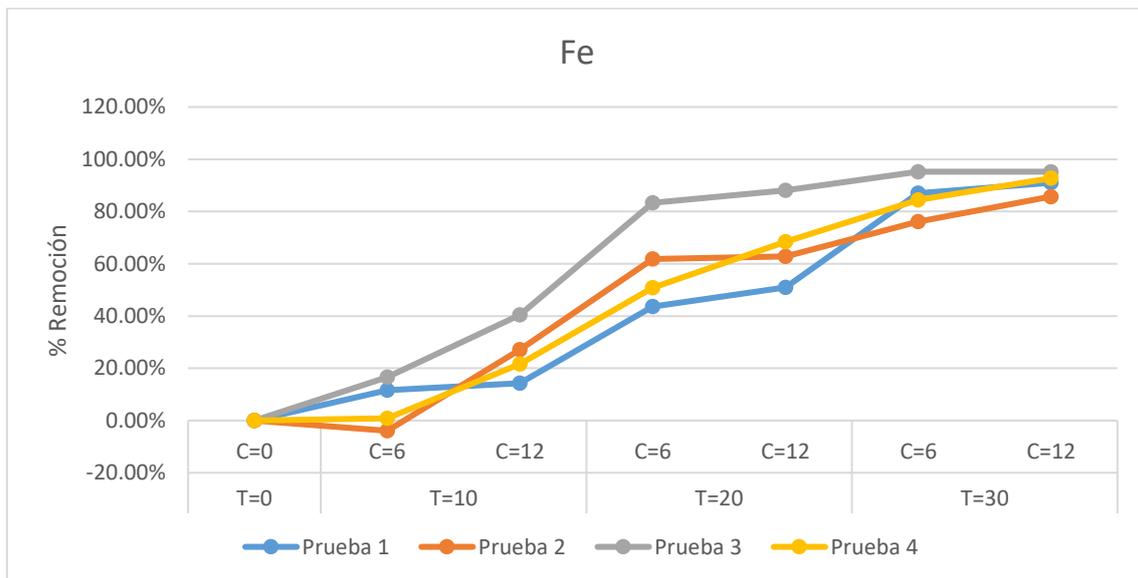


Figura 292. Eficiencia de remoción de Hierro

En la Figura 33 se muestra la EEC en la remoción de CTT, se puede apreciar que existe una remoción 99%, siendo así la electrocoagulación muy eficiente para la remoción de CTT.

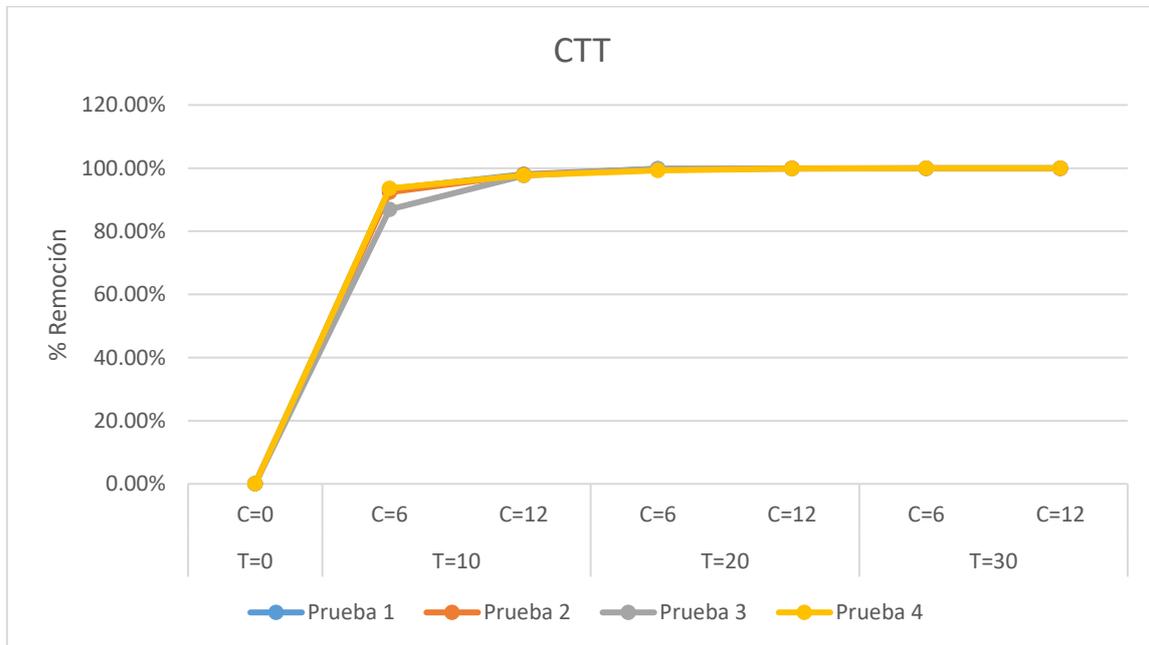


Figura 303.- Eficiencia de remoción de Coliformes Termotolerantes

En la Figura 34 se muestra la EEC en la remoción de DBO₅, se puede apreciar que existe una remoción promedio de 94.5%

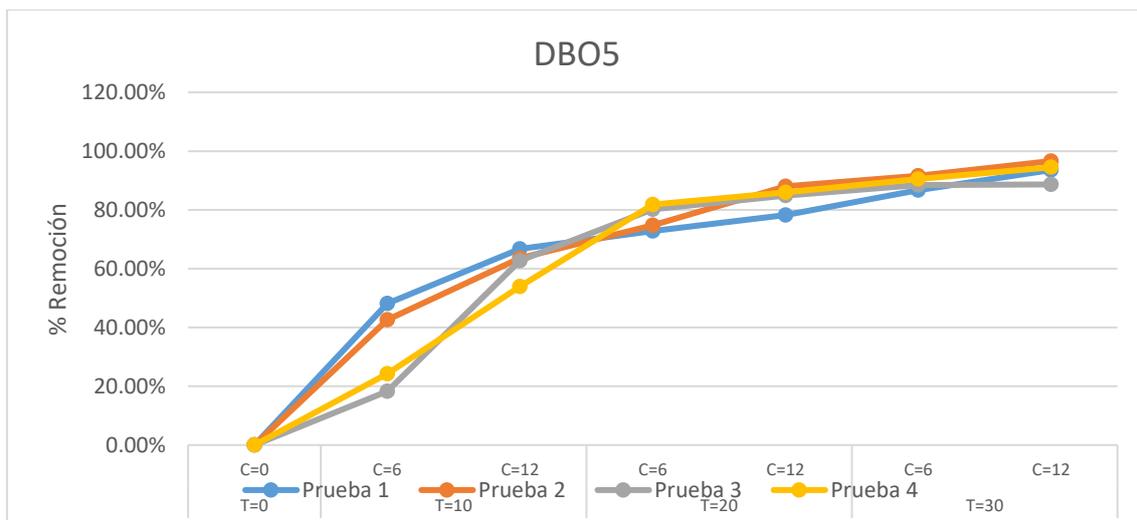


Figura 314.- Eficiencia de remoción de DBO₅

5.3. Contrastación de Hipótesis

La contrastación de hipótesis se realizó de manera descriptiva – deductiva teniendo en cuenta el nivel/alcance de la investigación. Se comparó para la hipótesis específica 1, los valores establecidos en el D.S. 004-2017-MINAM para la Categoría 3 Riego y Bebida Animal – Riego de Vegetales (en adelante, “Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales”) y la Categoría 4 Conservación del Ambiente Acuático – Ríos Costa y Sierra (en adelante, “Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra”), para la hipótesis específica 2, se dedujo de los resultados obtenidos para el objetivo específico 2, para la hipótesis específica 3, se dedujo de los porcentajes de eficiencias obtenidos para el objetivo específico 3.

5.3.1. *Hipótesis Específica N° 1*

El agua del río Surco no cumple con los estándares de calidad de ambiental de agua, sin embargo, después del tratamiento complementario de electrocoagulación sí cumplirá con la normativa legal vigente.

En la Tabla.- 22 se muestra los valores obtenidos para el arsénico comparando con los valores establecidos para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales y Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra; se puede apreciar que a partir del tratamiento 4, con un tiempo de aplicación de 20 min y corriente eléctrica de 12 A se logra cumplir con ambas categorías, tanto el valor establecido de 0.10 mg/L como el de 0.15 mg/L para arsénico, por lo que se acepta la hipótesis donde la calidad del río no cumple con los estándares de calidad para arsénico antes del tratamiento y sí cumple con los estándares de calidad después del tratamiento de EC.

Tabla 22.- Cumplimiento de Normativa de Arsénico según tratamiento

Tratamiento		As (mg/L)
Control	T=0 x C=0	0.25675
Tratamiento 1	T= 10 x C=6	0.233875
Tratamiento 2	T= 10 x C=12	0.180275
Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra		0.15
Tratamiento 3	T= 20 x C=6	0.102125
Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales		0.10
Tratamiento 4	T= 20 x C=12	0.07235
Tratamiento 5	T= 30 x C=6	0.02905
Tratamiento 6	T= 30 x C=12	0.004875

En la Tabla 23 se muestra los valores obtenidos para el cadmio comparando con los valores establecidos para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales y Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra; se puede apreciar que a partir del tratamiento 5 con un tiempo de 20 min y 6 V de corriente se cumple solo con la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales para el valor establecido de 0.010 mg/L. Sin embargo, con la Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra no se cumple con el parámetro establecido ni con el último tratamiento (30 min y corriente eléctrica de 12 A). Por lo tanto, se acepta la hipótesis de que no cumple con los estándares de calidad antes del tratamiento y se acepta la hipótesis de que cumplirá con los estándares de calidad después del tratamiento para para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales

Tabla 23.- Cumplimiento de Normativa de Cadmio según tratamiento

Tratamiento		Cd (mg/L)
Control	T=0 x C=0	0.0322
Tratamiento 1	T= 10 x C=6	0.03035
Tratamiento 2	T= 10 x C=12	0.0285
Tratamiento 3	T= 20 x C=6	0.0141
Tratamiento 4	T= 20 x C=12	0.011675
Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales		0.010
Tratamiento 5	T= 30 x C=6	0.006575
Tratamiento 6	T= 30 x C=12	0.004425
Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra		0.00025

En la Tabla 24 se muestra los valores obtenidos para el plomo comparando los valores establecidos para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales y Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra, se puede apreciar que a partir del tratamiento 1 con un tiempo de 10 min y 6 V de corriente se cumple solo con la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales para el valor establecido de 0.010 mg/L. Sin embargo, con la Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra no se cumple con el parámetro establecido ni con el último tratamiento de tiempo igual a 30 min y corriente eléctrica de 12 A y tampoco antes del tratamiento por lo que no se acepta la hipótesis de que no cumple con los estándares de calidad antes del tratamiento y se acepta la hipótesis de que cumplirá con los estándares de calidad después del tratamiento de EC para para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales.

Tabla 24.- Cumplimiento de Normativa de Plomo según tratamiento

Tratamiento		Pb (mg/L)
Control	T=0 x C=0	0.06345
Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales		0.050
Tratamiento 1	T= 10 x C=6	0.042375
Tratamiento 2	T= 10 x C=12	0.0338
Tratamiento 3	T= 20 x C=6	0.020125
Tratamiento 4	T= 20 x C=12	0.016975
Tratamiento 5	T= 30 x C=6	0.0077
Tratamiento 6	T= 30 x C=12	0.005475
Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra		0.025

En la Tabla 25 se muestra los valores obtenidos para el Hierro comparando con el valor establecido para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales, se puede apreciar que, desde el control, los valores del parámetro logran cumplir con el valor establecido de 5.0 mg/L para hierro, por lo que no se acepta la hipótesis donde la calidad del río no cumple con

los estándares de calidad para hierro antes del tratamiento y sí cumple con los estándares de calidad después del tratamiento de EC.

Tabla 25.- Cumplimiento de Normativa de Hierro según tratamiento

Tratamiento		Fe (mg/L)
Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales		5.0
Control	T=0 x C=0	0.727175
Tratamiento 1	T= 10 x C=6	0.693475
Tratamiento 2	T= 10 x C=12	0.58425
Tratamiento 3	T= 20 x C=6	0.366125
Tratamiento 4	T= 20 x C=12	0.27915
Tratamiento 5	T= 30 x C=6	0.1105
Tratamiento 6	T= 30 x C=12	0.080875

En la Tabla 26 se muestra los valores obtenidos para el DBO₅ comparando con los valores establecidos para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales y Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra, se puede apreciar que a partir del tratamiento 6 con un tiempo de aplicación de 30 min y corriente eléctrica de 12 A se logra cumplir con la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales de 15 mg/L para DBO₅. Por lo tanto, sí se acepta la hipótesis de que no se cumple con los estándares de calidad antes del tratamiento y sí cumple con los estándares de calidad después del tratamiento de EC para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales.

Tabla 26.- Cumplimiento de Normativa de DBO5 según tratamiento

Tratamiento		DBO ₅ (mg/L)
Control	T=0 x C=0	218.35
Tratamiento 1	T= 10 x C=6	132.45
Tratamiento 2	T= 10 x C=12	80.57
Tratamiento 3	T= 20 x C=6	53.04
Tratamiento 4	T= 20 x C=12	34.4
Tratamiento 5	T= 30 x C=6	22.77
Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales		15.0
Tratamiento 6	T= 30 x C=12	11.89
Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra		10.0

En la Tabla 27 se muestra los valores obtenidos para los coliformes termotolerantes comparando con los valores establecidos para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales y Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra, se puede apreciar que a partir del tratamiento 1 con un tiempo de aplicación de 10 min y corriente eléctrica de 6 A se logra cumplir con ambas categorías para el valor establecido de 2000 NMP/100mL para coliformes termotolerantes, por lo que se acepta la hipótesis donde la calidad del río no cumple con los estándares de calidad para coliformes termotolerantes antes del tratamiento y sí cumple con los estándares de calidad después del tratamiento de EC.

Tabla 27.- Cumplimiento de Normativa de Coliformes Termotolerantes según tratamiento

Tratamiento		Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)
Control	T=0 x C=0	18125
Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales/ Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra		2000
Tratamiento 1	T= 10 x C=6	1222
Tratamiento 2	T= 10 x C=12	376.75
Tratamiento 3	T= 20 x C=6	69.2
Tratamiento 4	T= 20 x C=12	22.15
Tratamiento 5	T= 30 x C=6	3.85
Tratamiento 6	T= 30 x C=12	<1.8

En la Tabla 28 se muestra los valores obtenidos para el oxígeno disuelto comparando con los valores establecidos para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales y Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra, se puede apreciar que a partir del tratamiento 1 con un tiempo de aplicación de 10 min y corriente eléctrica de 6 A se logra cumplir con ambas categorías para los valores establecido de mayor o igual a 4 y 5 mg/L de oxígeno disuelto, por lo que se acepta la hipótesis donde la calidad del río no cumple con los estándares de calidad para oxígeno disuelto antes del tratamiento y sí cumple con los estándares de calidad después del tratamiento de EC.

Tabla 28.- Cumplimiento de Normativa de Oxígeno Disuelto según tratamiento

Tratamiento		OD (mg/L)
Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra		>4.0
Control	T=0 x C=0	4.5775
Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales		>5.0
Tratamiento 1	T= 10 x C=6	6.255
Tratamiento 2	T= 10 x C=12	6.6
Tratamiento 3	T= 20 x C=6	7.8625
Tratamiento 4	T= 20 x C=12	8.335
Tratamiento 5	T= 30 x C=6	8.295
Tratamiento 6	T= 30 x C=12	8.8825

En la Tabla 29 se muestra los valores obtenidos para pH comparando los valores establecidos para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales y Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra, se puede apreciar que a partir del tratamiento 1 con un tiempo de aplicación de 10 minutos y corriente eléctrica de 6 A se logra cumplir con el valor establecido de pH de 6 y para el último tratamiento con un tiempo de aplicación de 30 min y corriente eléctrica de 12 A se cumple con los valores máximos de pH de 8.5 y 9, por lo que se acepta la hipótesis donde la calidad del río no cumple con los estándares de calidad para oxígeno disuelto antes del tratamiento y sí cumple con los estándares de calidad después del tratamiento de EC.

Tabla 29.- Cumplimiento de Normativa de pH según tratamiento

Tratamiento		pH
Control	T=0 x C=0	6.475
Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales/ Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra		6.5
Tratamiento 1	T= 10 x C=6	6.84
Tratamiento 2	T= 10 x C=12	6.92
Tratamiento 3	T= 20 x C=6	7.16
Tratamiento 4	T= 20 x C=12	7.2375
Tratamiento 5	T= 30 x C=6	7.5275
Tratamiento 6	T= 30 x C=12	7.7375
Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales		8.5
Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra		9.5

En la Tabla 30 se muestra los valores obtenidos para la conductividad comparando con los valores establecidos para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales y Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra, se puede apreciar que el control sí cumple con los valores establecidos por ambas categorías, por lo que no se acepta la hipótesis donde la calidad del río no cumple con los estándares de calidad de conductividad antes del tratamiento y sí se acepta la hipótesis donde sí cumple con los estándares de calidad después del tratamiento de EC.

Tabla 30.- Cumplimiento de Normativa de Conductividad según tratamiento

Tratamiento		Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales		2500
Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra		1000
Control	T=0 x C=0	439.4
Tratamiento 1	T= 10 x C=6	356.3
Tratamiento 2	T= 10 x C=12	284.08
Tratamiento 3	T= 20 x C=6	128.5
Tratamiento 4	T= 20 x C=12	795.5
Tratamiento 5	T= 30 x C=6	57.3
Tratamiento 6	T= 30 x C=12	36.33

En la Tabla 31 se muestra los valores obtenidos para la Temperatura comparando los valores establecidos para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales y Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra, se puede apreciar que todos los tratamientos y el de control cumplen con la diferencia de 3 °C de temperatura. Por lo que, no se acepta la hipótesis de que no cumple con los estándares antes del tratamiento ya que no hay variación de T°. Se acepta la hipótesis de que cumple con los estándares después del tratamiento de EC hasta el tratamiento 2, porque el resto si existe una variación de T° significativa.

Tabla 31.- Cumplimiento de Normativa de Temperatura según tratamiento

Tratamiento		T° (ΔC°)	T° (C°)
Control	T=0 x C=0	0	17.8525
Tratamiento 1	T= 10 x C=6	1.89	18.6475
Tratamiento 2	T= 10 x C=12	1.69	18.7075
Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales/ Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra		$\Delta 3^{\circ}$	
Tratamiento 3	T= 20 x C=6	3.89	20.94
Tratamiento 4	T= 20 x C=12	4.29	21.1375
Tratamiento 5	T= 30 x C=6	5.59	22.5475
Tratamiento 6	T= 30 x C=12	7.19	24.075

5.3.2. Hipótesis Específica N° 2

La intensidad de corriente (amperaje) y el tiempo de aplicación tendrá influencia directa proporcional en relación a la eficiencia del tratamiento complementario de electrocoagulación.

Como se puede observar desde la Figura 12 a la Figura 19, el tiempo de aplicación del tratamiento complementario de electrocoagulación y la intensidad de corriente sí tiene influencia directamente proporcional en los parámetros analizados en la presente investigación, donde la eficiencia del tratamiento incrementa a medida que se incrementa estos factores; por lo que se acepta la hipótesis específica 2.

5.3.3. Hipótesis Específica N° 3

La eficiencia de remoción de Coliformes Termotolerantes (CTT), Demanda Química de Oxígeno (DBO_5), y Metales Pesados (Arsénico, Cadmio, Hierro y Plomo) del tratamiento complementario de la electrocoagulación será mayor al 80%.

En la Tabla 32 se muestra la eficiencia para la remoción de coliformes termotolerantes, se aprecia que a partir del tratamiento complementario de la electrocoagulación se consigue una eficiencia mayor al 80%, por lo que se acepta la hipótesis específica 3.

Tabla 32.- Eficiencia de remoción de Coliformes Termotolerantes

Tratamiento	Tiempo	Corriente	CTT
Control	T=0	C=0	0.00%
Eficiencia			80%
Tratamiento 1	T=10	C=6	91.55%
Tratamiento 2		C=12	97.85%
Tratamiento 3	T=20	C=6	99.64%
Tratamiento 4		C=12	99.90%
Tratamiento 5	T=30	C=6	99.95%
Tratamiento 6		C=12	99.96%

En la Tabla 33 se muestra la eficiencia para la remoción de DBO₅, se aprecia que a partir del tratamiento con tiempo de aplicación de 20 min y corriente eléctrica de 12 A se consigue una eficiencia mayor al 80%, por lo que se acepta la hipótesis específica 3.

Tabla 33.- Eficiencia de remoción de DBO₅

Tratamiento	Tiempo	Corriente	DBO ₅
Control	T=0	C=0	0.00%
Tratamiento 1	T=10	C=6	33.34%
Tratamiento 2		C=12	61.74%
Tratamiento 3	T=20	C=6	77.41%
Eficiencia			80%
Tratamiento 4	T=20	C=12	84.25%
Tratamiento 5	T=30	C=6	89.57%
Tratamiento 6		C=12	94.55%

En la Tabla 34 se muestra la eficiencia para la remoción de metales pesados, se aprecia que a partir del tratamiento con tiempo de aplicación de 30 min y corriente eléctrica de 6 A se consigue una eficiencia mayor al 80% para los metales pesados Arsénico, Plomo y Hierro; y para el tratamiento 6 con un tiempo de aplicación de 30 min y corriente eléctrica de 12 A, se consigue una eficiencia mayor al 80% para el Cadmio, por lo que se acepta la hipótesis específica 3.

Tabla 34.- Eficiencia de remoción de Metales pesados

Tratamiento	Tiempo	Corriente	As	Cd	Pb	Fe
Control	T=0	C=0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Tratamiento 1	T=10	C=6	8.91%	5.75%	33.22%	4.61%
Tratamiento 2		C=12	29.79%	11.49%	46.73%	19.66%
Tratamiento 3	T=20	C=6	60.22%	56.21%	68.28%	49.64%
Tratamiento 4		C=12	71.82%	63.74%	73.25%	67.58%
Eficiencia			80%		80%	80%
Tratamiento 5	T=30	C=6	88.69%	79.58%	87.88%	84.80%
Eficiencia				80%		
Tratamiento 6	T=30	C=12	98.10%	86.26%	91.37%	88.88%

Fuente: Elaboración propia

5.3.4. Hipótesis General

El tratamiento complementario de electrocoagulación será adecuado para trabajar como un tratamiento complementario y/o adicional en la planta de tratamiento de San Borja, siendo eficiente para cumplir con los estándares de calidad ambiental requeridos.

Habiendo comprobado las hipótesis específicas en la sección de resultados, se puede aceptar la hipótesis general de que el tratamiento complementario de electrocoagulación será adecuado para ser implementado en la PTSB y cumplirá con los estándares requeridos.

VI. DISCUSIÓN

El agua del río Surco que transcurre por el distrito de San Borja presenta contaminación y niveles de excedencia comparados con la normativa vigente del Estándar de Calidad Ambiental correspondiente al D.S. N° 004-2017- MINAM en la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales y la Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra; para los parámetros de pH, OD, DBO₅, CTT y MT (As, Cd y Pb). El agua evaluada antes de los tratamientos de EC resultó ligeramente ácida, el OD se encontró por debajo de los 5 mg/L, mientras que los parámetros de DBO₅ y los CTT arrojaron concentraciones elevadas, ello debido a los residuos sólidos que son arrojados al río, tales como plásticos, envolturas, papel, cartón, partes de automóviles, empaques de alimentos, entre otros. La contaminación del agua del río Surco también se debe al vertimiento de agua domésticas no autorizadas que, de acuerdo con lo mencionado por el autor Hashim et al. (2019), el crecimiento de la población de forma desordenada en las ciudades provoca millones de litros de agua contaminada por agua residual. Asimismo, los resultados de los metales evaluados en el agua antes del tratamiento de EC, en su mayoría, también se encontraron en concentraciones elevadas excediendo los niveles exigidos por la normativa peruana. Sin embargo, a ello se le puede atribuir que, existen vertimientos industriales no autorizados que provocan contaminación estacional o continua al río. De acuerdo con el autor Meoño et al. (2015) las descargas de efluentes de todo tipo, vertimiento de residuos y el incremento del urbanismo; representan una de las causas recurrentes en el incremento de microorganismos patógenos, así como el incremento de las concentraciones de metales pesados y otros elementos contaminantes que disminuyen

la calidad del agua superficial, sobre todo de ríos y cuerpos de agua que se encuentran en zonas urbanas. Cabe precisar que, de acuerdo con el Ministerio del Ambiente (MINEM), un cuerpo de agua contaminado, como un río o quebrada, se define como la alteración de sus características naturales, presentan agentes físicos, químicos o microbiológicos que se encuentran en concentraciones elevadas o nocivas para los humanos y el ambiente. Por ello, la restauración de los ríos urbanos contaminados por efectos relacionados a vertimientos domésticos e industriales, es de gran interés nacional y mundial; ya que, en concordancia con lo mencionado por los autores Chezeau et al. (2019), aun cuando se estén implementando sistemas, procedimientos y tratamientos para la recuperación ecológica de estas aguas superficiales; se debe seguir impulsando la eficiencia e innovación de los procesos de recuperación de agua dulce en el Perú (Bueno, 2021).

El tratamiento de EC fue utilizado para la recuperación y tratamiento de las aguas del río Surco debido a que este método recientemente ha comenzado a ganar popularidad como una alternativa prometedora, eficiente y económica concordando con los autores Kuokkanen (2016) y Hashim et al. (2019). Al igual que también cumple con los requerimientos de la PTSB, es decir, económico, fácil, práctico de operar y no requiere de adición de aditivos, y lo último, pero no menos importante, también sería un tratamiento físico-químico al igual que la planta ya existente, que puede cumplir como tratamiento complementario para incrementar la capacidad de agua tratada por día. Cabe mencionar que el tratamiento de electrocoagulación cumple con la remoción de los contaminantes presentes en estas aguas. Consecuentemente, en conformidad con Bueno (2021) y Aguilar (2015); una vez obtenida la caracterización de agua a tratar, esta debe ser evaluada y caracterizada para posteriormente diseñar un sistema de

tratamiento que cumpla con los requerimientos necesarios para remover o neutralizar aquellos parámetros que exceden los ECA Agua (2017).

El diseño del reactor para la aplicación del tratamiento de EC fue de tipo *batch*, que significa que el tratamiento se realizará por lotes, el agua que ingresa se trata y luego se retira al 100%. Así mismo, los electrodos (Al y Fe) fueron laminares y fueron ubicados de forma paralela e intercala. Se tomó este diseño siguiendo el modelo de autores como Arango y Garces (2007), Dubraski et al. (2013), Kahled et al. (2015), Aguilar (2015), Chezeau et al. (2019), entre otros. Ello debido a la simplicidad de la construcción, la instalación y operación de la celda de EC. Acorde con los autores Tamani (2017), Hashim et al. (2019) y Tahreen et al. (2020); el diseño del reactor tipo *batch* utilizado, permite la aplicación de tratamiento a diversas escalas, ellas pueden ser a nivel laboratorio, plantas piloto y también a nivel operaciones en plantas reales de tratamiento continuo de aguas residuales, contaminadas o aguas para potabilización (Hashim et al., 2017). Sin embargo, existen otros diseños de operación para tratar AR con reacciones electroquímicas, las cuales básicamente dependen de factores como: el material, diseño, distancia y ubicación de los electrodos, corriente aplicada, tiempo, pH inicial, temperatura inicial, conductividad inicial, oxígeno disuelto inicial, conexiones eléctricas, área de contacto, concentración inicial de los contaminantes y volumen de agua a tratar (Koby et al., 2020). Ello también concuerda con lo mencionado por Nasrullah et al. (2017) en su investigación, donde se evalúan todos los factores que intervengan en la operación del tratamiento, enfocándose en el área de contacto de electrodo (a mayor área menor tiempo aplicación).

Los materiales de los electrodos utilizados para el reactor de EC a escala piloto fueron los siguientes: a) el ánodo fue de aluminio y b) el cátodo fue de hierro (Arboleda, 2015; Kobya et al., 2017; Chezeau et al., 2019; y Hashim et al., 2017). Autores como Aguilar (2015) y Tamani (2017) señalan que el material del electrodo también puede ser de fibras de carbón, grafito, níquel, acero galvanizado, platino y titanio. Sin embargo, de acuerdo con la investigación de Chow y Pham (2021), uno de los principales en los procesos de tratamiento de la electrocoagulación es cuando el electrodo se cubre con una capa de material oxidado que impide la producción del su coagulante metálico, aumentando la resistencia óhmica, el tiempo de aplicación del tratamiento y reduciendo la eficiencia de cualquier tipo o material del electrodo. Dicho esto, es importante recalcar que los electrodos deben ser lavados cada cierto tiempo porque se genera una capa rojiza de material oxidado que debe ser removida para el correcto funcionamiento del tratamiento. Por otra parte, el autor Safwat (2020) utilizó electrodos de titanio y zinc, los cuales alcanzaron resultados altamente eficientes. Tamani (2017) en su investigación utilizó electrodos de aluminio y hierro galvanizado aplicando 2 A durante 30 min logró obtener un 86% DBO₅ y en coliformes totales el 100%. El material para los electrodos más adecuado para la EC dependerá de su la accesibilidad, precio y resistencia a la oxidación (tiempo de durabilidad). No obstante, Hussin et, al. (2017) afirma que los electrodos de material zinc, son más eficientes económicos y permiten optimizar el tiempo del tratamiento de electrocoagulación utilizando menor energía eléctrica y menor tiempo.

Dentro de los principales factores que influenciaron la eficiencia de la electrocoagulación en los tratamientos aplicados (10, 20 y 30 min), se encuentra el tiempo de aplicación encabezando la lista, ello debido a que conforme se aumentaba al

tiempo de aplicación la eficiencia de remoción aumentaba notoriamente. Sin embargo, de acuerdo con lo mencionado por Kobya (2020), a mayor tiempo de aplicación del tratamiento se incrementará el costo de operación porque aumentaría el consumo de energía por hora (Kwh). Dentro de este marco, es importante optimizar el tiempo de y la corriente de acuerdo con la concentración de los contaminantes presentes en el agua a tratar, así como la capacidad del reactor y sus características iniciales antes de la operación (Bayramoglu et al., 2007; Hussin et al., 2017 y Khan et al., 2020).

La intensidad de corriente aplicada para cada tratamiento fue un factor que influyó en la eficiencia del tratamiento, porque para los tratamientos 2, 4 y 6 que utilizaron 12 A se obtuvo una eficiencia promedio mayor a los tratamientos que usaron 6 A. Acorde a lo mencionado en otras investigaciones, a medida que se incrementa la intensidad de corriente, el efecto resulta en un incremento en el porcentaje de remoción de los parámetros evaluados (Hussin et al., 2017; Chezeau et al., 2019 y Hashim et al., 2019), es por ello que la intensidad y potencia de la corriente es la que va a determinar la velocidad y la cantidad de reacciones electroquímicas que ocurrirán en un tiempo determinado. Sin embargo, el consumo de energía eléctrica debe optimizarse, es decir limitar los recursos y el uso de la corriente a niveles viables, que permitan un tiempo de aplicación del tratamiento de EC adecuado para alcanzar los resultados demandados (Sadiqi et al., 2021).

El comportamiento del pH y la temperatura tienen una relación directamente proporcional con el tiempo y la corriente, a mayor tiempo y más amperaje aplicado para el tratamiento de la electrocoagulación; el pH se incrementó al igual que la temperatura. Como se observa en los resultados los tratamientos con mayor tiempo de aplicación

fueron el 5 y 6, los cuales presentaron un incremento de temperatura promedio de 26.44% y 34.99% respectivamente. El aumento de la temperatura es producto de la agitación cinética de las partículas que colisionan entre sí, y dan paso al intercambio iónico; por ello, de acuerdo con Khaled (2015), el aumento de la temperatura es sustancial para obtener una mejor absorción de contaminantes por los hidróxidos metálicos liberados, también produce una mayor producción de burbujas de hidrógeno que permiten una mayor rapidez para la flotación de los conglomerados. En cuanto al pH, en el tratamiento 6, este se incrementó hasta en un 19.91%. Ello quiere decir que, los resultados obtenidos cumplen con lo indicado por Brayramoglu et, al. (2007) y Khaled (2015), mientras más elevada sea la densidad de corriente eléctrica y mayor la aplicación de tiempo del tratamiento de electrocoagulación el pH va a tender a incrementarse debido a la producción y consumo de iones OH^- durante la aplicación de la electrocoagulación.

De acuerdo con los autores Arango (2005) y Restrepo et, al. (2006), el pH es un factor que influencia la eficiencia de remoción de la electrocoagulación, cuando el agua presenta pH ácidos entre 4 a 7, el comportamiento del pH tiende a incrementarse por la reacción de liberación de moléculas de hidrógeno en el electrodo de reducción (cátodo) que permite la formación de OH^- . Por el otro lado, autores como Zongo et, al. (2009) mencionan que cuando el agua a tratar presenta características como pH básicos entre 9 a 12, ocurre lo contrario, el pH tiende a disminuir. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones concuerdan que aguas con pH neutros o ligeramente ácidos obtienen mayores porcentajes de eficiencia (Arango, 2005; Tamani, 2017; Hashim et al., 2019; Darban et al., 2020).

Los resultados respecto a la reducción del parámetro de coliformes termotolerantes, también conocidos como coliformes fecales revelaron que la inyección de corriente eléctrica al agua sirve como desinfectante (Tamani, 2017). A partir del tratamiento 3, con 20 min de aplicación y 6 A de IC se comienzan a obtener resultados por encima del 99%. Conforme fue aumentando la corriente y el tiempo de aplicación, siguió incrementándose el porcentaje de remoción hasta alcanzar el 100% de eliminación de CTT en el tratamiento 6 una de las pruebas y en promedio un 99.99%. Desde el tratamiento 1, bajo 10 minutos de aplicación y 6 A de corriente; se observa ya el efecto significativo de la electrocoagulación sobre los coliformes fecales. De acuerdo con Tamani (2017), a pesar que el tiempo es el que ejerce mayor influencia sobre este parámetro, la corriente tiene un papel muy importante en la eficiencia de la electrocoagulación, sin embargo, en el caso de su experimentación, el autor utilizó intensidades de corriente menores como 1A, 1.5A y 2A durante 5, 15 y 30 min, en los que el 30 min obtuvo el mayor porcentaje de eficiencia relacionado a este parámetro. De acuerdo con la investigación de Ghermaout et al. (2008), solo requeriría de 30 min de aplicaciones de la electrocoagulación para la eliminación total del *Escherichia coli* con electrodos de aluminio, mientras que Hashim et al. (2019) menciona que obtuvo una remoción completa de estos organismos a las 8 h de aplicación bajo 0.8 de voltaje utilizando electrodos de titanio y aluminio.

La eficiencia de remoción del parámetro DBO_5 resultó mayor cuando la corriente aplicada fue de 12 A durante 10, 20 y 30 min (Tratamiento 2, 4 y 6), alcanzaron el 63.1%, 84.25% y 94.55% de eficiencia. El factor principal que influyó en la reducción de este parámetro fue la corriente (amperaje), puesto que los resultados aplicando 6 A en los mismos tiempos de aplicación de 10, 20 y 30 min en comparación fueron menores

alcanzando 39.34 %, 75.71% y 89.57%, respectivamente. Sin embargo, es importante recalcar que el tiempo también jugó un papel importante. Resultados muy similares se obtuvieron en la investigación de Macedo y Zavala (2021), quienes en un reactor de 40L a 12 y 24 V, obtuvieron 94% de remoción de DBO_5 con un tiempo de EC de 40 y 60 minutos, utilizando 6 electrodos de aluminio y cobre. También encontramos el caso de Lesseouded, Baameur y Tabchouche (2021) quienes alcanzaron un 92.3% de reducción de DBO_5 aplicando la EC con una corriente de 1.2 A por 75 min en un reactor de 3L. Autores como Tamani (2017) utilizaron 5 electrodos de acero galvanizado y 5 de aluminio, consiguiendo una reducción de 86% para el DBO_5 , en 30 minutos y 2 A de IC en un reactor de capacidad de 3 L. En el caso de Arango (2015), logró alcanzar hasta un 78.89% de eficiencia en la eliminación de DBO_5 durante 20 min y un flujo eléctrico de 32.72 A/m^2 utilizando un reactor de 3.5 L de capacidad y 4 electrodos de acero y 4 de aluminio. En definitiva, podemos decir que la corriente y el tiempo de aplicación son factores que tienen una fuerte influencia sobre el porcentaje de eficiencia; donde a mayor tiempo de exposición y una mayor corriente, se puede optimizar el tratamiento de EC.

La aplicación del método de electrocoagulación para la remoción de metales pesados ha provocado un incrementado significativo de interés a nivel mundial en los últimos años, ello debido a los resultados que arroja en su mayoría se encuentran entre el 90 y 100% de eficiencia (Kabya et al., 2015; Chezeau et al., 2019; Hashim et al., 2019).

El porcentaje de remoción del arsénico alcanzó los mejores resultados durante 30 min de aplicación de la electrocoagulación en los tratamientos 5 y 6, resultando 87.88% y 97.38% respectivamente. La diferencia entre el tratamiento 5 y el tratamiento 6, fue la EC aplicada, siendo esta 6 A y 12 A respectivamente. De acuerdo con Khan et al. (2020),

en su investigación alcanzó un 95% de eficiencia de remoción aplicando 0.46 A en un medio de pH neutral. Mientras por el otro lado, resultados de la investigación de Kobya et al (2020) alcanzo un rango de eficiencia ente 75% y 99.9% utilizando electrodos de aluminio y hierro, durante 1 a 30 min con una corriente de 0.075, 0.15 y 0.3 A, en un reactor de 1 L de capacidad. De acuerdo con Bouguerra et al. (2015), la remoción del arsénico aplicando electrocoagulación se encuentran altamente influenciada por los parámetros operacionales aplicados durante el tratamiento como la densidad de corriente, el material, forma y ubicación de los electrodos, así como también el pH inicial, el tiempo de aplicación y la temperatura.

La concentración de plomo en el agua tratada del río Surco consiguió hasta un 91.18% de remoción cuando se aplicó 12 A de corriente durante 30 min (tratamiento 6), alrededor de un 10% (84.06% de eficiencia de remoción de Pb) más comparado con el tratamiento 5 que se aplicó 6 A durante el mismo periodo de tiempo. Por otra parte, para las aguas del río Coata en Puno, los autores Vilca et al. (2021) obtuvieron porcentajes de remoción entre 53% y 86 % utilizando un reactor de electrocoagulación de flujo continuo con una IC 0.8 A y un voltaje de 50 Vdc durante 18 y 35 min utilizando electrodos de hierro y aluminio, considerando sus resultados satisfactorios. De acuerdo con el estudio de investigación de Hussin et al. (2017), cuando las concentraciones de plomo en cuerpos de agua son elevadas se debe a la presencia de pilas, baterías, residuos metálicos de casas o automóviles, plásticos u otros, que son arrojados a ríos, lagos, lagunas, mares y océanos. Asimismo, Hussin et al. (2017) menciona que se la aplicación de electrodos de Zinc para la aplicación de electrocoagulación fotovoltaica (energía solar) obtienen mejorar resultados de eficiencia para la remoción de plomo en aguas, tiene costo menor, optimiza la energía y el tiempo de aplicación del tratamiento

y es más sustentable; porque obtuvieron el 99.9% de eficiencia aplicando una densidad de corriente de 1.13 mA/cm² durante 10 min con electrodos de zinc.

El parámetro de cadmio obtuvo una eficiencia de remoción de 90% a los 30 min de tratamiento bajo 12 A (tratamiento 6). El incremento de la corriente eléctrica aseguró una mejor disolución del ánodo (aluminio), el cual permitió un aumento de remoción del cadmio en relación a tratamiento 5 (6 A) en el mismo tiempo de aplicación de la electrocoagulación, alcanzando 77.56% de eficiencia. En la investigación de los autores Khaled et al (2015), menciona haber obtenido una eficiencia de remoción de 100% los 5 minutos de aplicación bajo 1.6 KWh/m³, sin embargo, el resto de los contaminantes no fueron removidos con la misma eficiencia que el cadmio. Otros autores como Castro et al. (2018) alcanzaron un 99.99% de remoción de cadmio durante 40 min de aplicación de la electrocoagulación y una densidad de corriente de 3mA/cm², demostrando que el proceso puede consumir poca energía y ser igual de eficiente. No obstante, ambas investigaciones realizaron sus pruebas en escalas a nivel laboratorio con no más de 3 L de tratamiento de agua.

En cuanto a los resultados del parámetro hierro para los tratamientos donde se aplicó 12 A de corriente durante 10, 20 y 30 min, se logró conseguir una eficiencia promedio de 19.65%, 61.61% y 91.50%, respectivamente, en comparación con los resultados de los tratamientos donde se aplicó 6 A durante los mismos tiempos, se obtuvieron resultados de 4.63 %, 49.65% y 84.76%, respectivamente. Con ello podemos decir que la influencia de remoción del plomo se encuentra directamente atribuida a la aplicación del tiempo y la densidad de corriente en los tratamientos. De acuerdo con los autores Abdulhadi et al. (2020), sus resultados revelan que lograron alcanzar el 99.9% de

eficiencia en la remoción de plomo aplicando 3 mA/cm^2 de densidad de corriente durante 50 min a un costo de aplicación bajo. Asimismo, es importante mencionar que, el hierro es uno de los metales pesados más comunes de encontrar en las aguas superficiales por descargas de ARI y que en altas concentraciones representa un riesgo a la salud y al ambiente.

Con respecto al porcentaje de eficiencia para la mejora de la concentración oxígeno disuelto presente en el agua del río Surco obtuvo buenos resultados, logrando un incremento de 82.09 % y 94.05% con respecto a su valor inicial, en los tratamientos 4 y 6 respectivamente, bajo 12 A de corriente, durante 20 y 30 min de aplicación respectivamente; mientras que para los tratamientos 3 y 5 aplicando los mismos tiempos, pero 6 A, se obtuvo menor eficiencia siendo 71.76% y 81.21%, respectivamente, resultando ser la corriente el principal factor que para el incremento de concentración de este parámetro debido a la liberación de H_2 y OH^- producto de las reacciones iónicas de los electrodos y el burbujeo generado permiten que se disuelva el oxígeno en el agua tratada. Sin embargo, autores como Li et al. (2018) y Xu et al. (2019) prefieren limitar la concentración del OD inicial a valores entre 1.0 a 1.8 mg/L para evitar la oxidación anticipada de los metales como el hierro y aluminio (electrodos).

Finalmente, la eficiencia de remoción para los seis (06) tratamientos fue gradual, conforme se aumentaba el tiempo de aplicación y la corriente, la eficiencia incrementaba. Cabe precisar, que la eficiencia del tratamiento no solo radica en la remoción y mejora de los parámetros evaluados, sino que también autores como Tamani (2017), Hashim et al. (2019), Abdulhadi et al. (2020) y Khan et al. (2020) indican que el método de EC no origina contaminantes secundarios, no requiere de la adición

de aditivos coagulante o floculantes, por lo que el lodo que se genera es 50% menor en comparación a procesos tradicionales.

En resumen, la electrocoagulación en definitiva es un tratamiento altamente eficiente para la eliminación de microorganismos como coliformes termotolerantes, así como también para la reducción de la demanda química de oxígeno y la remoción de metales pesados como As, Cd, Pb y Fe. Vinculado a esto se encuentran los factores de operación principalmente el tiempo y la corriente, es por esta razón que en la mayoría los resultados de los parámetros evaluados muestran porcentajes de eficiencia superiores al 80% a partir del tratamiento 5 (12 A durante 30 minutos). Los parámetros *in situ* como pH y Temperatura se incrementaron conforme incrementaba el tiempo y la corriente. Para el caso del OD, también incrementó gracias a liberación de moléculas de hidrógeno y OH⁻ que permitieron la disolución del oxígeno en el agua tratada. Otro parámetro *in situ* fue la conductividad que también se redujo de 439.4 hasta 36.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (91.6% menos). Los resultados totales obtenidos por el laboratorio y los registrados en las cadenas de custodia se encuentran adjuntos en los anexos 4, 5 y 6, así como los porcentajes de eficiencia y fotografías durante la investigación y experimentación (anexo 7).

VII. CONCLUSIONES

El objeto del presente estudio fue la evaluación de la eficiencia de la electrocoagulación como tratamiento complementario para las aguas del río Surco en la planta de tratamiento de San Borja, en el que se evidenció que el tratamiento sí cumple con los ECA Agua (2017) de conservación del ambiente acuático y el riego de vegetales, siendo una opción altamente eficiente para ser implementado e incrementar el volumen de tratamiento de la PTSB. El tratamiento se basó en la construcción de una celda tipo *batch* de capacidad 30 L (0.5% de la PTSB), la instalación de 20 electrodos, 10 de aluminio y 10 de hierro conectados a una fuente de poder de hasta 32 V de salida y hasta 12 A, durante un tiempo de aplicación de 10 a 30 min.

El agua del río Surco presentaba niveles de excedencia antes del tratamiento ya que no cumplía con valores indicados en los ECA Agua (2017) para la Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales y Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra ; resultando ser un agua ligeramente ácida (6.49) y el OD ligeramente bajo (4.58 mg/L), con presencia de metales pesados como arsénico (0.257 mg/L), cadmio (0.0322 mg/L), hierro (0.727 mg/L) y plomo (0.0635 mg/L) en concentraciones elevadas, al igual que el DBO₅ (218.35 mg/L) y los CTT (18.125 x 10³ NMP/100mL) a una temperatura de 17.85 °C y conductividad 439.4 μS/cm, en promedio. Sin embargo, los resultados muestran que después de aplicar la EC, se llegaron a reducir la concentración de los parámetros excedentes y a mejorar aquellos que no cumplían con la normativa ambiental vigente.

Los resultados obtenidos permitieron determinar aquellos factores que influyen en la eficiencia de EC, los cuales principalmente fueron el tiempo de aplicación del tratamiento y corriente introducida al sistema de tratamiento de la celda de EC. Según

los gráficos presentados en el capítulo de resultados, se observó que a medida que se incrementaba el tiempo y la corriente, la concentración de los parámetros disminuyó y el porcentaje de remoción incrementó. Asimismo, para aquellos parámetros que incrementan sus valores como el pH, OD y T°, se determinó que la agitación de las moléculas, la liberación de moléculas de hidrógeno, la formación de burbujas, y el intercambio iónico son los responsables de estos cambios. Sin embargo, es importante limitar el consumo energético y los recursos, optimizando y regulando los factores que influyan en optimizar el tratamiento de EC.

La experimentación y aplicación de la EC demostró tener un resultado óptimo para ser implementado como un tratamiento complementario en la PTSB con el fin de aumentar el caudal de tratamiento y cumplir con los ECA Agua (2017). Para los metales pesados se alcanzó hasta una reducción de concentración de 98.1% de arsénico, 86.26% de cadmio, 91.37% de plomo y 88.8% de hierro, un 94.55% de DBO₅, 99.99% de CTT, y una disminución de la conductividad de 439,4 a 36 33 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Con ello podemos decir que la eficiencia del tratamiento de EC supera el 80%, para todos los parámetros, excepto el pH y la temperatura ya que son considerados factores que influyen la eficiencia del tratamiento, al igual que la corriente eléctrica y el tiempo de aplicación del tratamiento.

VIII. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con los estudios e investigaciones para determinar el material más eficiente para el ánodo, ya que al ser el electrodo de sacrificio tiende a deteriorarse por ser el que se disuelve por las reacciones de oxidación y debe ser repuesto con mayor frecuencia.

Algunas investigaciones sugieren iniciar los tratamientos con temperaturas iniciales elevadas para conseguir buenos resultados en un menor tiempo de aplicación de la EC y menor consumo de electricidad.

Es importante verificar los electrodos antes de ser utilizados, ya que no deben presentar esa capa color rojiza de material oxidado para obtener mejor eficiencia y mayor área de contacto para las reacciones electroquímicas.

Se propone considerar para nuevos estudios e investigación un sistema adicional para la de tratamiento y recuperación de los lodos y material flotante generado por la electrocoagulación ya que, al no contener aditivos químicos, puede ser utilizado como subproducto para diferentes actividades.

Es importante verificar las conexiones entre los electrodos y la fuente de poder, que todo se encuentre debidamente aislado, que los cables no estén rotos y estén debidamente separados, los electrodos que mantengan una debida distancia y no se junten.

Sería recomendable implementar este tratamiento en plantas de tratamiento de agua a escala real, ya que a escala laboratorio y escala piloto muestran resultados prometedores.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulhadi, B., Kot, P., Hashim, K., Shaw, A., Muradov, M., y Al-Khaddar, R. (2021). Continuous-flow electrocoagulation (EC) process for iron removal from water: Experimental, statistical and economic study. *Science of The Total Environment*, 760, 143417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143417>
- Aguilar E. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua*. [Tesis Postgrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio de Cybertesis <https://hdl.handle.net/20.500.12672/4303>
- Al Jaber, F. (2018). *Electrocoagulation using concentric tubes electrodes reactor for removal of lead from simulated wastewater*. [PhD Thesis in Chemical Engineering, University of Baghdad]. *Jornal of Enviromental Chemical Engineering* <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.09.032>
- Al-Qodah, Z., Al-Qudah, Y., y Assirey, E. (2019). Combined biological wastewater treatment with electrocoagulation as a post-polishing process: A review. *Separation Science and Technology*, 1–19. doi:10.1080/01496395.2019.1626891
- Amado, M. (2018). *Determinación bacteriológica de la calidad del agua de consumo humano, regadío y bebida de animales del distrito de Caylloma, departamento de Arequipa, Abril-Mayo 2017*. [Tesis de Ciencias Biológicas. Universidad San Agustín]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional San Agustín: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/5890/Blamcamj.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

American Protection of Health Asociation-APHA (2012). *Standard Methods for the examination of Water and Wastewater*. 22nd Edition. <https://www.apha.org/>

American Public Health Association. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. <https://www.apha.org/>

An, C., Huang, G., Yao, Y., y Zhao, S. (2017). Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review. *Science of The Total Environment*, 579, 537–556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.062>

Arango R. y Garcés G.(2007). Diseño de una celda de electrocoagulación. *Universidad EAFIT*. Vol. 43, N° 147. 56-67. <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/download/764/672/2201>

Arango, Á., Garcés, L.y Restrepo, A. P(2012). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En revisión: ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/277035194_La_Electrocoagulacion_retos_y_oportunidades_en_el_tratamiento_de_aguas/link/5ef25e06458515ceb2046e5f/download

Araujo, C. (2017). *Remoción de coliformes totales y fecales en lodos por procesos electroquímicos, planta de tratamiento de aguas residuales – lima 2017*. [Tesis Pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio UCV <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/3485>

Arboleda, J. y Herrera, P(2015). *Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor Tipo Batch para la remoción de Cromo Hexavalente (Cr+) con electrodos de Aluminio y Hierro en condiciones de laboratorio*. [Tesis Pregrado, Universidad Santo

2019. [Tesis Pregrado, Facultad de Ingeniería]. Repositorio de Universidad de Huánuco <http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/2961>

Castro, J. E., y Principe, D. Y. (2018). Influencia del ph, densidad de corriente y tiempo en la remoción de cadmio (II) y cobre (II) presentes en soluciones acuosas aplicando electrocoagulación. [Tesis Pregrado, Facultad de Ingeniería]. Repositorio de UNT <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/11442>

Chezeau, B., Boudriche, L., Vial, C., y Boudjemaa, A. (2019). Treatment of dairy wastewater by electrocoagulation process: Advantages of combined iron/aluminum electrodes. *Separation Science and Technology*, 1–18. doi:10.1080/01496395.2019.1638935

Comisión de Regantes de Surco – CRS (2015). *Memoria Anual 2015: Cada Gota Cuenta*. Recuperado 15 de enero de 2020, de <https://www.regantessurco.com/images/files/memoria-anual-2015-cush.pdf>

Darban, A. K., Shahedi, A., Taghipour, F., y Jamshidi-Zanjani, A. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion in Electrochemistry*. doi:10.1016/j.coelec.2020.05.009

Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM (6 de junio de 2017). Normas Legales, N° 28611. Diario Oficial El Peruano, 7 de junio de 2017

Dubrawski, K. y Mohseni, M. (2013). Standardizing electrocoagulation reactor design: Iron electrodes for NOM removal. *Chemosphere*, 91(1), 55–60. doi:10.1016/j.chemosphere.2012.11

- Elazzouzi, M., El Kasmi, A., Haboubi, K., y Elyoubi, M. S. (2018). A novel electrocoagulation process using insulated edges of Al electrodes for enhancement of urban wastewater treatment: Techno-economic study. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 506–515. doi:10.1016/j.psep.2018.03.006
- Ezechi, E. H., Affam, A. C., y Muda, K. (2020). Principles of Electrocoagulation and Application in Wastewater Treatment. In Affam, A. C., y Ezechi, E. H. (Ed.), *Handbook of Research on Resource Management for Pollution and Waste Treatment* (pp. 404-431). <http://doi:10.4018/978-1-7998-0369-0.ch017>
- Fekete, É., Lengyel, B., Cserfalvi, T. y Pajkossy, T. (2016). Electrocoagulation: an electrochemical process for water clarification. *J. Electrochem. Sci. Eng.* 6 (1) 57–65. <https://doi.org/10.5599/jese.218>
- Feng, Y., Yang, L., Liu, J. y Logan, B. (2016). Electrochemical Technologies for Wastewater Treatment and Resource Reclamation. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* DOI: 10.1039/C5EW00289C
- Ley General del Medio Ambiente en Perú N° 28611, Art. 31, Diario Oficial El Peruano (2005). <https://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/28611.pdf>
- Metcalf y Eddy (1996). *Ingeniería de aguas residuales*. McGraw Hil (Ed.). Tratamiento y reutilización (3ra ed., Vol. I, pp. 24-36). Wastewater Engineering.
- Municipalidad de San Borja (2005). *Construcción de una planta de tratamiento de agua. Gerencia de Desarrollo de la Ciudad*. [Informe no publicado]

Municipalidad de San Borja (2021). *Gerencia de Medio Ambiente y Sostenibilidad*. Recuperado 13 de marzo del 2021, de <http://www.munisanborja.gob.pe/gerencia-de-medio-ambiente-y-sostenibilidad/>

Gheraout D., Badis A., Kellil A., Gheraout B. (2008). Application of electrocoagulation in *Escherichia coli* culture and two surface waters. *ScienceDirect*, 219(1-3), 118–125. doi:10.1016/j.desal.2007.05.010

Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, Ch., Drogui, P. y Naja J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: *A review of electrocoagulation modeling approaches*. doi:10.1016/j.desal.2016.10.011

Hashim, K. S., Shaw, A., Al Khaddar, R., Pedrola, M. O., y Phipps, D. (2017). Energy efficient electrocoagulation using a new flow column reactor to remove nitrate from drinking water—Experimental, statistical, and economic approach. *Journal of environmental management*, 196, 224-233. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.017>

Hashim, K. S., AlKhaddar, R., Shaw, A., Kot, P., Al-Jumeily, D., Alwash, R., y Aljefery, M. H. (2019). Electrocoagulation as an Eco-Friendly River Water Treatment Method. *Advances in Water Resources Engineering and Management*, 219–235. doi:10.1007/978-981-13-8181-2_17

Hashim, K. S., AlKhaddar, R., Shaw, A., Kot, P., Al-Jumeily, D., Alwash, R., y Aljefery, M., H. (2019). Electrocoagulation as an Eco-Friendly River Water Treatment Method. *Advances in Water Resources Engineering and Management*, 219–235. doi:10.1007/978-981-13-8181-2_17

- Huiman, A. (2015). *Gestión medioambiental y del agua en centros urbanos. Parte-2. Tratamiento y Reuso de Aguas Residuales*. Recuperado el 23 de octubre del 2020: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:2xBOjOAOQxMwJ:www.camara-alemana.org.pe/downloads/151126-4-Gestion-medioambiental-y-del-agua-en-centros-urbanos.pdf+&cd=2&hl=qu&ct=clnk&gl=pe>
- Hussin, F., Abnisa, F., Issabayeva, G., y Aroua, M. K. (2017). Removal of lead by solar-photovoltaic electrocoagulation using novel perforated zinc electrode. *Journal of cleaner production*, 147, 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.096>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2016). Generación de agua residual en Lima Metropolitana, según forma de tratamiento, 2007-2016. Lima, Perú.
- Iriarte, M. (2019). Indicadores de calidad del agua residual doméstica descargada en la franja litoral de la Laguna de Punta de Piedras, Isla de Margarita, Venezuela. *Memoria de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales*. Art. 77(185) pág. 51-63. <http://bdigital2.ula.ve:8080/xmlui/654321/3638>
- Khaled, B., Wided, B., Béchir, H., Elimame, E., Mouna, L., y Zied, T. (2015). Investigation of electrocoagulation reactor design parameters effect on the removal of cadmium from synthetic and phosphate industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*. doi:10.1016/j.arabjc.2014.12.012
- Khan, S. U., Farooqi, I., Usman, M., y Basheer, F. (2020). Energy efficient rapid removal of arsenic in an electrocoagulation reactor with hybrid Fe/Al electrodes: process optimization using CCD and kinetic modeling. *Water*, 12(10), 2876. DOI 10.3390/w12102876
- Kobyas, M., Demirbas, E., Ozyonar, F., Sirtbas, G., y Gengec, E. (2017). Treatments of alkaline non-cyanide, alkaline cyanide and acidic zinc electroplating wastewaters

by electrocoagulation. *Process Safety and Environmental Protection*, 105, 373–385. doi:10.1016/j.psep.2016.11.020

Koby, M., Soltani, R., Omwene, P., y Khataee, A. (2020). A review on decontamination of arsenic-contained water by electrocoagulation: Reactor configurations and operating cost along with removal mechanisms. *Environmental Technology y Innovation*, 17, 100519. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100519>

Kuokkanen, V. (2016) Utilization of electrocoagulation for water and wastewater treatment and nutrient recovery. Techno-economic studies. [Ph.D. thesis, University of Oulu Graduate School] Repositorio de University of Oulu <http://urn.fi/urn:isbn:9789526211084>

Macedo C.R., y Zavala B. N. (2021). Eficiencia de la Electrocoagulación para tratar materia orgánica en agua residual de la extracción de aceite de palma, San Martín 2021. [Tesis Pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio de Digital Institucional Cesar Vallejo: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/68820>

Meoño, F, Taranco, C., y Olivares, Y. (2015). Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Saber y hacer*, 2(2), 8-25. Ley General de Recursos Hídricos No 29338.

Lessoued, R., Baameur, L. y Tabchouche, A. (2021) Modeling and Optimization of COD Removal from Leachate by Electrocoagulation: Application of Central Composite Design. *Environ Model Assess* 26, 423–432 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10666-021-09765-7>

Lizarzaburu, J. (2018). Canales Surco y Huatica—2000 años regando vida. *Lima: Limaq Publishing*.

- López López, A., Barrera Fraire, J., Vallejo Rodríguez, R., y Barahona Argueta, C. (2008). Estudio comparativo entre un proceso fisicoquímico y uno biológico para tratar agua residual de rastro. *Interciencia*, 33(7), 490-496.
- Decreto Supremo N° 003-2010-MINAMPCM (16 de marzo de 2010). Normas Legales, N° 28611. Diario Oficial El Peruano, 17 de marzo de 2010
- Mollah, M., Schennach, R., Parga, J., y Cocke, D. (2001). Electrocoagulation (EC)—science and applications. *Journal of hazardous materials*, 84(1), 29-41. Nawarkar, C. y Salkar, V. (2019). Solar powered Electrocoagulation system for municipal wastewater treatment. *Fuel*, 237, 222–226. doi:10.1016/j.fuel.2018.09.140
- Ortiz, M. (2017). “La ciudad nos agrade”: gestionando conflictos por el agua en Lima Metropolitana: el caso del canal de riego Surco (2008–2016). [Tesis de Megister, Gestion de Recursos Hídricos] Repositorio Institucional de PUCP <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9875>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental – OEFA (2014). Fiscalización Ambiental de Aguas Residuales – Perú. Recuperado el 20 de junio del 2020: https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014). Aguas Residuales. Lima, Perú.
- Poma, J. y Quispe, P. (2016). *Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación*. [Tesis Pregrado] Repositorio Institucional UNCP <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3757>.
- Quispe, Y(2018), *Gestion del Agua para el Riego de Areas Verdes del Distrito de Pueblo Libre*,. Pontificia Universidad Católica del Perú: Lima, Perú.

RAMALHO, R. (2003). Tratamiento de Aguas Residuales (Primera en Español ed.).

Barcelona, España: Reverte SA. Restrepo, A., Arango, A., y Garcés, L. (2006). La

Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas.

Producción+ limpia, 1(2), 58-77. Riyanto, F. y Hidayatillah, A. (2014).

Electrocoagulation of detergent wastewater using aluminium wire netting

electrode (awne), *Proceeding of International Conference On Research,*

Implementation And Education of Mathematics And Sciences 2014. pp. 151–158.

Resolución Jefatural N° 068 -2018-ANA (24 de junio de 2018). Normas Legales, N° 28611.

Diario Oficial El Peruano, 25 de marzo del 2021

RPP (2013). Alerta de proliferación de zancudos y mal olor en Villa el Salvador. Lima,

Perú. Recuperado de: [https://rpp.pe/lima/actualidad/alerta-de-proliferacion-de-](https://rpp.pe/lima/actualidad/alerta-de-proliferacion-de-zancudos-y-mal-olor-en-villa-el-salvador-noticia-560728)

[zancudos-y-mal-olor-en-villa-el-salvador-noticia-560728](https://rpp.pe/lima/actualidad/alerta-de-proliferacion-de-zancudos-y-mal-olor-en-villa-el-salvador-noticia-560728)

Samboni, N., Trujillo, A. R., y Carvajal, Y. (2011). Aplicación de los indicadores de calidad

y contaminación del agua en la determinación de la oferta hídrica neta. *Ingeniería*

y competitividad, 13(2), 49-60. <https://doi.org/10.25100/iyc.v13i2.2674>Samboni

Ruiz, N. E., Carvajal Escobar, Y., y Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros

fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería*

e investigación, 27(3), 172-181 <https://doi.org/10.25100/iyc.v13i2.2674>Sher, F.,

Hanif, K., Iqbal, S. Z., y Imran, M. (2020). Implications of advanced wastewater

treatment: Electrocoagulation and electroflocculation of effluent discharged from

a wastewater treatment plant. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101101.

doi:10.1016/j.jwpe.2019.101101

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento-SUNASS (2017). Política Nacional de Saneamiento 2017-2021. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, Perú.

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento – SUNASS (2021). Plan Nacional de Saneamiento 2022-2026. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, Perú.

Tahreen, A., Jami, M. S., y Ali, F. (2020). Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101440. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101440

Tamani, Y. (2017). Electrocoagulación para remoción de la carga contaminante del efluente del Matadero Municipal de Tingo Maria. [Tesis Pregrado] Repositorio de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1379>

Tello, L., Jave, J. y Guerrero, G. (2018). Análisis de cuantificación de plomo en suelos de parques recreacionales de la ciudad de Lima-Perú. *Ecología Aplicada*, 17(1), 1-12. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v17i1.1168>

Vyasa, A., y Jethoob, A. (2015). Diversification in Measurement Methods for Determination of Irrigation Water Quality Parameters. Department of Civil Engineering, Malaviya National Institute of Technology, Jaipur -302017. India. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.155>

Walsh, F.C. (2001). Electrochemical technology for environmental treatment and cleanenergy conversion, *Pure Appl. Chem.*

Xu, Z., Xu, J., Yin, H., Jin, W., Li, H., y He, Z. (2019). Urban river pollution control in developing countries. *Nature Sustainability*, 2(3), 158–160. doi:10.1038/s41893-019-0249-7

Zongo, I., Maiga, A. H., Wethe, J., Valentin, G., Leclerc, J. P., Paternotte, G., y Lapique, F. (2009). Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: Compared variations of COD levels, turbidity and absorbance. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1-3), 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.072>

X. ABREVIATURAS

A: Amperios

AC: Aguas Contaminadas

Al: Aluminio

ALAB: ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L

ANA: Autoridad Nacional del Agua

AR: Aguas Residuales

ARC: Aguas Residuales Comerciales/ Municipales

ARD: Aguas Residuales Domesticas

ARI: Aguas Residuales Industriales

ARY: Aguas Residuales por infiltración y otros

As: Arsénico

Cat. 3: D1 – Riego de Vegetales: Categoría 3 Riego y Bebida Animal – Riego de Vegetales

Cat. 4: E2 – Ríos de Costa y Sierra: Categoría 4 Conservación del Ambiente Acuático –

Ríos Costa y Sierra

Cd: Cadmio

Ce: Conductividad Eléctrica

CTT: Coliformes Termotolerantes

D.S. N° 004-2017: Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM

DBO₅: Demanda Química de Oxígeno

EC: Electrocoagulación

ECA Agua 2017: Estándares de Calidad de Ambiental del Agua – Decreto Supremo N°
004-2017-MINAM

EEC: Eficiencia de la electrocoagulación

Fe: Hierro

Fe: Hierro

IAS: *Internacional Accreditation Service*

IC: Intensidad de corriente

ICA: Índices de Calidad de Agua

ICO: Índices de Contaminación de Agua

INCAL: Instituto Nacional de Calidad

LMP: Límites Máximos Premisibles

MC: Muestra Compuesta

MEC: Eficiencia de Mejora de la Electrocoagulación

MINAGRI: Ministerio de Agricultura y Riego

MINAM: Ministerio del Ambiente

MT: Metales Pesados

NMP: Número Más Probable

OD: Oxígeno disuelto

Pb: Plomo

pH: Potencial de Hidrógeno

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

PTSB: Planta de Tratamiento Biofísica de San Borja

RR. HH: Recursos Hídricos

T°: Temperatura

XI. ANEXOS

Anexo 1.- Solicitud de información y autorización para realizar el trabajo de investigación a la Municipalidad de San Borja.

"Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia"

Lima, 24 de febrero de 2021

Srta.

Ana Narrea Dextre
Unidad de Limpieza Pública y Gestión Ambiental
Gerencia de Medio Ambiente y Sostenibilidad
Municipalidad de San Borja
Av. Joaquín Madrid N° 200
San Borja



Asunto: Solicitud de Información sobre la Planta de Tratamiento Biofísica de San Borja y Autorización para realizar un Proyecto de Investigación

De mi mayor consideración;

Yo, **ANA PAOLA VELASQUEZ LEÓN**, identificado con el **DNI N° 71792871**, Egresado de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur, me dirijo ante usted con el debido respeto y expongo:

Que habiéndome informado sobre los usuarios inscritos y autorizados para el uso del agua proveniente del río Surco, la Municipalidad de San Borja es uno de ellos y utiliza sus aguas para el riego y mantenimiento de las áreas verdes del distrito. Tengo entendido que antes de poder utilizarlas aplican un tratamiento biofísico que ayuda a remover contaminantes provenientes de actividades clandestinas de los distritos aledaños.

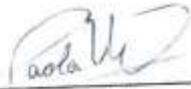
De acuerdo a los compromisos ambientales que tiene la municipalidad en temas sobre sostenibilidad, ecoeficiencia, gestión y manejo de los recursos hídricos, quisiera exponer los beneficios que trae el asegurar la eficiencia de los tratamientos para aguas contaminadas.

Por ello, mi proyecto de investigación titulado "**Evaluar la Eficiencia de la Electrocoagulación como Tratamiento Complementario para las Aguas Contaminadas del Río Surco**", tiene el objetivo de introducir un nuevo tratamiento sostenible, económico, simple, con alto grado de eficiencia para remover contaminantes y estabilizar los parámetros del agua, cumpliendo con los Estándares de Calidad de Agua (ECA Agua – 2017) de la Categoría: Riego de Vegetales y Bebida de Animales (Restringido y No Restringido).

Dado que ustedes disponen de información relevante que puede complementar la investigación y dar un aporte sustancial, pido accedan a mi solicitud donde se me autorice el muestreo de las aguas que ingresan y salen de la planta de tratamiento. Así como también agradecería que me puedan brindar: Especificaciones sobre el uso y mantenimiento de la planta, Capacidad y Tiempo de aplicación del tratamiento, Rutas de irrigación y Mecanismos de riego, Monitoreos anuales o pasados sobre la calidad del agua del lugar, Informes o Reportes que sean relevantes.

Sin otro particular,

Atte,



Ana Paola Velásquez León
E-mail: paola.velasquez.leon97@gmail.com
Celular: 977797568

Av. San Borja Norte 1276. Dpto 202

Carta de la Municipalidad de San Borja para la aceptación a la solicitud de información y autorización para realizar el trabajo investigación.



Anexo 2.- Carta de la Municipalidad de San Borja para la aceptación a la solicitud de información y autorización para realizar el trabajo investigación.



Anexo 4.- Certificados de calibración de multiparámetro HACH



**INSTITUTO PERUANO DE
Metrología e
Innovación**

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
CALIBRATION CERTIFICATE**
CC-IN-0364-21

Fecha de emisión:
Issue date: 2021-03-08

1.- SOLICITANTE / Applicant: TECH PERU INDUSTRIAL S.A.C.
Dirección / Address: CAL. DONA ROSA 1030 URB. LOS ROSALES 2DA ETAPA DPTO. 302 LIMA-LIMA-SANTIAGO DE SURCO

2.- INSTRUMENTO DE MEDICIÓN / Measuring instrument: ANALIZADOR MULTI-PARÁMETRO MULTI-PARAMETER ANALYSER
 Marca / Brand: HACH
 Modelo / Model: HQ40d
 Resolución / Resolution: 0,1 pH; 0,01 mg/L; 0,01 ms/cm
 Exactitud / Accuracy: 0,002 pH ± 0,01 mg/L ± 0,01 ms/cm

3.- FECHA Y LUGAR DE CALIBRACIÓN / Date and place of calibration:
 El equipo fue inspeccionado el 2021-03-05 y calibrado el 2021-03-08 en el Laboratorio de Datos magnitudes del Instituto Peruano de Metrología e Innovación.
 The team was received on 2021-03-05 and calibrated the 2021-03-08 in the laboratory of other magnitudes of the Instituto Peruano de Metrología e Innovación.

4.- MÉTODO DE CALIBRACIÓN / Calibration method:
 La calibración se realizó según el procedimiento PC-020 "Procedimiento para la calibración de medidores de pH" y PC-022 "Procedimiento para la calibración de Conductímetros" DM-INACAL.
 The calibration was carried out according to the procedure PC-020 "Procedure for the calibration of pH meters" and PC-022 "Procedure for the calibration of conductimeters" DM-INACAL.

5.- INSTRUMENTOS /GRUPOS DE MEDICIÓN Y TRAZABILIDAD / Instruments / Measuring equipment and traceability:

Referencia de referencia / Reference Material	MARCA / Brand	N° lote / Lot number	SCOPO / Model
Solución Buffer pH 4.01	HANNA INSTRUMENTS	4300	HI 7004L
Solución Buffer pH 7.01	HANNA INSTRUMENTS	3858	HI 7007L
Solución Buffer pH 10.01	HANNA INSTRUMENTS	4130	HI 7010L
Solución Conductividad 04 uS/cm	HANNA INSTRUMENTS	4097	HI 7033L
Solución Conductividad 1453 uS/cm	HANNA INSTRUMENTS	4364	HI 7051L
Solución Conductividad 1337 uS/cm	HANNA INSTRUMENTS	3537	HI 7051L
Cilindra Oxicloro	HANNA INSTRUMENTS	50062/14	HI 7040L
Termopares/termos	RADSHACE	T-0473-0021	65-1002

6.- RESULTADOS / Results:
 Los resultados se muestran en la página 02 del presente documento.
 The results are shown on page 02 of this document.

La incertidumbre de la medición ha sido determinada usando un factor de cobertura k=2 para un nivel de confianza del 95%.
 The uncertainty of measurement has been determined using a coverage factor k = 2 for a confidence level of 95%.

7.- CONDICIONES DE CALIBRACIÓN / Calibration conditions:

	Temperatura Ambiente / Environment temperature	Humedad Relativa / Relative humidity	Presión Atmosférica / Atmospheric pressure
INICIAL / Initial	20,4 °C	66 %	1010 mbar
FINAL / Final	20,5 °C	66 %	1010 mbar

8.- OBSERVACIONES / Observations:
 Los resultados obtenidos corresponden al promedio de 10 mediciones.
 The results are the average of 10 measurements.
 Se conoce una etiqueta indicando fecha de calibración y número de certificado.
 Please a label indicating calibration date and certificate number.
 La periodicidad de la calibración está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición.

Los resultados del certificado son válidos sólo para el objeto calibrado y se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones y no deben utilizarse como certificado de conformidad con normas de producto.

Se recomienda al usuario calibrar el instrumento a intervalos adecuados, los cuales deben ser elegidos con base en las características del trabajo realizado, el mantenimiento, conservación y el tiempo de uso del instrumento.

Instituto Peruano de Metrología e Innovación S.A.C. no es responsable de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarada.

Este certificado de calibración es también a patrones nacionales e internacionales, los cuales realizan las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Además, cumplamos con los requisitos de la NFP ISO/IEC 17025:2017 y/o sus equivalentes internacionales.

The results are only valid/certified for the calibration object and refer to the time and conditions under which the measurements were made and should not be used as a certificate of conformity with product standards.

User are advised to calibrate the instrument at appropriate intervals, which should be chosen based on the characteristics of the work performed, the maintenance, conservation and use of instrument time.

Instituto Peruano de Metrología e Innovación S.A.C. is not responsible for damages that may arise from improper use of this instrument or of an incorrect interpretation of calibration results reported here.

The certificate certifies traceability to national or international standards, which make the units according to the International System of Units (SI).

In addition, we comply with the requirements of the NFP ISO / IEC 17025:2017 and its international equivalents.



Eliaz Manuel Aducci Rojas
METROLOGO
Instituto Peruano de Metrología e Innovación




Pety Nelly Véliz Pacheco
JEFE DE LABORATORIO DE METROLOGÍA
Instituto Peruano de Metrología e Innovación

Jr. German Arnezaga N°242 Int. 101,
 Zona B – San Juan de Miraflores, Lima – Perú
 Celular: 949 850 783 / 933 990 149
 Fijo: 01 758 4040 / 01 765 6228

e-mail: innova_gerencia@hotmail.com
gerencia@innovalaboratorio.org
comercial@innovalaboratorio.org
 web: www.innovalaboratorio.org



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
CALIBRATION CERTIFICATE
CC-IN-0354-21

Fecha de emisión:
Issue date

2023-03-08

3.- RESULTADOS

3.1 RESULTADOS UTILIZANDO SOLUCIONES BUFFERS
RESULTS USING BUFFER SOLUTIONS

Datos de la sonda

MARCA:	HACHI	Modelo:	PHC101	Serie:	161312508042
Valor nominal	Valor encontrado	Desviación	Incertidumbre		
Nominal value	Value found	deviation	uncertainty		
(pH)	(pH)	(pH)	(pH)		
4,01	4,01	0,00	0,0055		
7,01	7,02	0,01	0,0055		
10,01	10,01	0,00	0,0055		



3.2 RESULTADOS UTILIZANDO SOLUCIONES BUFFERS
RESULTS USING BUFFER SOLUTIONS

Datos de la sonda

MARCA:	HACHI	MODELO:	CDC401	SERIE:	160952583002
Valor nominal	Valor encontrado	Desviación	Incertidumbre		
Nominal value	Value found	deviation	uncertainty		
(dS/cm)	(dS/cm)	(dS/cm)	(dS/cm)		
85	84,3	-1	0,08		
2424	2411,0	-6	0,08		
12876	12873,0	-4	0,01		

3.3 RESULTADOS UTILIZANDO SOLUCION PARA OXIGENO DISUELTO
RESULTS USING SOLUTION FOR OXYGEN DISSOLVED

Datos de la sonda

MARCA:	HACHI	MODELO:	EDO101	SERIE:	101542507033
Valor nominal	Valor encontrado	Desviación	Incertidumbre		
Nominal value	Value found	deviation	uncertainty		
(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)		
0,01	0,02	0,01	0,07		

(FIN DEL DOCUMENTO)
(End of Document)

Jr. German Amezaga N°242 Int. 101,
Zona B – San Juan de Miraflores, Lima – Perú
Celular: 949 850 783 / 933 990 149
Fijo: 01 758 4040 / 01 765 6228

e-mail: innova_gerencia@hotmail.com
gerencia@innovalaboratoria.org
comercio@innovalaboratoria.org
web: www.innovalaboratoria.org
Pag. 2 de 2

Anexo 5.- Informe de Ensayo de Laboratorio

Los informes de ensayo de ALAB se encuentran compilados en una carpeta drive debido a su extensión se adjuntan en el siguiente link:

https://drive.google.com/drive/folders/1i_maW7rS4ioro6iXAN7C2cfMZ6g9Tfqq?usp=sharing, el compilado de los resultados obtenidos en el informe y los parámetros *in-situ* se muestran en el Anexo 6.

Anexo 6.- Tablas de Resultados Generales

Tabla suplementaria 1. Tabla de resultados generales del parámetro arsénico

Tiempo	Corriente	As						ECA - 2017	ECA - 2017
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio	% de remoción	Cat. 3 - D1	Cat. 4 - E2
T=0	C=0	0.161	0.189	0.45	0.227	0.25675	0%	0.1	0.15
T=10	C=6	0.1492	0.1783	0.395	0.213	0.233875	9%	0.1	0.15
	C=12	0.121	0.1041	0.313	0.183	0.180275	30%	0.1	0.15
T=20	C=6	0.109	0.0765	0.187	0.036	0.102125	60%	0.1	0.15
	C=12	0.1	0.0441	0.117	0.0283	0.07235	72%	0.1	0.15
T=30	C=6	0.039	0.0156	0.051	0.0106	0.02905	89%	0.1	0.15
	C=12	0.014	<0.0001	0.003	0.0024	0.004875	98%	0.1	0.15

Tabla suplementaria 2. Tabla de Resultados generales del parámetro cadmio

Tiempo	Corriente	Cd						ECA - 2017	ECA - 2017
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio	% de remoción	Cat. 3 - D1	Cat. 4 - E2
T=0	C=0	0.0446	0.0322	0.0124	0.0396	0.0322	0%	0.01	0.00025
T=10	C=6	0.0418	0.0307	0.0108	0.0381	0.03035	6%	0.01	0.00025
	C=12	0.0403	0.0297	0.0094	0.0346	0.0285	11%	0.01	0.00025
T=20	C=6	0.0205	0.012	0.0066	0.0173	0.0141	56%	0.01	0.00025
	C=12	0.0263	0.01	0.004	0.0064	0.011675	64%	0.01	0.00025
T=30	C=6	0.0105	0.01	0.0037	0.0021	0.006575	80%	0.01	0.00025
	C=12	0.0078	0.008	0.0002	0.0017	0.004425	86%	0.01	0.00025

Tabla suplementaria 3. Tabla de resultados generales del parámetro plomo

Tiempo	Corriente	Pb						ECA - 2017	ECA - 2017
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio	% de remoción	Cat. 3 - D1	Cat. 4 - E2
T=0	C=0	0.054	0.0689	0.0289	0.102	0.06345	0%	0.05	0.025
T=10	C=6	0.0464	0.0274	0.0272	0.0685	0.042375	33%	0.05	0.025
	C=12	0.04	0.0154	0.0211	0.0587	0.0338	47%	0.05	0.025
T=20	C=6	0.0201	0.013	0.0154	0.032	0.020125	68%	0.05	0.025
	C=12	0.0187	0.0094	0.009	0.0308	0.016975	73%	0.05	0.025
T=30	C=6	0.0015	0.0053	0.012	0.012	0.0077	88%	0.05	0.025
	C=12	0.001	0.0049	<0.0010	0.015	0.005475	91%	0.05	0.025

Tabla suplementaria 4. Tabla de resultados generales del parámetro hierro

Tiempo	Corriente	Fe						ECA - 2017	ECA - 2017
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio	% de remoción	Cat. 3 - D1	Cat. 4 - E2
T=0	C=0	1.0895	0.2805	0.0427	1.496	0.727175	0%	5	N.A.
T=10	C=6	0.9635	0.291	0.0354	1.484	0.693475	5%	5	N.A.
	C=12	0.934	0.2044	0.0256	1.173	0.58425	20%	5	N.A.
T=20	C=6	0.6141	0.107	0.0074	0.736	0.366125	50%	5	N.A.
	C=12	0.534	0.104	0.0056	0.473	0.27915	62%	5	N.A.
T=30	C=6	0.141	0.0678	0.0024	0.232	0.1108	85%	5	N.A.
	C=12	0.098	0.0405	<0.002	0.1785	0.080875	89%	5	N.A.

Tabla suplementaria 5. Tabla de resultados generales del parámetro DBO₅

Tiempo	Corriente	DBO ₅						ECA - 2017	ECA - 2017
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio	% de remoción	Cat. 3 - D1	Cat. 4 - E2
T=0	C=0	279.9	380	85.5	128	218.35	0%	15	10
T=10	C=6	145	218	69.9	96.9	132.45	39%	15	10
	C=12	93	138.4	31.9	59	80.575	63%	15	10
T=20	C=6	76	96	16.89	23.3	53.0475	76%	15	10
	C=12	61	45.7	12.9	18	34.4	84%	15	10
T=30	C=6	37.2	31.9	9.89	12.1	22.7725	90%	15	10
	C=12	18.01	12.81	9.69	7.05	11.89	94%	15	10

Tabla suplementaria 6. Tabla de resultados generales del parámetro coliformes termotolerantes

Tiempo	Corriente	Coliformes Termotolerantes						ECA - 2017	ECA - 2017
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio	% de remoción	Cat. 3 - D1	Cat. 4 - E2

T=0	C=0	44000	3900	1600	23000	18125	0%	2000	2000
T=10	C=6	2900	298	210	1480	1222	93%	2000	2000
	C=12	880	80	37	510	376.75	98%	2000	2000
T=20	C=6	100	15	1.8	160	69.2	100%	2000	2000
	C=12	55	1.8	1.8	30	22.15	100%	2000	2000
T=30	C=6	10	1.8	1.8	1.8	3.85	100%	2000	2000
	C=12	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	100%	2000	2000

Tabla suplementaria 7. Tabla de resultados generales del parámetro oxígeno disuelto

Tiempo	Corriente	Oxígeno Disuelto						ECA - 2017 Cat. 3 - D1	ECA - 2017 Cat. 4 - E2
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio	% de incremento		
T=0	C=0	4.12	4.81	3.86	5.52	4.5775	0%	5	4
T=10	C=6	4.39	6.97	6.12	7.54	6.255	37%	5	4
	C=12	4.48	7.59	7.21	7.12	6.6	44%	5	4
T=20	C=6	6.7	7.93	7.98	8.84	7.8625	72%	5	4
	C=12	6.97	8.48	8.81	9.08	8.335	82%	5	4
T=30	C=6	7.17	8.92	8.63	8.46	8.295	81%	5	4
	C=12	7.87	8.9	9.69	9.07	8.8825	94%	5	4

Tabla suplementaria 8. Tabla de resultados generales del parámetro pH

Tiempo	Corriente	pH						ECA - 2017 Cat. 3 - D1		ECA - 2017 Cat. 4 - E2	
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio	% de incremento				
T=0	C=0	6.47	6.43	7.02	5.98	6.475	0%	6.5	8.5	6.5	9
T=10	C=6	6.81	6.9	7.25	6.4	6.84	6%	6.5	8.5	6.5	9
	C=12	6.9	7.05	7.22	6.51	6.92	7%	6.5	8.5	6.5	9
T=20	C=6	7.13	7.12	7.4	6.99	7.16	11%	6.5	8.5	6.5	9
	C=12	7.21	7.15	7.45	7.14	7.2375	12%	6.5	8.5	6.5	9
T=30	C=6	7.5	7.31	7.6	7.7	7.5275	16%	6.5	8.5	6.5	9
	C=12	7.69	7.54	7.82	7.9	7.7375	19%	6.5	8.5	6.5	9

Tabla suplementaria 9. Tabla de resultados generales del parámetro temperatura

Tiempo	Corriente	Temperatura						ECA - 2017 Cat. 3 - D1		ECA - 2017 Cat. 4 - E2	
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio	% de remoción				
T=0	C=0	18.1	18.4	17.9	17.01	17.8525	0%	Δ 3		Δ 3	
T=10	C=6	18.8	18.77	18.12	18.9	18.6475	4%	Δ 3		Δ 3	
	C=12	19.1	18.93	18.1	18.7	18.7075	5%	Δ 3		Δ 3	
T=20	C=6	21.4	19.96	21.5	20.9	20.94	17%	Δ 3		Δ 3	
	C=12	21.7	20.35	21.2	21.3	21.1375	18%	Δ 3		Δ 3	
T=30	C=6	22.6	21.8	23.19	22.6	22.5475	26%	Δ 3		Δ 3	
	C=12	24.3	23.7	24.1	24.2	24.075	35%	Δ 3		Δ 3	

Tabla suplementaria 10. Tabla de resultados generales del parámetro conductividad

Tiempo	Corriente	Conductividad						ECA - 2017	ECA - 2017
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio	% de remoción	Cat. 3 - D1	Cat. 4 - E2
T=0	C=0	675	450.9	145.7	486	439.4	0%	2500	1000
T=10	C=6	608	403	101.2	313	356.3	19%	2500	1000
	C=12	598	342.5	103.7	92.1	284.075	35%	2500	1000
T=20	C=6	175	197.1	58.2	83.7	128.5	71%	2500	1000
	C=12	102	102.5	37.7	76	79.55	82%	2500	1000
T=30	C=6	88.1	81.3	18.8	41	57.3	87%	2500	1000
	C=12	49.2	53	11.8	31.3	36.325	91%	2500	1000

Anexo 7.- Evidencias fotográficas

Recolección de agua para la muestra compuesta con el apoyo y supervisión de personal de la Municipalidad de San Borja



Fotografía propia

Recolección de agua para la muestra compuesta



Fotografía propia

Rotulación, toma de muestra y medición de parámetros in-situ



Fotografía propia

Evidencia de contaminación del agua del río Surco



Fotografía propia

Planta de Tratamiento de San Borja



Fotografía propia

Evidencia de contaminación de los canales del río Surco



Fotografía propia

Medición de parámetros del tratamiento 6 con el multiparámetro



Fotografía propia

Electrodos de Aluminio y Hierro y los cables conectores



Fotografía propia.

Fuente de poder



Fotografía propia

Antes vs. después del tratamiento de EC



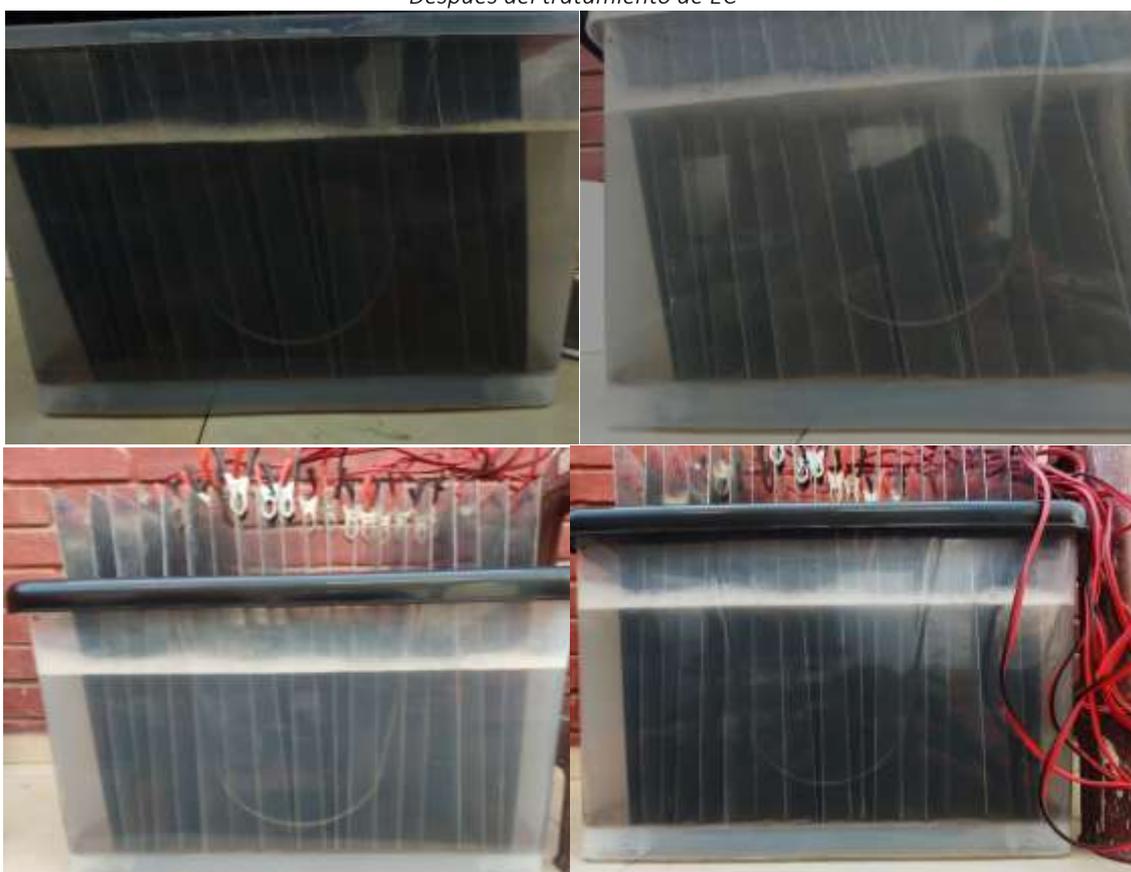
Fotografía propia

Antes del tratamiento de EC



Fotografía propia

Después del tratamiento de EC



Fotografías propias.

Evidencia de formación de conglomerados por las reacciones electroquímicas



Fotografía propia

Evidencia de la formación de burbujas de hidrógeno



Fotografía propia.