

UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“LA ELECTROCOAGULACIÓN EN RELACIÓN A LA DEMANDA
BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅) EN AGUAS RESIDUALES”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR EL BACHILLER

TAME GAMBOA, IAN ALEXANDER

Villa El Salvador

2019

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi madre, Luzmila Gamboa, a mis queridas tías Marisol, Mónica, Erika que con amor, esfuerzo y dedicación me han brindado su apoyo incondicional y me han enseñado a luchar por mis metas.

A mis hermanos Víctor Arias y Sofía Arias.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur UNTELS, por todas las enseñanzas y recuerdos que me llevo.

A los docentes Willy Aauto y Cary Vílchez que fueron de gran influencia en mi forma de pensar.

Al ingeniero Agérico Pantoja Cadillo por facilitarme sus implementos de operación.

A la ingeniera Jocelyn Gallardo, por todo su apoyo durante las pruebas experimentales.

A mi asesor Obert Marin por la paciencia y resolver todas las dudas con claridad.

Gracias a mi pareja la ingeniera Marielena Castro, por entenderme en todo, gracias a ella porque en todo momento fue un apoyo incondicional durante el desarrollo de la tesis y en mi vida.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	viii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Descripción de la Realidad Problemática	1
1.2. Justificación del Problema	2
1.3. Delimitación del Proyecto	3
1.3.1. Teórica.....	3
1.3.2. Temporal.....	4
1.3.3. Espacial	4
1.4. Formulación del Problema.....	4
1.4.1. Problema General.....	4
1.4.2. Problemas Específicos.	4
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo General	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes.....	6
2.2. Bases teóricas	11
2.3. Definición de términos básicos	36
CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL	39
3.1. Modelo de solución propuesto	39
3.2. Resultados.....	60
CONCLUSIONES	76
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Molécula del agua	11
Figura 2. Usos del agua	13
Figura 3. Problemática ambiental de la calidad del agua.	15
Figura 4. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de aguas residuales en función del tiempo.	23
Figura 5. Fuerzas de atracción y repulsión	25
Figura 6. Proceso de coagulación química	26
Figura 7. Proceso de Electrocoagulación.....	30
Figura 8. Interacciones en el Reactor de Electrocoagulación	33
Figura 9. Sistema de electrocoagulación	39
Figura 10. Identificación de variables	43
Figura 11. Puntos elegidos sobre el diseño factorial completo	48
Figura 12. Reactor Tipo Batch, separación entre placas de 10mm.....	53
Figura 13. Celda de electrocoagulación tipo Batch	54
Figura 14. Zonas de la celda de electrocoagulación	55
Figura 15. Reactor tipo Batch acoplado a multitestester y multímetro, para el control operacional de la densidad de corriente.....	59
Figura 16. Variación de la remoción de DBO ₅ para el grupo de Densidad de corriente a 30 amp/m ²	64
Figura 17. Variación de la remoción de DBO ₅ para el grupo de Densidad de corriente a 50 amp/m ²	66
Figura 18. Variación de la remoción de DBO ₅ para el grupo de tiempo de reacción de 20 minutos.....	68
Figura 19. Variación de la remoción de DBO ₅ para el grupo de tiempo de reacción de 30 minutos.....	70
Figura 20. Variación de la remoción de DBO ₅ para el grupo de carga diluida 1.0....	72
Figura 21. Variación de la remoción de DBO ₅ para el grupo de carga diluida 0.4....	74
Figura 22. Grafica normal de efectos estandarizados	75
Figura 23. Certificado del investigador en MONITOREO AMBIENTAL.....	81
Figura 24. Cadena de Custodia	82
Figura 25. Sistema de electrocoagulación	84
Figura 26. Electroodos de aluminio usados como cátodos y ánodos.....	84
Figura 27. Tratamiento de electrocoagulación	85

Figura 28. Formación de espuma	85
Figura 29. TRAT-EC-01	86
Figura 30. TRAT-EC-02	86
Figura 31. TRAT-EC-03	86
Figura 32. TRAT-EC-05	86
Figura 33. TRAT-EC-10	86
Figura 34. TRAT-EC-11	86
Figura 35. 1 ^{er} grupo de tratamiento	87
Figura 36. 2 ^{do} grupo de tratamiento	87
Figura 37. Etiquetado de las botellas	87
Figura 38. Llenado de las botellas utilizando el caño del reactor	88
Figura 39. Llenado de las botellas utilizando una pipeta.....	88
Figura 40. Informe de ensayo N° 1903106A, elaborado por el laboratorio R – Lab S.A.C., (1 ^{ra} hoja).....	89
Figura 41. Informe de ensayo N° 1903106A, elaborado por el laboratorio R – Lab S.A.C., (2 ^{da} hoja).....	90
Figura 42. Informe de ensayo N° 1903106A, elaborado por el laboratorio R – Lab S.A.C., (3 ^{ra} hoja).....	91
Figura 43. Informe de ensayo N° 1903106A, elaborado por el laboratorio R – Lab S.A.C., (4 ^{ta} hoja).....	92
Figura 44. Prueba de normalidad para los valores de reducción de DBO ₅ de los grupos A y C.	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Mecanismos de Separación de sustancias	13
Tabla 2. Categorías de Agua	20
Tabla 3. Límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de la actividad agroindustrial tales como planta de camales y plantas de beneficio, incluyendo los mataderos en promedio diario.....	21
Tabla 4. Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas	22
Tabla 5. Matriz de consistencia.....	40

Tabla 6. Características del diseño fraccionado.....	42
Tabla 7. Estructura de alias.....	42
Tabla 8. Detalle de los procesos en el camal del Mercado Ciudad de Dios.....	45
Tabla 9. Clasificación del residuo líquido y su detalle	46
Tabla 10. Niveles alto y bajo de los factores	47
Tabla 11. Tabla de Diseño factorial completo.	47
Tabla 12. Grupo de combinaciones que contienen +,+,+.....	48
Tabla 13. Combinación de tratamientos con sus respectivas repeticiones codificadas	49
Tabla 14. Diseño factorial fraccionado con 3 réplicas	50
Tabla 15. Extraído de Protocolo Nacional para el monitoreo de Calidad de los Recursos Hídricos.....	52
Tabla 16. Materiales y equipos para la toma de muestra.....	53
Tabla 17. Resultados de la experimentación, la respuesta se expresa en porcentaje de remoción del valor inicial de la caracterización	60
Tabla 18. Promedio de repeticiones del grupo A	61
Tabla 19. Promedio de repeticiones del grupo B	61
Tabla 20. Promedio de repeticiones del grupo C	62
Tabla 21. Promedio de repeticiones del grupo D	62
Tabla 22. Comparación entre los grupos A (- + -), B (+ - -), C (- - +), D (+ + +)	62
Tabla 23. Promedio de Densidad de corriente a 30 amp/m ²	63
Tabla 24. Promedio de Densidad de corriente a 50 amp/m ²	65
Tabla 25. Promedio de tiempo de reacción a 20 minutos	67
Tabla 26. Promedio de tiempo de reacción a 30 minutos	69
Tabla 27. Promedio de carga diluida 1.0.....	71
Tabla 28. Promedio de carga diluida a 0.4.....	73
Tabla 29. Comparación de los resultados obtenidos con los Valores Máximos Admisibles (VMA).....	94

INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso de mayor abundancia en el planeta, la cual cubre un promedio del 70.8% de la superficie terrestre, pero tan solo el 2.5% de esta es agua dulce o apta para consumo, el agua dentro del planeta se mantiene constante durante el tiempo, sin embargo, no ocurre lo mismo con la población mundial. Actualmente somos unos 7 300 millones de habitantes, pero se estima que para el año 2100 la población mundial sea de 11 200 millones habitantes, y en Perú para el año 2050 seremos 40 millones de habitantes, que demandaran cubrir sus necesidades básicas, entre ellas el derecho al agua. (Sanchez, 2017).

El aumento de la población no representa la capacidad de un país en desarrollar su tecnología, en nuestro país tenemos múltiples defectos de saneamiento en las plantas de tratamiento de agua residual convencionales, lo que repercute negativamente en la salud pública. Las Naciones Unidas (2010), afirmo que muchas ciudades del mundo de ingresos bajos o medios no tienen o no cuentan con suficientes plantas de tratamiento de aguas residuales, ocasionando que muchas de estas aguas sean vertidas directamente en los mares o ríos sin haber sido tratadas previamente, contaminando los cuerpos de agua.

Hoy en día se busca implementar nuevas tecnologías que sean limpias, innovadoras, eficaces y económicas, y que permitan a su vez la protección, conservación y recuperación del agua. Para Arango (2005), las tecnologías basadas en la electroquímica, como la electrocoagulación, ofrecen ventajas competitivas frente a las tecnologías tradicionales.

La tecnología de Electrocoagulación se basa en la aplicación de corriente eléctrica a través de electrodos (siendo los materiales más usados aluminio y hierro), lo que permite la remoción de contaminantes que se encuentran suspendidos,

disueltos o emulsificados en el agua residual, con la finalidad de poder darle un segundo uso al agua, ya sea para consumo humano o para riego. (Acosta, Coy, Bourdón y Cuervo, 2013)

El presente trabajo ha sido desarrollado con la finalidad de utilizar la tecnología de electrocoagulación para reducir significativamente la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) de las aguas residuales provenientes del mercado Ciudad de Dios.

Para la ejecución del trabajo, se utilizó una celda de electrocoagulación experimental de tipo Batch, provista de 2 placas metálicas paralelas de aluminio como electrodos, para desarrollar un total de 12 pruebas experimentales, que fueron realizadas mediante un diseño experimental factorial de 3 niveles. En las cuales se analizaron la influencia de la densidad de corriente, el tiempo de reacción y la dilución de la carga orgánica, con respecto al porcentaje de la remoción de la DBO_5 presente en el agua residual del Mercado Ciudad de Dios del distrito de San Juan de Miraflores.

Las muestras tratadas obtenidas mediante la técnica de electrocoagulación, fueron enviadas al laboratorio acreditado R-Lab, para el respectivo análisis del parámetro DBO_5 . Para evaluar la eficiencia de remoción de la tecnología de electrocoagulación y comprobar si los valores obtenidos cumplen con los Valores Máximos Admisibles dispuesto en la normativa peruana del agua.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la Realidad Problemática

Actualmente la demanda del agua va en crecimiento, debido a que es utilizada en diversas actividades como domésticas, industriales, agrícolas, etc., pero en dichas actividades se generan grandes volúmenes de aguas residuales que contienen organismos patógenos y otros contaminantes que son causantes de múltiples enfermedades (como el cólera, la fiebre tifoidea, etc.), por lo que requieren ser tratadas para disminuir la carga de contaminantes presentes. Pero La mayoría de las aguas residuales son vertidas en los ríos y lagos, sin previo tratamiento o con un tratamiento inadecuado, los que ocasiona que los cursos de agua sean contaminados.

(Foro Ambiental, 2017)

En el 2017, La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), informo que los países desarrollados tratan cerca del 70% de las aguas residuales, mientras que en los países intermedios y más pobres esa proporción cae a un 38% y un 8% respectivamente, debido a que no cuentan con la infraestructura, capacidades técnicas e institucionales y financiamiento necesarios para tratar sus aguas residuales. Estableciendo que más del 80% de las aguas

residuales son vertidas sin tratamiento alguno.

Según Sánchez (2017), en nuestro país no todas las plantas de tratamiento de aguas residuales funcionan de forma correcta, debido a que han sido sobre dimensionadas o que cuentan con una tecnología no recomendada para el clima en el que han sido instaladas. Esto a causa del interés económico de las empresas privadas o la falta de profesionalismo de las empresas instaladoras, ocasionando que existan plantas abandonadas o usadas pero que cuya agua termina en un río o laguna, sin ningún tipo de fiscalización. Según el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014), de 2 217 946 m^3 de agua residual que es descargada a la red de alcantarillado, solo el 32% es tratado mediante procesos físicos, químicos y biológicos.

1.2. Justificación del Problema

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2017), menciona que las aguas residuales tratadas pueden ser una fuente potencial de materias primas, como fósforo y nitratos que podrían convertirse en fertilizantes, solo si son sometidas a un adecuado tratamiento. Se estima que un 22 % de la demanda mundial de fósforo “un recurso mineral finito”, podría cubrirse mediante la reutilización de aguas residuales tratadas. En el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017 (UNESCO, 2017), se menciona que las aguas residuales están compuestas, básicamente, de un 99% de agua y un 1% de sólidos disueltos, suspendidos o coloidales. Por lo mencionado anteriormente se puede concluir que una mejor gestión en el tratamiento de aguas residuales puede generar beneficios sociales, ambientales y económicos, contribuyendo así a logro de los objetivos de Desarrollo Sostenible.

Un ejemplo de la adecuada gestión de las aguas residuales son las plantas de tratamiento, y actualmente utilizan sistemas convencionales para la reducción de altas cargas orgánicas utilizan tecnologías como los Reactores Anaerobios de Flujo Ascendentes (RAFA), sistemas de ultrafiltración de membranas y lodos activados en reactores (MBR). Estas tecnologías implican la adicción de sales que coagulen el agua como sulfato férrico $Fe_2(SO_4)_3$ y sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, estos controles de adición son realizados por un operario o algunos sistemas mecánicos de dosificación, lo que involucrar costos operacionales altos. (Barboza, 2011)

Ante esto se presenta la tecnología de electrocoagulación como una alternativa emergente en la recuperación de aguas residuales, no solo por ser una energía eficiente y limpia, sino también por ser económicamente accesible. La remoción de contaminantes se consigue mediante la coagulación química combinada con principios eléctricos para la producción de iones de alta valencia en celdas electrolíticas. Se utiliza fuerzas electroquímicas y reemplaza el sulfato de aluminio y sales de hierro por electrodos de aluminio y hierro de alta pureza que son más estables, fáciles de manipular, almacenar y pueden ser obtenidos por menor costo. (Mercado & Reyes, 2003)

1.3. Delimitación del Proyecto

1.3.1. Teórica

En base a la revisión bibliográfica se encontró que la información entre la relación de eficiencia de remoción de DBO_5 y el metal residual de aluminio es limitada.

1.3.2. Temporal

La presente investigación se realizó en el periodo de tiempo de 2 meses, comprendidos desde el 4 de febrero al 4 abril del 2019.

1.3.3. Espacial

Este trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Biología de la Facultad de Ingeniería y Gestión de la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur.

1.4. Formulación del Problema

1.4.1. Problema General

¿Cuánto se reducirá la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) de las aguas residuales del mercado Ciudad de Dios en San Juan de Miraflores mediante la electrocoagulación?

1.4.2. Problemas Específicos.

PE1: ¿Cuál es la DBO_5 inicial del agua residual del mercado ciudad de Dios en San Juan de Miraflores?

PE2: ¿Cuál es la densidad de corriente optima que obtenga la mayor reducción de la DBO_5 ?

PE3: ¿Cuál es el tiempo de reacción óptimo que favorezca la mayor reducción de la DBO_5 ?

PE4: ¿Cómo la dilución de carga orgánica de un camal influye en la reducción de la DBO_5 ?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Reducir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) de las aguas residuales del mercado Ciudad de Dios en San de Juan Miraflores mediante la electrocoagulación.

1.5.2. Objetivos Específicos

OE1: Determinar la DBO_5 inicial del agua residual del mercado ciudad de Dios en San Juan de Miraflores.

OE2: Determinar la densidad de corriente optima que obtenga la mayor reducción de la DBO_5 .

OE3: Determinar el tiempo de reacción optimo que favorezca la mayor reducción de la DBO_5 .

OE4: Determinar si la dilución de carga orgánica de un camal influye en la reducción de la DBO_5 .

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Deghles y Kurt (2016), desarrollaron la investigación: “*Treatment of tannery wastewater by a hybrid electrocoagulation/ electro dialysis process*”, en la Universidad Técnica de Yildiz en Turquía. Con el objetivo de evaluar el rendimiento de un proceso híbrido de electrocoagulación (EC) / electrodiálisis (ED), para eliminar DQO (Demanda Química de Oxígeno), NH₃-N (Amoniac), Cr (Cromo) y color de las aguas residuales. Las variables de estudio fueron la densidad de corriente y el tiempo de electrólisis, utilizando en el proceso electrodos de aluminio y hierro. Los autores obtuvieron las siguientes conclusiones: en el proceso de electrodiálisis (ED) se obtuvo como resultado la remoción al 92% de DQO (Demanda Química de Oxígeno), 100% de NH₃-N (Amoniac), 100% de Cr (Cromo) y 100% de color, con un valor de conductividad de 0,371 mS/cm a 45 minutos. Mientras en el proceso de electrocoagulación (EC), utilizaron electrodos de hierro, con un valor de conductividad de 1,5 a 75 minutos, obteniendo como resultado la remoción al 87% de DQO, 100% de NH₃-N, 100% de Cr y 100% de color. Concluyendo que la integración de las técnicas de EC – ED, remueve porcentajes similares para el mismo parámetro.

Medina y Peralta (2015), trabajaron en la elaboración de la tesis: *Validación de un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica presentes en la industria*, en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca en Ecuador para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental. Con el objetivo de evaluar un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica presentes en la industria. Se analizaron cuatro variables independientes: caudal (40, 50 y 60 mL/min), tipo de electrodo (hierro, aluminio y una combinación de hierro y aluminio), distancia de electrodos (0.5, 1 y 1.5 cm) y voltaje (15, 20 y 30 V); cada una con 3 niveles y como variables dependientes se analizaron tres variables (unidades de color, Demanda Bioquímica de oxígeno y Demanda Química de Oxígeno). Los autores concluyeron que los parámetros de entrada con mayor influencia en la prueba del prototipo de electrocoagulación fueron: un caudal de 50 ml/minuto, el Aluminio como los mejores electrodos, un voltaje de 30V y una distancia de 1cm. Debido a que tuvieron una eficiencia en el porcentaje de remoción de 78.26% de la Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO), de 90.54% de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), y de 81.46% de las unidades de color.

Sahu, Mazumdar y Chaudhari (2014), desarrollaron la investigación: *Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review. Environ Science*, en el Departamento de Ingeniería Química de Raipur en India. Los autores concluyeron que al analizar todos los factores que pueden afectar el proceso de electrocoagulación, remoción de sólidos suspendidos, material coloidal, metales disueltos. Reconociendo un total de 9 factores que afectan el proceso de electrocoagulación, los cuales son: el material del electrodo, la distancia de electrodos, la disposición de electrodos, el efecto del pH, el

diseño del reactor, el efecto de la densidad de corriente, el efecto del tiempo de reacción y por último el efecto de la temperatura.

Paitan y Sifuentes (2018), sustentaron la tesis: *Remoción de contaminantes de aguas residuales de un matadero de equinos por el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio*, en la Universidad Nacional el Centro del Perú para lograr el título profesional de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Con el objetivo de emplear el uso del método de electrocoagulación en las aguas residuales de un matadero de equinos, para reducir sus concentraciones de las características fisicoquímicas (DBO, DQO, turbidez, pH, grasas y aceites, sólidos suspendidos y nitrógeno) para que cumplan con los límites máximo permisibles (LMP). Los parámetros utilizados en el diseño fueron de intensidad de corriente de 3 niveles ($22,58 \text{ amp/m}^2$, $28,23 \text{ amp/m}^2$ y $33,88 \text{ amp/m}^2$) y tiempo de exposición de 2 niveles (20 min y 30 min). Los autores concluyendo que al trabajar con densidad de corriente de $33,88 \text{ amp/m}^2$ y a un tiempo de exposición de 30 minutos, se logra una mayor reducción de contaminantes.

Guerrero (2017), presentó la tesis: *Influencia del tiempo y voltaje en la disminución de la carga orgánica por electrocoagulación del agua residual de la curtiembre Cuenca S.A.C.*, en la Universidad César Vallejo para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental. Con el objetivo de evaluar la influencia del proceso de electrocoagulación en la disminución de la carga orgánica, a través de los parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y Demanda Química de Oxígeno (DQO). Durante el proceso utilizó electrodos de aluminio y analizó las variables de tiempo de residencia (20 - 45 minutos) y de voltaje (8 - 16 voltios). Teniendo como resultado los porcentajes de remoción de 71.2% para DBO_5 y 46.9%

DQO, mediante un tiempo de residencia de 45 minutos y a 16 voltios de potencial energético. Concluyendo que, al aplicar mayor voltaje y mayor tiempo de reacción, la eficiencia de remoción aumentara.

Poma y Quispe (2016), trabajaron en la elaboración de la tesis: *Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas por el método de Electrocoagulación*, en la Universidad Nacional del Centro del Perú para lograr el título profesional de Ingeniero Químico. Con el objetivo remover los contaminantes de las aguas residuales urbanas del colector de aguas de la Universidad Nacional del Centro del Perú variando la densidad de corriente y el tiempo de residencia por el método de electrocoagulación a nivel laboratorio. Obteniendo como resultado que la densidad de corriente óptima del proceso es 32,72 A/m², y el tiempo de residencia óptima es de 20 minutos, con una distancia entre electrodos de 1 cm. Obteniendo los porcentajes de remoción de 85,9% para Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), 75,3% para Demanda Química de Oxígeno (DQO), 93,8 % para aceites y grasas, 89,5% para conductividad eléctrica, 79,6% para turbiedad, 95,3% para sólidos totales, 91,0% para sólidos suspendidos, 91,3% para sólidos disueltos, 70,3% para dureza total, 91,3% para dureza cálcica, 91,9% para cloruros, 100,0% para coliformes totales y 98,9% para escherichia coli. Y comparando los resultados con lo dispuesto en el Decreto Supremo 003-2015-MINAN, concluyeron que el proceso de electrocoagulación es una alternativa para el tratamiento de aguas residuales.

Pantoja (2015), realizó la investigación: *Reducción de concentración de hierro en agua, mediante la Electrocoagulación*, en la Universidad Nacional del Callao. Con el objetivo de reducir la concentración del Hierro en agua mediante la

electrocoagulación, para ver tal efecto, utilizando el método experimental de 3 variables con 3 niveles de estudio, y el promedio de los resultados obtenidos en términos de reducción de concentración de hierro, los analizo estadísticamente utilizando el análisis de varianza. Teniendo como resultado que las condiciones óptimas para la reducción del Hierro hasta un 88.76% fueron utilizando pH = 8.00; t = 4 min; Densidad de corriente= 30 amp/m^2 , con electrodos de aluminio.

Aguilar (2015), desarrollo la investigación: *Evaluación de una celda de electrocoagulación a escala de laboratorio para el tratamiento de agua*, en la Unidad de Posgrado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Con el objetivo de construir un reactor de electrocoagulación para evaluar la eficiencia en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) de aguas residuales provenientes de la industria de pintura; así como determinar las mejores condiciones de pH, conductividad, intensidad de corriente y tiempo de tratamiento. Obteniendo como resultados una eficiencia promedio del 87% en la remoción de la DQO, mediante una intensidad de corriente I= 5 amperios, a un pH natural del efluente de 7,12 y a un tiempo de tratamiento de 15 minutos. Concluyendo que los valores obtenidos mediante el reactor de electrocoagulación cumplen con la normativa ambiental vigente en el país.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. El agua

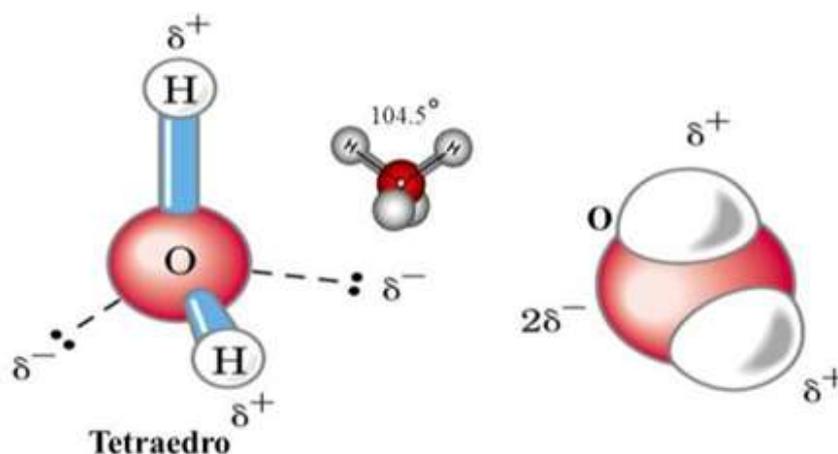
En el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Humano (2009), se considera al agua como un recurso renovable e imprescindible para la vida, además que es fundamental para el consumo humano, producción de energía y el desarrollo de diferentes industrias.

Cerca de tres-cuartos de la superficie de la tierra está cubierto con agua y se estima que $1.35 \times 10^{18} m^3$ de agua están presentes en los océanos.

2.2.1.1. Composición química

Prieto y Álvarez (2016), mencionan que la molécula del agua está compuesta por 2 átomos de hidrógeno y uno átomo de oxígeno, teniendo una forma angular con el oxígeno colocado en el vértice y las uniones con el hidrógeno, formando un ángulo de aproximadamente $104,5^\circ$.

Figura 1. Molécula del agua



Fuente: Prieto y Álvarez, 2016

Hidrógeno:

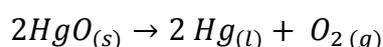
El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo y el oxígeno el elemento más abundante en la superficie terrestre, y cuando químicamente son combinadas forman la molécula de agua, que es el compuesto químico más importante y familiar de todos los compuestos químicos.

El hidrógeno se combina también con muchos elementos de transición y con cada elemento de los principales grupos de la tabla periódica, excepto los gases nobles, quizás indio y talio. Se menciona también que el hidrógeno forma muchos compuestos, más que otros elementos. (McMurry y Fay, 2008, p. 166)

Industrialmente la gran cantidad de elementos de hidrógeno son producidos para la síntesis de sustancias químicas como el amoniaco y metano.

Oxígeno:

McMurry y Fay (2008), afirmaron: “el oxígeno fue aislado y caracterizado por primera vez en 1771 y 1774 por los químicos Joseph Priestley y Carl Wilhelm. Encontraron que al calentar ciertos compuestos tales como el mercurio oxidado, se genera un gas incoloro e inodoro, de mayor combustión que el aire” (p. 17)

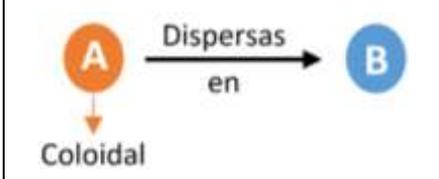
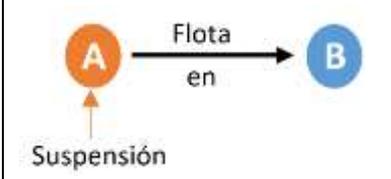


También mencionan que el oxígeno forma compuestos con casi todos los elementos químicos (excepto gases inertes). Formando en gran abundancia, el agua (H₂O) y el silicio (componente principal de la arena). También los silicatos que contienen más de dos elementos que constituyen la mayor parte de las rocas y suelos. Y otros compuestos que abundan en la naturaleza son el carbonato de calcio (caliza y mármol), sulfato de calcio (yeso), óxido de aluminio (bauxita) y varios óxidos de hierro, que se utilizan como fuente del metal.

2.2.1.2. Sustancias dispersas en el agua

Barboza (2015), refiere que las sustancias en el agua pueden encontrarse en diferentes situaciones como se observa en la Tabla 1:

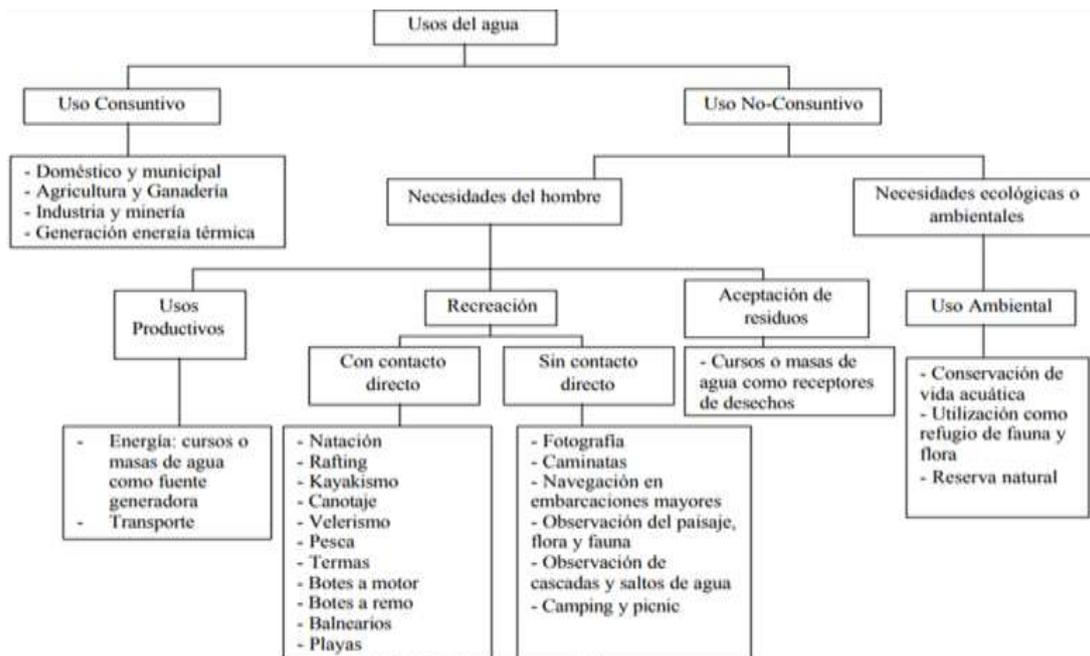
Tabla 1. Mecanismos de Separación de sustancias

		
<p>Una partícula y/o molécula puede estar disgregada dentro de una sustancia B (líquido), entonces se dice que la sustancia A está disuelta en B.</p>	<p>En este caso se encontraron partículas o gotas pequeñas de la sustancia A que pueden estar dispersas dentro de la sustancia B (líquido). En este caso se dice que la sustancia A se encuentra en estado coloidal, porque el tamaño de sus partículas le permite flotar.</p>	<p>Cuando la partícula A es relativamente grande puede encontrarse flotando dentro de la sustancia B (líquido). Se dice entonces que la sustancia A está en suspensión en la sustancia B.</p>

Fuente: Adaptado de Barboza, 2015

2.2.1.3. Usos del agua

Figura 2. Usos del agua



Fuente: Pérez, 2015

El Perú es uno de los países más ricos en recursos hídricos sin embargo el uso del agua no es eficiente, estando sus características de uso en función de la dotación y de la distribución del agua. Estas características han venido representando un desafío en las prácticas y políticas de uso acorde a las condiciones del estado. (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Perú, 2009).

En la escala global, el Perú es un país mediano por su superficie, por lo tanto, el problema radica en función de la distribución del agua teniendo una dotación del 1.8% del agua superficial y subterránea del total de las vertientes del Pacífico, Atlántico y Titicaca.

La distribución del uso del agua en nuestro país, puede ser de uso consuntivo y de uso no consuntivo (Ministerio de Agricultura, 2016). Cuando el agua es consumida efectivamente durante alguna actividad como en la agricultura, es considerada agua de uso consuntivo.

Sin embargo, cuando el agua no llega a consumirse efectivamente durante la actividad, se denomina agua de uso no consuntivo, como en las hidroeléctricas donde luego del aprovechamiento del agua, el agua que no haya sido consumida puede ser utilizada en otros fines donde sea apta.

2.2.1.4. Aspecto ambiental

Figura 3. Problemática ambiental de la calidad del agua.



Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA)

Es la contaminación de las aguas residuales un problema continuo y creciente en nuestro país, los ríos y aguas del mar, son considerados como puntos de descargas de las aguas residuales, ocasionando que los cuerpos de agua presenten un alto contenido de parásitos y organismos patógenos, así como la presencia de metales pesados (relaves mineros).

En el diario RT español, se mencionó que el río Rímac es la principal fuente de suministro de agua para la población de Lima y que abastece a 10 millones de ciudadanos, pero que llega a recibir cientos de descargas de aguas residuales, mayoritariamente domésticas y, en menor proporción, industriales y mineras (Torres, 2016).

Según la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento a nivel nacional de Perú, en el año 2017 se llegó a generar alrededor del 66% de volumen anual nacional de aguas residuales sin tratamiento, del cual solo el 32.7% reciben tratamiento previo.

2.2.1.5. Las aguas residuales

Las aguas residuales contienen una gran cantidad de sustancias y/o microorganismos perjudiciales para la salud pública y el ambiente, por lo que requerirán de un previo tratamiento antes de reusarlas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado. Pero las prácticas de manejo en el tratamiento de las aguas residuales no son planeadas ni controladas adecuadamente, lo que ocasiona que se genere volúmenes considerables de infiltración, que pueden llegar a contaminar los acuíferos que son utilizados para el abastecimiento de agua potable en las ciudades.

La Autoridad Nacional del Agua (ANA), registro un alto grado de contaminación en más del 50% de los recursos hídricos superficiales evaluados ese mismo año, esto a causa del vertimiento de aguas residuales municipales, agrícolas, industriales, mineros (informales), de pasivos ambientales, la erosión de suelos y la contaminación, lo que ocasionaba un grave riesgo su utilización (ANA, 2012).

El Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, titulado “Aguas Residuales el Recurso no explotado”, informó que para lograr una mejor gestión de las aguas residuales, se debe no solo reducir la contaminación en los cuerpos de agua, sino eliminar los contaminantes presentes en las aguas residuales, con la finalidad de aprovechar el agua residual tratada en actividades que no requieren de la calidad de agua potable, considerándolo como “un valioso recurso de sustitución” (UNESCO, 2017).

- ***Clasificación de las aguas residuales:***

En el libro titulado “Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización volumen II” de Metcalf y Eddy (1996), definieron y clasificaron las aguas residuales de la siguiente manera:

- “Las Aguas Residuales Domésticas provienen de las áreas residenciales (incluyen residuos provenientes de cocinas, baños, lavado de ropa y drenaje de pisos) y comerciales, incluidas las instituciones y zonas recreativas. Estas normalmente se recogen en un sistema de alcantarillado público. La cantidad de aguas residuales domiciliarias (sanitarias) por lo común se determina a partir del uso del agua y se conoce que sólo el 70% al 90% del agua suministrada llega a las alcantarillas”.

– “Las Aguas Residuales Industriales son generadas en actividades industriales, pudiendo tener una composición más o menos constante, o estar sujetas a variaciones cualitativas y/o cuantitativas considerables, según los horarios de funcionamiento de las industrias, la demanda del mercado o la posible influencia estacional en la producción”.

– “Aguas Residuales Urbanas tienen una composición más o menos uniforme, que facilita los procesos de tratamiento, y las distingue claramente de las aguas residuales industriales, cuya variedad es en muchos casos indescriptible. Aun así, aunque derive sólo de efluentes domésticos, la composición varía influenciada por algunos factores como son los hábitos alimentarios, consumo de agua, uso de productos de limpieza en el hogar, etc.

La composición, al igual que la cantidad de aguas residuales, sufre también variaciones respecto al tiempo. Varía en el transcurso de las distintas horas del día, en función de los días de la semana y se presentan variaciones estacionales”.

– “Las Aguas Residuales Agrícolas, constituyen una mezcla de aguas domésticas de la población, junto con las de riego de las tierras y el manejo del ganado. La búsqueda de una mayor productividad agrícola ha llevado al empleo de una gran variedad de sustancias que, a la par que causan beneficios, y pudiendo producir daños de forma indirecta. Así, los fertilizantes tienen sus desventajas: nitratos, fosfatos y compuestos de amonio pueden contaminar ríos, lagos y mares, alterando el equilibrio de las especies acuáticas.

También se utilizan plaguicidas: herbicidas, fungicidas y pesticidas. Estas sustancias pueden producir un efecto tóxico sobre las especies, incluido el hombre. En el agua, los pesticidas pueden ser descompuestos por mecanismos

físicos, químicos y microbiológicos. Pero, para asegurar su biodegradación, antes de emitirlos al medio ambiente, se debe conocer su potencial de bioconcentración y biodegradación microbiana”.

2.2.2. Normativa ambiental

2.2.2.1. Estándares de Calidad Ambiental (ECA)

El Ministerio del Ambiente en coordinación con todos los sectores gubernamentales, aprobó los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ECA de Agua), según Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM.

Cuyo objetivo fue de implementar un instrumento de gestión ambiental, que mida el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente. (MINAM, 2015),

Los ECAs de agua están en función de las categorías determinadas en relación al uso que se le va a dar al cuerpo natural de agua como se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. Categorías de Agua

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	SUBCATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
Categoría 1-A	Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable	A1	Agua que puede ser potabilizada con desinfección
		A2	Agua que puede ser potabilizada con tratamiento convencional
		A3	Agua que puede ser potabilizada con tratamiento avanzado
Categoría 1-B	Aguas superficiales destinadas a recreación	B1	Contacto primario
		B2	Contacto secundario
Categoría 2: Actividades de extracción y cultivo marino costeras y continentales	Agua de mar	C1	Extracción y cultivo de moluscos bivalvos
		C2	Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas
		C3	Otras actividades
	Agua continental	C4	Extracción y cultivo de especies hidrobiológicas en lagos o lagunas
Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales	Parámetros para riego de vegetales	D1	Riego de cultivos de tallo alto y bajo
	Parámetros para bebida de animales	D2	Bebida de animales
Categoría 4	Conservación del Ambiente Acuático	E1	Lagunas y lagos
		E2: Ríos	Ríos de costa y sierra
			Ríos de selva
		E3: Ecosistemas marino costeras	Estuarios
Marinos			

Fuente: MINAM, 2015

2.2.2.2. Límites Máximos Permisibles (LMP)

En el Compendio de la Legislación Ambiental Peruana, Volumen V: Calidad Ambiental publicado en el año 2010, se definieron a los Límites Máximos Permisibles (LMP) como la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión que, al ser excedida, causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el MINAM y los organismos que conforman el Sistema de Gestión Ambiental.

Se establecieron los límites máximos permisibles (LMP) para efluentes de las actividades agroindustriales tales como plantas de camales y plantas de beneficio, con el objetivo de mitigar los efectos negativos de la contaminación en los cuerpos de agua, así como los riesgos a la salud. (MINAM, 2009)

Tabla 3. Límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de la actividad agroindustrial tales como planta de camales y plantas de beneficio, incluyendo los mataderos en promedio diario.

	Parámetros	Unidad	LMP	Método de ensayo
I	Generales			
1	pH	-	6,0 – 9,0	APHA 4500-H+ - B, págs. 4-90 a 4-94, 21.ª edición. 2005
2	Sólidos suspendidos totales	mg/L	300	APHA 2540-D, págs. 2-58 a 2-59, 21.ª edición.2005
II	Orgánicos			
3	Demanda bioquímica de oxígeno -DBO5, 20 °C	mg/L	250	APHA-AWWA WEF-5210 B, ED. 21 TH.2005
4	Demanda química de oxígeno -DQO	mg/L	500	EPA 410.2.1999
III	Inorgánico			
5	Fosforo total	mg/L	40	Standard methods for the examination of water and wastewater, 21° Edition SM 4500-P-E. 2005
6	Nitrógeno total	mg/L	50	Standard Methods for the examination of water and wastewater, Ed. 21 cap. 4500 B B. 2005

Fuente: MINAM, 2009

2.2.2.3. Valores Máximos Admisibles (VMA)

En el Decreto Supremo N°021-2009-VIVIENDA se describió los Valores Máximos Admisibles (VMA), como aquel valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físico y/o químicos que caracterizan un efluente no domestico que va a ser descargado en la red de alcantarillado sanitario.

Y que, si su valor es excedido en sus parámetros aprobados, causa daño inmediato o progresivo sobre las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias y equipos de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales. Teniendo influencias negativas en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

Los VMA son de ámbito nacional y obligatorio cumplimiento para toda persona natural o jurídica que realice descargas de agua residual no doméstica en los sistemas de alcantarillado de la red pública. A continuación, se muestran los valores máximos admisibles en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas

PARÁMETRO	UNIDAD	EXPRESIÓN	VMA PARA DESCARGAS
			AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	DBO ₅	500
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	DQO	1000
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	S.S.T.	500
Aceites y grasas	mg/L	A y G	100

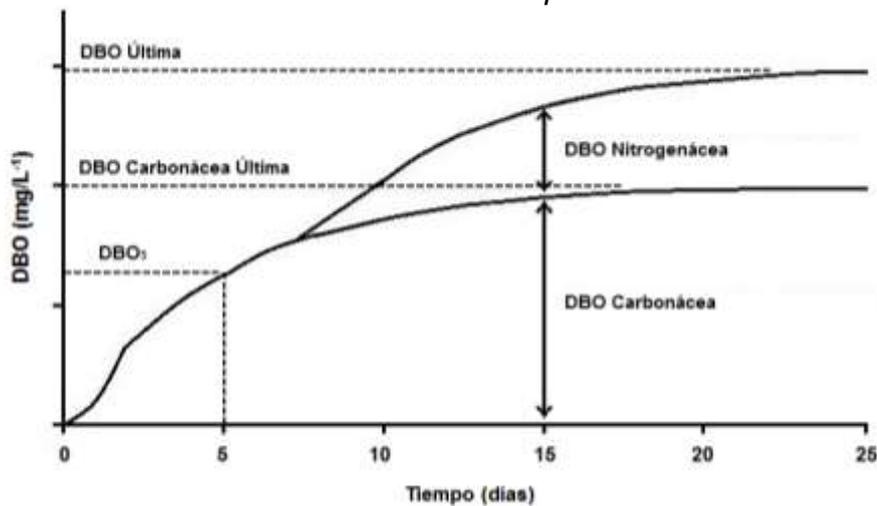
Fuente: D.S. N° 010-2019-VIVIENDA, 2019

2.2.3. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La DBO está definida como el alto contenido de materia orgánica presente en un efluente que favorecerá el crecimiento de microorganismos, los cuales degradarán la materia orgánica bajo condiciones aerobias, es decir, que requerirán de la presencia de oxígeno para que la materia orgánica sea degradada y así pierda sus propiedades contaminantes (Raffo y Ruiz, 2014).

Medina y Peralta (2015), expresaron que a mayor cantidad de materia orgánica que este contenida en un efluente, mayor será la cantidad de oxígeno que necesitarán los microorganismos para oxidarla o degradarla.

Figura 4. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de aguas residuales en función del tiempo.



Fuente: Biochemical Oxygen Demand, Penn et al, 2003.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5):**

Flores y Lozano (2013), expresaron que: “La DBO a cinco días (DBO_5) es considerada como el parámetro de mayor importancia en el estudio del tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación”.

Su importancia nace en que permite medir la cantidad total de oxígeno que es consumida por los microorganismos durante los primeros cinco días de la biodegradación de la materia orgánica.

- **Fórmula para calcular la DBO₅:**

La DBO₅ en proporciones a la cantidad de oxígeno se determina de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$DBO_5 = \frac{(V_f - V_i) \times N \times E_q \times 1000}{V}$$

Donde:

V_f: Volumen de la muestra consumido después de 5 días.

V_i: Volumen de la muestra consumido en el primer día.

N: Normalidad del oxígeno.

E_q: Equivalente químico del oxígeno

- **Factores más importantes que afectan la DBO₅:**

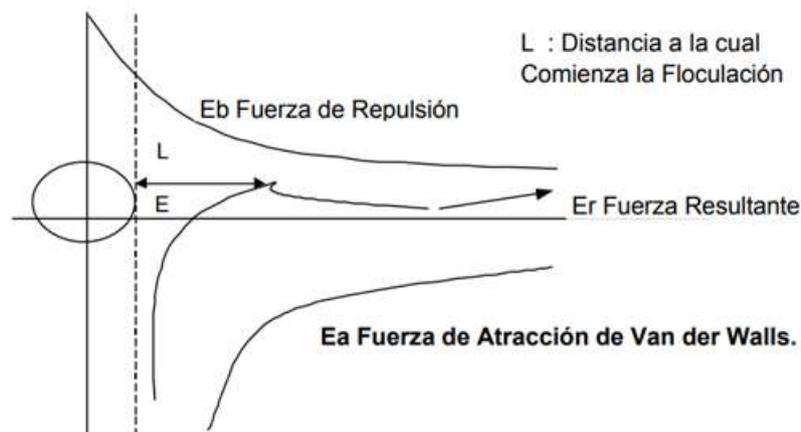
- **pH:** Antes de inocular el agua de dilución, se debe tener especial cuidado en ajustar el pH del agua residual al rango de 6.5 a 7.5 para obtener valores confiables de la DBO, debido a que los microorganismos se desarrollan mejor o sobreviven en condiciones de pH neutro.

- **Temperatura:** El incremento de temperatura acelera los procesos bacteriológicos y la tasa de utilización del oxígeno. Es decir, que la tasa de velocidad de la reacción biológica, está en función de la temperatura.

2.2.4. Coagulación química del agua

Aguilar (2015), expresa que la coagulación química del agua se refiere a la desestabilización química de las partículas coloidales, mediante la neutralización de las fuerzas de repulsión electrostática que mantienen separadas a las partículas coloidales, de esta manera las partículas se unirán y darán lugar a la formación de flóculos o precipitados, para que este proceso ocurra debido a la adición de un coagulante químico (electrolito), generalmente son sales de aluminio y de hierro.

Figura 5. Fuerzas de atracción y repulsión



Fuente: Jaramillo, 2012

La coagulación química es el resultado de dos fenómenos:

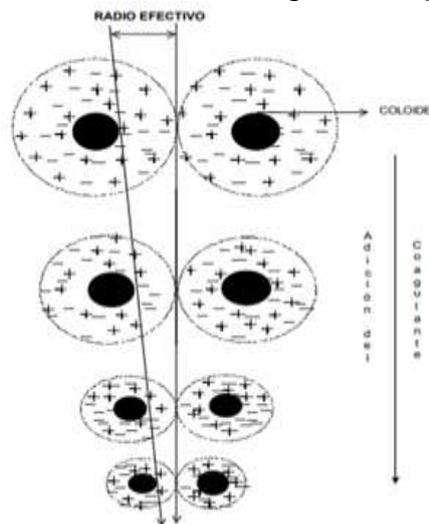
- **Fenómeno esencialmente químico:** consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.
- **Fenómeno fundamentalmente físico:** consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua.

El proceso de coagulación se lleva a cabo en periodos de tiempos muy cortos (desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos), de acuerdo con las características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, entre otros.

Este proceso se lleva a cabo en una unidad de tratamiento denominada mezcla rápida, en donde las partículas chocan entre sí, se aglomeran y forman otras mayores (flóculos), las cuales pueden ser removidas con mayor eficiencia por los procesos de sedimentación, flotación o filtración rápida. (Pantoja, 2014)

En la Figura 6 se observa que la adición de un coagulante neutraliza las cargas, produciendo un colapso de la "nube de iones" que rodean los coloides, de modo que puedan aglomerarse.

Figura 6. Proceso de coagulación química



Fuente: Aguilar, 2015

2.2.4.1. Factores que influyen en el proceso de coagulación

Aguilar (2015), afirmo que los factores más importantes que influyen en el proceso de coagulación son:

- **Influencia del pH:** es un factor crítico en el proceso de coagulación. Se debe de trabajar en un intervalo de pH óptimo, que coincide con el mínimo de solubilidad de los iones metálicos del coagulante utilizado, ya que de lo contrario se podría dar un desperdicio de productos químicos y un descenso del rendimiento de la planta de tratamiento.

- **Influencia de la agitación rápida de la mezcla:** Para que la coagulación sea óptima, la neutralización de los coloides debe ser total antes de que comience a formarse el floculo o precipitado. Por lo que es necesario que el reactivo empleado se difunda con la mayor rapidez posible, ya que el tiempo de coagulación es muy cortó.

- **Influencia de la dosis del coagulante:** se requiere de una dosis óptima de coagulante, que permita obtener mejores resultados en la remoción de turbiedad y de contaminantes presentes en el agua. Muy poca coagulante y alta cantidad del mismo ocasiona problemas en la formación de flóculos y disminuyen la eficiencia de la coagulación.

- **Influencia de la turbiedad:** La turbiedad es un parámetro muy importante de la coagulación química ya que para cada turbiedad existe una dosis de coagulante en la cual se obtiene una turbiedad residual más baja.

- **Influencia de la temperatura del agua:** La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de

las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación.

2.2.5. Floculación química del agua

Una vez realizada la coagulación del agua, se necesita una agitación relativamente lenta, la cual se realiza dentro del floculador, donde se produce la captación mecánica de las partículas neutralizadas, consiguiendo un aumento considerable del tamaño y la densidad de las partículas coaguladas, aumentando la velocidad de sedimentación de los flóculos, a este proceso se le denomina floculación. (Jaramillo, 2012)

Barboza (2011), menciona que los objetivos básicos de la floculación son:

- Reunir los microflóculos para formar partículas mayores con peso específico superior al agua.
- Compactar el flóculo (disminuyendo su grado de hidratación) para producir una baja concentración volumétrica, que permita una alta eficiencia en la fase de separación (sedimentación – filtración).

2.2.5.1. Factores que influyen en el proceso de floculación

Para Jaramillo (2012), los factores más importantes que influyen en el proceso de floculación son:

- ***Influencia de la coagulación previa:*** Lo más perfecta posible.

- ***Influencia de la Agitación lenta y homogénea:*** La agitación lenta de la mezcla favorece la unión entre los flóculos. Un mezclado demasiado intenso llegaría a romper los flóculos ya formados.
- ***Influencia de la temperatura del agua:*** La influencia principal de la temperatura en la floculación es su efecto sobre el tiempo requerido para una buena formación de flóculos. Generalmente, temperaturas bajas dificultan la clarificación del agua, por lo que se requieren periodos de floculación más largos o mayores dosis de floculante.

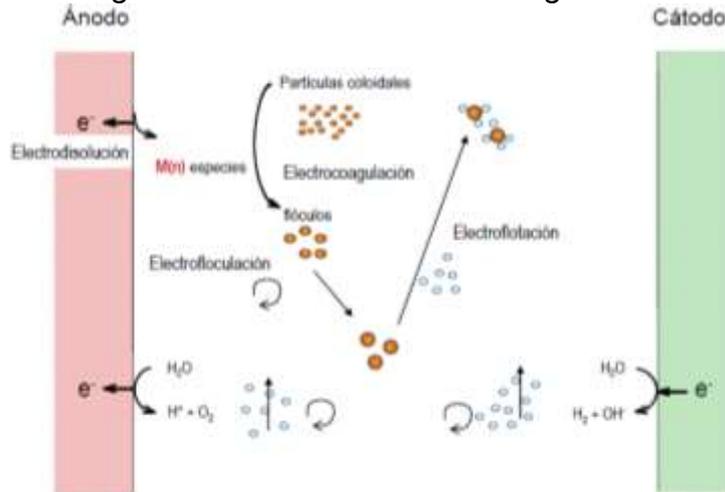
2.2.6. Electrocoagulación del agua

La electrocoagulación es un proceso de tratamiento óptimo para las aguas residuales con alta carga de DQO, DBO y metales.

Las cargas contaminantes se encuentran suspendidas en el agua residual, donde son removidas por inducción de corriente eléctrica a través de electrodos de diversos materiales (aluminio, cobre, hierro o grafito), que se encuentran sumergidos en el medio de la fase acuosa. (Paitan y Sifuentes, 2018)

La corriente eléctrica proporciona la fuerza automotriz que provoca diversas reacciones químicas que estimulan la formación de componentes hidrofóbicos, que precipitan junto con los contaminantes (coagulación-floculación), causado por la formación de partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionantes (o solubles), que serán fácil de remover. (Barboza, 2011)

Figura 7. Proceso de Electrocoagulación



Fuente: Martínez, 2007

La presencia de los electrodos en el agua residual, mediante el principio de electrólisis, genera el desprendimiento de hidrógeno y oxígeno gaseoso y que, gracias a la presencia de sales en disolución, posibilitan la conducción de electricidad. Estos gases ascienden a la superficie provocando que:

- El electrodo se desprenda, evitando que se genere oxido.
- La nata que se forma por la sedimentación será desestabilizadas y arrastradas a la superficie.
- Se genera burbujas de gas que provocan la desestabilización de las partículas que se generaron por la corriente eléctrica.

A diferencia de la coagulación química, en la electrocoagulación no se requerirá la adición de un agente químico como coagulante para remoción de los contaminantes, puesto que el coagulante será formado durante el mismo proceso, esto debido a la disolución de iones que generaran los electrodos durante las reacciones, principalmente el electrodo de sacrificio. (Paitan y Sifuentes, 2018)

2.2.6.1. Ventajas de la electrocoagulación

- i. Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros.
- ii. Requiere de equipos simples y de fácil operación.
- iii. Elimina los usos de productos químicos.
- iv. Genera lodos más compactos y en menor cantidad.
- v. Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contendrá menos agua ligada.
- vi. Alta efectividad de remoción en un amplio rango de contaminantes.
- vii. Purifica el agua y permite su reciclaje.
- viii. El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.
- ix. Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.
- x. El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, lo que disminuye los costos de tratamiento, en caso sean reusados.
- xi. Genera aguas potables, incoloras e inodoras.
- xii. Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad.

2.2.6.2. Desventajas de la electrocoagulación

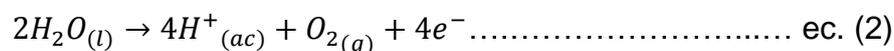
- i. Es necesario que se repongan los electrodos de sacrificio.
- ii. Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.

- iii. Podría ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto.
- iv. No será efectivo en la remoción de DBO soluble, proveniente de solventes y anticongelantes.
- v. El óxido formado en el ánodo podrá formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

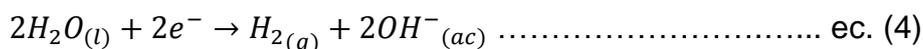
2.2.6.3. Reacciones involucradas en la electrocoagulación

En una celda simple de electrocoagulación donde solo hay un ánodo y un cátodo los cuales son hechos de un metal M, se presentan en general las siguientes reacciones electroquímicas. (Barboza, 2012)

En el ánodo se presentan las siguientes reacciones de oxidación:



En el cátodo se presentan las siguientes reacciones de reducción:



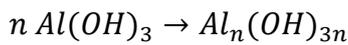
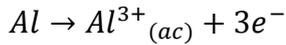
- **El aluminio:**

La disolución del ánodo produce especies como Al^{3+} , $Al(OH)_2^+$ los cuales producen espontáneamente los respectivos hidróxidos o polihidróxidos; estos dependen del pH de la solución iónica. Los hidróxidos y polihidróxidos formados en estas reacciones electroquímicas tienen una gran afinidad por partículas dispersas

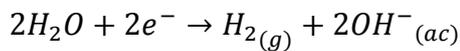
e iones, lo que permite la coagulación. Y los gases formados son los que realizan la flotación del material coagulado.

A continuación, se muestra el mecanismo general:

En el ánodo:

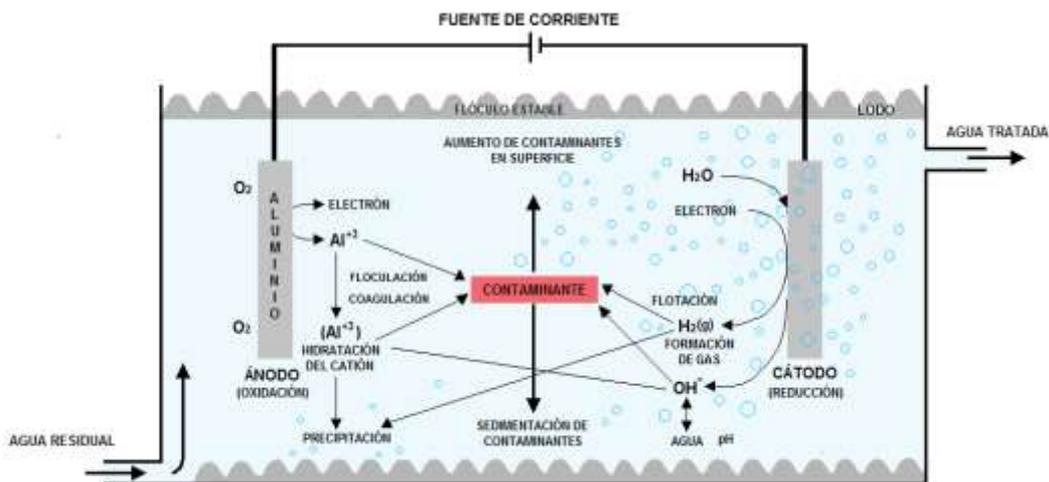


En el cátodo:



Los iones Al^{3+} en combinación con los OH^{-} reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $Al(OH)_2^{+}$, y otras poliméricas tales como $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al^{-}(OH)_{17}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ y $Al_{13}O_4(OH)_{34}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $Al(OH)_{3(S)}$, como se muestra en la reacción de ánodo. El $Al(OH)_{3(S)}$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso.

Figura 8. Interacciones en el Reactor de Electrocoagulación



Fuente: Holt, Barton & Mitchell (2005).

2.2.6.4. Factores que afectan la electrocoagulación

– **Influencia de la Conductividad:** Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado. La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o CaCl₂ genera un aumento en la conductividad del agua residual. Además, se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO₃⁻ y SO₄⁼, pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca⁺² y Mg⁺² produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl⁻ alrededor del 20%. (Barboza, 2012)

– **Influencia de la Temperatura:** Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, punto donde se hace máxima para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuido al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo. (Barboza, 2012)

– **Influencia del pH:** El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. El pH durante el proceso puede incrementarse

para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH, e incluso este rango puede ser amplio. En términos generales las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7. Ejemplos de esta situación se pueden ver en la remoción de arsénico en aguas de consumo, donde el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da en pH entre 6 y 8, y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil se dan en un pH de 7. Las reacciones que se dan durante el proceso de electrocoagulación le dan al medio acuoso capacidad buffer. Especialmente en aguas residuales alcalinas, esta propiedad previene grandes cambios de pH, con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH. (Barboza, 2012)

– ***Influencia de la Densidad de Corriente:*** Como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual y están ligados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio. La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso. El suministro de

corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierros Fe^{+2} , liberados por los respectivos electrodos. En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura. La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción. (Barboza, 2012)

2.3. Definición de términos básicos

- **Afluente:** Agua u otro líquido que ingresa a un reservorio, planta de tratamiento o proceso de tratamiento. (Norma Técnica de Edificación OS.090, 2006)
- **Agua potable:** Agua limpia y libre de microorganismos patógenos que al consumida por la población humana o animal no produce efectos nocivos para la salud y reúne los requisitos físicos químicos y bacteriológicos establecidos por las autoridades competentes. (D.S. N°015-2012-AG)
- **Agua residual:** Se considera aguas residuales a los líquidos cuyas características han sido modificadas por las actividades antropogénicas (domésticas,

comerciales, industriales y de servicios), y que por su calidad requieren un tratamiento previo antes de vertidas a un cuerpo de agua. (R.J. N° 224-2013-ANA)

– **Agua tratada:** Toda agua sometida a procesos físicos, químicos y/o biológicos para convertirla en un producto inocuo para el consumo humano. (Norma Técnica de Edificación OS.090, 2006)

– **Aturdimiento:** Métodos de procedimientos mecánico y eléctrico que provoca la pérdida inmediata de conocimiento. (D.S. N°015-2012-AG)

– **Catión:** Un catión tiene menos electrones que protones y se siente atraído por una carga negativa. (Pérez, 2018)

– **Coagulante:** Electrolito simple, usualmente sal inorgánica, que contiene un catión multivalente de hierro, aluminio o calcio. Se usa para desestabilizar las partículas coloidales favoreciendo su aglomeración. (Norma Técnica de Edificación OS.090, 2006)

– **Conductividad:** Es una variable que se controla en muchos sectores, desde la industria química a la agricultura. Depende de la cantidad de sales disueltas presentes en un líquido y es inversamente proporcional a la resistividad del mismo. Un aumento en la conductividad eléctrica genera un incremento en la densidad de corriente cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación. (Betancourt y Domínguez, 2013)

– **Densidad de corriente:** Son las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual. (Betancourt y Domínguez, 2013)

– **Dilución:** Es el procedimiento que se sigue para preparar una disolución menos concentrada a partir de una más concentrada, y consiste simplemente en añadir más solvente. (Betancourt y Domínguez, 2013)

- **Efluente:** Líquido que sale de un proceso de tratamiento. (Norma OS.090 plantas de tratamiento de aguas residuales, 2006)
- **Electrodo:** Un conductor que emite y recoge los electrones en una célula o válvula. (Pérez, 2018)
- **Escaldado:** Consiste en la introducción de los animales sacrificados, en agua caliente para el descerado y el depilado. (D.S. N°015-2012-AG)
- **Evisceración:** Consiste en la extracción de las menudencias contenidas en las cavidades torácica, abdominal y bucal de las especies de animales considerados aptos para el consumo humano. (D.S. N°015-2012-AG)
- **Faenado:** Procedimiento que se inicia desde la insensibilización de los animales de abasto hasta el sellado de la inspección post-mortem, obtenidas para el consumo humano. (D.S. N°015-2012-AG)
- **Matadero:** Establecimiento autorizado por el SENASA con características higiénico-sanitarias apropiadas para realizar actividades de faenado de animales de abasto (D.S. N°015-2012-AG)
- **pH:** Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O]^+$ presentes en determinadas disoluciones. (Betancourt y Domínguez, 2013)
- **Sangre y Grasas:** Son residuos que se producen durante la fase de beneficio de los pollos, estos contienen elevadas concentraciones de materia orgánica biodegradable. (Pérez, 2018)
- **Temperatura:** Es una variable física que influye totalmente en la calidad del agua, este parámetro es muy importante para una serie de tratamientos químicos biológicos y una serie de análisis. (Pérez, 2018)

CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

3.1. Modelo de solución propuesto

El presente trabajo se realizó en el laboratorio de Biología de la Facultad de Ingeniería y Gestión de la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur.

Para realizar las corridas o pruebas experimentales de remoción de contaminantes en las aguas residuales, se utilizó el método electroquímico de electrocoagulación, utilizando dos electrodos de aluminio los cuales funcionaron como ánodo y cátodo en una celda electroquímica denominada Reactor Batch.

Figura 9. Sistema de electrocoagulación

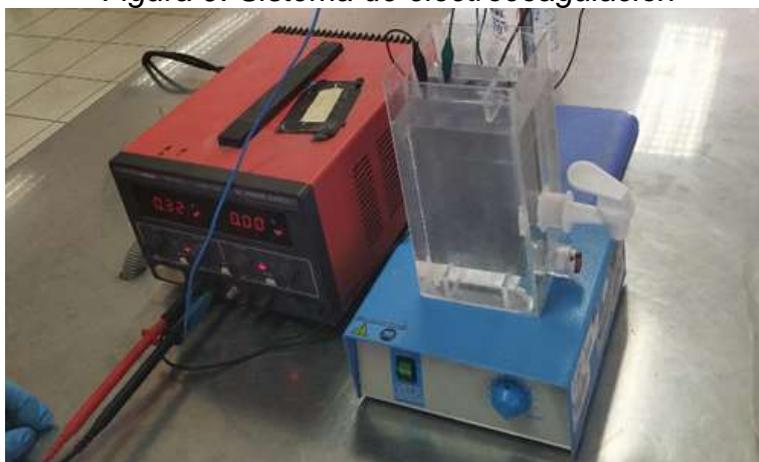


Tabla 5. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES
<p>PROBLEMA GENERAL:</p> <p>¿Cuánto se reducirá la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) de las aguas residuales del mercado Ciudad de Dios en San Juan de Miraflores mediante la electrocoagulación?</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS:</p> <p>PE1: ¿Cuáles es la DBO₅ inicial del agua residual del mercado ciudad de Dios en San Juan de Miraflores?</p> <p>PE2: ¿Cuál es la densidad de corriente optima que obtenga la mayor reducción de la DBO₅?</p> <p>PE3: ¿Cuál es el tiempo de reacción óptimo que favorezca la mayor reducción de la DBO₅?</p> <p>PE4: ¿Como la dilución de carga orgánica de un camal influye en la reducción de la DBO₅?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL:</p> <p>Reducir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) de las aguas residuales del mercado Ciudad de Dios en San Juan de Miraflores mediante la electrocoagulación.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS:</p> <p>OE1: Determinar la DBO₅ iniciales del agua residual del mercado ciudad de Dios en San Juan de Miraflores.</p> <p>OE2: Determinar la densidad de corriente optima que obtenga la mayor reducción de la DBO₅.</p> <p>OE3: Determinar el tiempo de reacción optimo que favorezca la mayor reducción de la DBO₅.</p> <p>OE4: Determinar si la dilución de carga orgánica de un camal influye en la reducción de la DBO₅.</p>	<p>HIPOTESIS GENERAL:</p> <p>La tecnología de la electrocoagulación reducirá significativamente la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) de las aguas residuales del mercado Ciudad de Dios en Juan de San de Miraflores.</p> <p>HIPOTESIS ESPECÍFICOS:</p> <p>HE1: La DBO₅ iniciales del agua residual del mercado ciudad de Dios en San Juan de Miraflores excederán los valores máximos admisibles.</p> <p>HE2: Si La densidad de corriente es mayor, entonces se obtendrá mayor reducción de la DBO₅.</p> <p>HE3: Si el tiempo de reacción aumenta, entonces esto favorecerá la mayor reducción de la DBO₅.</p> <p>HE4: El tipo de dilución de carga influye en la mayor reducción de la DBO₅.</p>	<p>$Y = F(X_1, X_2, X_3)$</p> <p>X₁= Densidad de corriente</p> <p>X₂= Tiempo de reacción</p> <p>X₃= Carga orgánica</p> <p>Y = Reducción de DBO₅ mediante la Electrocoagulación</p>	<p>Densidad de corriente (mA/cm²) 30 - 50</p> <p>Tiempo de reacción (minutos) 20min -30min</p> <p>Dilución 0.4 – 1.0</p>

3.1.1. Diseño de investigación

El diseño utilizado en la realización de este trabajo de investigación es de tipo experimental porque nos permite entender y determinar mediante pruebas experimentales de laboratorio, la manipulación de las variables independientes de ingreso (tiempo de reacción, densidad de corriente y dilución de la muestra) y el efecto que tiene en la respuesta de la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno.

El trabajo de investigación experimental tiene un nivel alto y bajo, que permite estudiar la mayor cantidad de variables de alta correlación con el proceso de electrocoagulación mediante el diseño factorial fraccionado.

3.1.2. Metodología de análisis estadístico

3.1.2.1. *Diseño factorial*

Un diseño factorial es un tipo de experimento diseñado que permite estudiar los efectos que varios factores pueden tener en una respuesta, además de identificar todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento.

El número total de experimentos a llevarse a cabo viene definido por la relación:

$$\mathbf{N^{\circ} pruebas = m^n}$$

Dónde:

m: Representa los niveles.

n: Representa a las variables independientes

En el presente trabajo experimental se realizó el **diseño factorial fraccionado** 2^{3-1} es decir se realizaron 2^2 experimentos, lo cual representa una fracción del diseño factorial completo 2^3 . Este diseño nos permite evaluar una mayor cantidad de variables a 2 niveles alto y bajo.

$$\text{N}^\circ \text{ pruebas} = 2^{3-1}$$

Tabla 6. Características del diseño fraccionado

Diseño factorial fraccionado					
Resumen del diseño					
Factores:	3	Diseño de la base:	3;4	Resolución:	III
Corridas:	12	Replicas:	3	Fracción:	1/2
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0		

La estructura de alias, también conocida como confusión, describe el patrón de confusión que ocurre en diseños factoriales fraccionados, debido a que estos tipos de diseños no incluyen todas las combinaciones de niveles de factores.

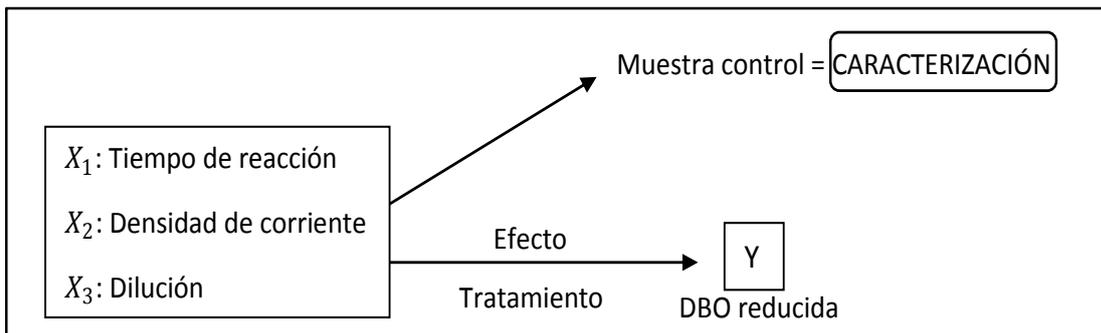
Tabla 7. Estructura de alias

Estructura de alias
I + ABC
A + BC
B + AC

3.1.2.2. Selección de factores

Para el proceso de electrocoagulación se consideraron los factores de tiempo de reacción, densidad de corriente y dilución, para ser evaluados durante el proceso, para la reducción de la DBO₅ de las aguas residuales del mercado Ciudad de Dios.

Figura 10. Identificación de variables



– **Tiempo de reacción:** se ha comprobado que el tiempo de reacción tiene mayor influencia en el proceso de electrocoagulación sobre otras variables, teniendo una alta remoción de materia orgánica entre los valores de 10 a 30 minutos. A mayor tiempo de reacción la producción de lodos es más compacto con menor porcentaje de agua, de igual manera la espuma producto del ascenso de contaminantes. Sin embargo, durante la operación se requiere de una agitación constante, para mover los iones de aluminio que contiene el agua residual que migran desde el electrodo (ánodo), así como evitar la sedimentación durante el proceso. La variación del tiempo influye directamente en la cantidad de sólidos formados. (Aguilar, 2015)

– **Densidad de corriente:** esta variable es fundamental en el proceso de electrocoagulación, debido a que determina la cantidad de iones Al^{+3} que migraran al reactor desde los electrodos. A una mayor densidad de corriente, mayor será la concentración de iones metálicos, esto aumenta la conductividad del reactor. Los parámetros que influyen sobre la densidad de corriente son a temperatura del agua y pH. (Poma y Quispe, 2018)

La energía eléctrica será suministrada mediante una fuente de poder de voltaje y amperaje variable con la finalidad de mantener la densidad de corriente constante entre los avalores de 30 y 50 amp/m^2 .

Formula de densidad de corriente (δ):

$$\delta = \frac{I}{S} \left(\frac{Amp}{m^2} \right)$$

Donde:

δ = densidad de corriente

S = superficie de contacto

I = intensidad de corriente

La intensidad de corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia, por lo tanto, para mantener una densidad de corriente constante se fijará como constante el amperaje esto demanda regular el voltaje para mantener la intensidad de corriente constante.

Área del electrodo de aluminio (2 caras): $(15cm \times 7,5cm) \times 2 = 225 \text{ cm}^2$

Para 30 amp/m^2 se necesita constante 0,675 amperios

Para 50 amp/m^2 se necesita constante 1,125 amperios

– **Dilución de la carga orgánica:** Para cuantificar la forma en la que es diluida la carga orgánica en las aguas residuales del mercado ciudad de dios, se procedió a analizar los procesos que ejecutan en la obtención del producto denominado “pollo pelado fresco”

A continuación, se muestran los procesos identificados durante la toma de muestra:

Tabla 8. Detalle de los procesos en el camal del Mercado Ciudad de Dios

Proceso	Detalle
Recepción y descarga	Se recibe las jabas de pollo vivo y se trasladan al área de matadero donde cada puesto recibe un lote de jabas.
Aturdimiento	El aturdimiento se lleva a cabo mediante un golpe en la cabeza de forma que no se produzca la muerte intencional del ave, ya que el corazón debe seguir latiendo para bombear la sangre durante la sangría.
Desangrado	Duración de la sangría es de aproximadamente 3 minutos, la mesa utilizada en este proceso tiene una ligera pendiente, para direccionar la sangre a un pequeño bidón.
Escaldado	Consiste en introducir las aves en agua caliente a una temperatura entre 52°C y 100°C durante un tiempo no mayor a 3 minutos
Pelado	Se realiza la extracción manual de las plumas por parte de los estibadores.
Lavado	Se eliminan los coágulos de sangre, plumas, cabeza y patas del ave.
Eviscerado	Extracción de vísceras no comestibles mediante cortes abdominales. Durante este proceso puede romperse la vesícula biliar y el aparato digestivo, aumentando la contaminación del agua. Las aves se encuentran en ayunas 8 horas aproximadamente. Se extraen menudencias y vísceras comestibles
Despacho	El producto pollo pelado fresco, es enviado a cada uno de los puestos. El proceso de enfriado se lleva a cabo en cada puesto del mercado del giro “Pollos”

Fuente: Adaptado de Guía metodológica para el faenamiento de aves (MINAGRI)

Tabla 9. Clasificación del residuo líquido y su detalle

Proceso	(Residuo _{proceso})	Residuo
Desangrado	(Re _{des})	Se obtiene un residuo líquido con alta carga orgánica producto de la sangría, la temperatura de este residuo esta 28°C aproximadamente y es la principal fuente de materia orgánica.
Escaldado	(Re _{esc})	Residuo liquido de temperatura mayor a 50°C
Pelado	(Re _{pel})	Residuo líquido que contiene cierta cantidad de plumas.
Lavado	(Re _{lav})	Residuo líquido que contiene algunos coágulos de sangre y algunos fragmentos de la carne de pollo que son eliminados.
Eviscerado	(Re _{vis})	El residuo líquido de este proceso puede contener una alta cantidad de microorganismos si se rompen las vísceras del ave.

Estos residuos se van depositando en barriles de aproximadamente 0.92 m³, cuyas proporciones en función del volumen del barril es:

$$(Re_{des}) = \frac{1}{5} (\text{Volumen del cilindro}) \dots\dots\dots R1$$

$$(Re_{des} + Re_{esc} + Re_{pel} + Re_{vis}) = \frac{2}{5} (\text{Volumen del cilindro}) \dots\dots\dots R2$$

$$Re_{lav} = \frac{2}{5} (\text{Volumen del cilindro}) \dots\dots\dots R3$$

$$(Re_{des} + Re_{esc} + Re_{pel} + Re_{lav} + Re_{vis}) = 100\% (\text{Volumen del cilindro}) \dots\dots R4$$

Entonces se determinó que los niveles de investigación de la carga orgánica para el tratamiento de electrocoagulación son de la relación R2 y R4, siendo R2 el residuo con mayor presunta carga orgánica se tomara como nivel alto y R4 por

tener mayor cantidad de agua agregada producto del residuo de lavado se tomara como nivel bajo, se obtiene:

+ \longrightarrow *R4 : Carga con mayor dilución*
 - \longrightarrow *R2 : Carga con menor dilución*

Entonces se definieron los parámetros de las variables en la Tabla 10.

Tabla 10. Niveles alto y bajo de los factores

Factores	Nivel bajo (-1)	Nivel alto (+1)
Tiempo de reacción en minutos	20	30
Densidad de corriente <i>mA/cm²</i>	30	50
Dilución de carga orgánica	R2	R4

Se trabajó en el programa de MINITAB el diseño factorial fraccionado con tres replicas, para conocer las posibles combinaciones para realizar las corridas experimentales obteniendo las siguientes combinaciones, a partir del diseño factorial completo mostrado en la Tabla 11.

Tabla 11. Tabla de Diseño factorial completo.

Orden Estadístico	Orden de Corrida	Tiempo	Densidad	Carga Diluida
1	3	-	-	-
2	1	+	-	-
3	7	-	+	-
4	2	+	+	-
5	8	-	-	+
6	4	+	-	+
7	6	-	+	+
8	5	+	+	+

Para la elección de combinaciones de tratamiento, este procedimiento se ejecuta automáticamente en el software MINITAB; sin embargo, es necesario realizar una comprobación de los puntos elegidos, porque se forman dos grupos opuestos y se decidió elegir las combinaciones que contengan la combinación +, +, +.

Se eligió trabajar con el tratamiento de mayor magnitud en tiempo de reacción, densidad de corriente y dilución de carga (+,+,+). Se muestra en la Figura 11 los cuatro puntos elegidos dentro del diseño factorial completo y en la Tabla 12 las combinaciones elegidas.

Figura 11. Puntos elegidos sobre el diseño factorial completo

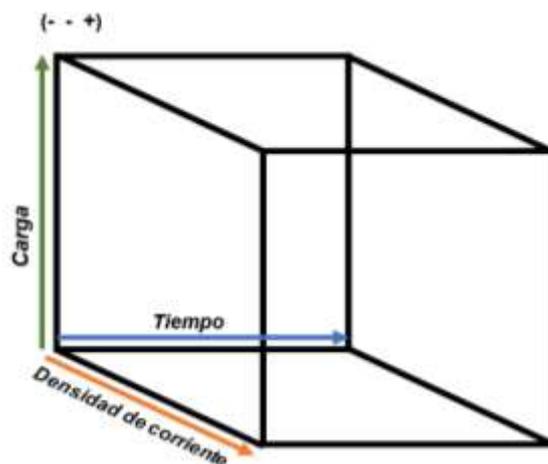


Tabla 12. Grupo de combinaciones que contienen +,+,+.

Grupo	Combinaciones elegidas		
A	-	+	-
B	+	-	-
C	-	-	+
D	+	+	+

Para el desarrollo del trabajo, las muestras de agua residual fueron divididas en 4 grupos y cada grupo se trabajó por triplicado, obteniendo un total de 12

tratamientos, que fueron codificadas según el orden estadístico que se detalla en la Tabla 13.

Tabla 13. Combinación de tratamientos con sus respectivas repeticiones codificadas

Grupo	Combinaciones elegidas			Repeticiones codificadas		
A	-	+	-	TRAT-EC-01	TRAT-EC-05	TRAT-EC-07
B	+	-	-	TRAT-EC-02	TRAT-EC-10	TRAT-EC-11
C	-	-	+	TRAT-EC-03	TRAT-EC-04	TRAT-EC-08
D	+	+	+	TRAT-EC-06	TRAT-EC-09	TRAT-EC-12

De esta manera se corresponde la siguiente relación sobre la combinación de letras para la codificación:

- **TRAT:** Es sometido a tratamiento
- **EC:** El tratamiento es de electrocoagulación
- **Numeral:** Corresponde al orden de corrida estadístico.

Para el caso de la muestra de caracterización se asignó el código: “CARAC-EC-00”

- **CARAC:** Caracterización
- **EC-00:** La muestra no tiene condiciones de tratamiento

Es importante mencionar que, aunque se tienen tratamientos iguales en las repeticiones, el orden de ejecución de las pruebas no es consecutivo para pruebas iguales, esto con la finalidad de que el investigador no aumente el sesgo de error por investigación experimental. Estos errores se pueden producir en algunos procedimientos como el lavado de electrodos, magneto, celda de acrílico, registro de datos para la espuma y registro de las variaciones de voltaje.

En la Tabla 14 se muestra el diseño de investigación completo:

Tabla 14. Diseño factorial fraccionado con 3 réplicas

Código de muestra	Orden Corrida	Tiempo de reacción	Densidad de corriente	Carga diluida	Respuesta % DBO reducido
TRAT-EC-01	1	20	50	0.40	
TRAT-EC-02	2	30	30	0.40	
TRAT-EC-03	3	20	30	1.00	
TRAT-EC-04	4	20	30	1.00	
TRAT-EC-05	5	20	50	0.40	
TRAT-EC-06	6	30	50	1.00	
TRAT-EC-07	7	20	50	0.40	
TRAT-EC-08	8	20	30	1.00	
TRAT-EC-09	9	30	50	1.00	
TRAT-EC-10	10	30	30	0.40	
TRAT-EC-11	11	30	30	0.40	
TRAT-EC-12	12	30	50	1.00	

3.1.2.3. Medición de la respuesta

La respuesta que se obtenga es la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅. Para ello se necesita realizar la siguiente operación:

$$\frac{DBO_{inicial} - DBO_{final}}{DBO_{inicial}} \times 100\%$$

3.1.3. Muestreo

3.1.3.1. Población y muestra

La población está compuesta por el total del agua residual del mercado Ciudad de Dios ubicado en el distrito de San Juan de Miraflores, Lima, Perú.

Las muestras para el tratamiento de electrocoagulación, fueron tomadas desde una reserva cilíndrica (bidón) de 0.92m² del área de matadero denominado “camal” del mercado de Ciudad de Dios. Se requirieron en total 10 litros de la muestra R2 y 10 litros de la muestra R4. Los cuales fueron posteriormente tratadas en el Laboratorio de Biología y Microbiología de la UNTELS. Los requisitos para la toma de muestras de agua y preservación se indican en la Tabla 15.

Tabla 15. Extraído de Protocolo Nacional para el monitoreo de Calidad de los Recursos Hídricos

PARÁMETRO	UNIDAD	EVALUACIÓN	RECIPIENTE	VOLUMEN MÍNIMO DE MUESTRA	PRESERVACIÓN	ALMACENAMIENTO MÁX. RECOMENDADO
Ph	Unidad	In situ	P, V	50 mL	Análisis inmediato	-
Temperatura	°C	In situ	P, V	1000 mL	Análisis inmediato	-
Conductividad Eléctrica	mS	Ex situ	P, V	500 mL	Refrigerar	28 d
Demanda Bioquímica de oxígeno DBO	mgO ₂ /L	Ex situ	P, V	1000 mL	Refrigerar a 4°C	48 horas
Aluminio	mg/L	Ex situ	P, V	500 mL	Para metales disueltos filtrar, adicionar HNO ₃ pH p<2	6 meses

Fuente: Protocolo Nacional para el monitoreo de Calidad de los Recursos Hídricos, 2016

3.1.3.2. Unidad de Análisis

La unidad de análisis está conformada por las muestras puntuales de las aguas residuales del área de procesamiento de productos cárnicos del mercado ciudad de Dios, del distrito de San Juan de Miraflores, para ser utilizadas en el tratamiento mediante el sistema de electrocoagulación.

En el sistema de electrocoagulación se tiene un reactor tipo de operación Batch con capacidad para tratar 1300 mL de agua residual del mercado Ciudad de Dios. El reactor estará provisto de dos electrodos de aluminio (dimensiones: 7.5cmx15cm) separadas a una distancia de 10 mm, regulada por una fuente de poder con voltaje y amperaje variable.

Figura 12. Reactor Tipo Batch, separación entre placas de 10mm



3.1.3.3. *Materiales y Equipos*

Tabla 16. *Materiales y equipos para la toma de muestra*

Materiales	Equipos
Envases de plástico pavonado de 1 L de capacidad	Multiparámetro Hanna
Galonerías de 20 L de capacidad	Sonda de temperatura
Guantes de látex	Sonda de conductividad
Mascarillas de nitrilo descartables	Sonda de pH
Jarra de plástico de 1 L	
Papel tisú	
Pipeta	
Beaker de 50, 100 y 200 mL	
cooler 20 L	
Agua destilada	

3.1.4. Metodología para el tratamiento de Electrocoagulación

3.1.4.1. Construcción de la celda de electrocoagulación

La celda de electrocoagulación fue diseñada como un reactor tipo Batch a escala laboratorio con capacidad de tratar 1 300 mL de agua residual, cuya forma es de un paralelepípedo rectangular con dimensiones de 19 cm de altura, 9,5 cm de largo y 9,5 cm de ancho.

El material utilizado en la fabricación de la celda fue de acrílico transparente con finalidad de poder apreciar con claridad los procesos físicos químicos que puedan presentarse en el agua residual durante el proceso de electrocoagulación.

Dentro de la celda se sumergieron los electrodos de aluminio, que están conectados a una fuente de poder la cual suministra la corriente para el proceso de electrocoagulación, en una primera etapa se utilizó una fuente de poder de voltaje 12 - 24 voltios y de 3 amperios constantes. Para las pruebas definitivas se utilizó una fuente de poder de voltaje y amperaje variable, 0 - 32 voltios y de 0 - 5 amperios permitiendo establecer las condiciones de cada tratamiento.

Figura 13. Celda de electrocoagulación tipo Batch



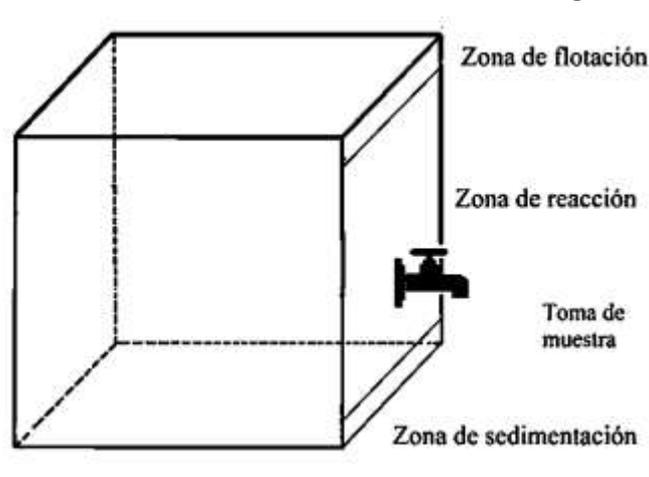
Los espaciamientos entre las placas varían cada 10 mm y la limpieza de la celda es después de cada prueba.

El agua residual se llenó hasta la altura de 17cm dejando un espacio libre para la acumulación de espuma en la parte superior. La celda se diseñó con un criterio de generar 3 zonas principales las cuales se les denominó de la siguiente manera:

- **Zona de flotación:** donde se acumulan los lodos producto de la flotación.
- **Zona de reacción:** donde están sumergidos los electrodos y se produce el proceso de electrocoagulación.
- **Zona de sedimentación:** donde precipitan los lodos sedimentables.

Adicionalmente a esto se instaló un caño para tomar muestras, para esto se prefirió utilizar un caño de plástico el cual permita tomar más fácilmente las muestras a analizar, como se aprecia en la Figura 14.

Figura 14. Zonas de la celda de electrocoagulación



Fuente: Adaptado de Aguilar, 2015 “Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el Tratamiento de agua”

3.1.4.2. Recolección de muestras de agua residual

Estas muestras fueron obtenidas de uno de los 20 módulos donde se realizan las operaciones de desangrado, escaldado, pelado, lavado y eviscerado.

Por su naturaleza se considerará como unas muestras puntuales de las aguas residuales del mercado “Ciudad de Dios”, de carácter dirigido debido a que se toma solo 2 muestras de agua escogidos al azar sin considerar la varianza entre los días de la semana ni el horario en el que se realiza.

Para la toma de muestra del agua residual se consideró las siguientes especificaciones técnicas mencionadas en el Protocolo Nacional para el monitoreo de Calidad de los Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua (RJ-010-2016-ANA):

- Los frascos fueron debidamente lavados, desinfectados y enjuagados con agua destilada.
- Se evitó la agitación y formación de burbujas de los frascos contenidos con la muestra agua residual.
- La muestra se analizó en un plazo no mayor de 24 horas, ver Anexo 9.
- Por el volumen de la muestra de agua residual se utilizó dos galoneras de 20 litros aproximadamente.

3.1.4.3. Caracterización de las aguas residuales

La caracterización se llevó a cabo por el investigador, ver certificado en Anexo 1.

- *Determinación de pH:* la medición de pH se realizó mediante un pH-metro digital portátil debidamente calibrado con solución tampón pH 4, pH 7 y pH 10.

– *Determinación de temperatura:* la temperatura se realizó con un termómetro digital.

Se colocaron 10 de litros de muestra puntual del residuo líquido R2 y 10 litros de muestra puntual del residuo líquido R4:

$$\text{Muestra Puntual (R2 : 0.4)} \rightarrow (Re_{des} + Re_{esc} + Re_{pel} + Re_{vis}) = 10 \text{ litros}$$

$$\text{Muestra Puntual (R4: 1.0)} \rightarrow (Re_{des} + Re_{esc} + Re_{pel} + Re_{lav} + Re_{vis}) = 10 \text{ litros}$$

Adicional a esto se recogió una muestra para conocer las características iniciales de DBO_5 del residuo líquido de mayor carga orgánica R1, en una botella debidamente etiquetada.

3.1.4.4. Procedimiento del tratamiento de Electrocoagulación

El proceso experimental de la presente investigación se detalla a continuación:

1. Se procedió a limpiar los instrumentos en el laboratorio de biología.
2. Se instaló los equipos de agitación magnética (base), fuente de poder PRASEK (lado), multímetro conectado a la salida de la fuente de poder, además de un soporte universal por donde los cables pasaron y colgaron por encima de la celda, con los electrodos instalados.
3. Se colocó un fijador de acrílico para fijar los electrodos con una separación de 10mm, los electrodos fueron dos de Aluminio, considerados como ánodo (-) y cátodo (+).
4. Los electrodos se conectaron a la fuente de poder y multímetro en simultaneo con ayuda de los cocodrilos. Y se colocó el magneto dentro de la celda.

5. Se contaron con 6 celdas de electrocoagulación, por lo que se tuvo que reutilizar cada celda 2 veces para completar las 12 repeticiones o tratamientos.

6. Se inició con los tratamientos, asegurándose de lavar bien los electrodos de aluminio, el magneto, la celda de electrocoagulación y limpiar los cables en cada repetición.

7. Durante los tratamientos se recolecto la información de la variación de voltaje para mantener el amperaje constante, para conseguir una densidad de corriente constante. Y se registraron los datos de la altura de la espuma de cada tratamiento.

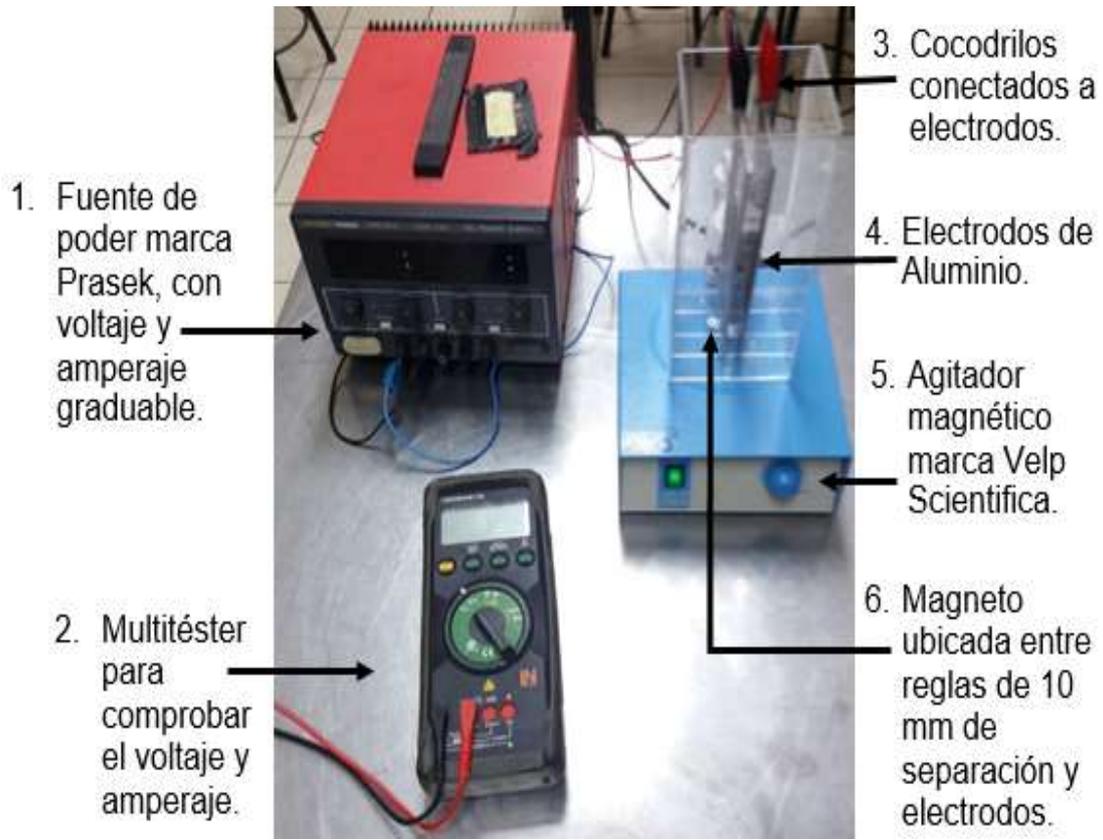
8. Después de cada tratamiento, se dejó sedimentar las muestras de agua tratada por 1 hora. Luego las muestras fueron depositadas en botellas debidamente etiquetas.

9. Las botellas se preservaron en refrigeración a 5 °C durante 6 horas aproximadamente.

10. Las botellas con las muestras fueron enviadas al laboratorio R-LAB para el análisis de la DBO_5 . Se realizaron 2 envíos que se detallan continuación:

- Primer envío: consistió en enviar la botella con muestra blanco para la caracterización, junto con las 6 primeras botellas con muestras de agua tratada.
- segundo envío: se enviaron las 6 últimas botellas con muestras de agua tratada restantes.

Figura 15. Reactor tipo Batch acoplado a multítester y multímetro, para el control operacional de la densidad de corriente



3.2. Resultados

Los tratamientos realizados corresponden a la hipótesis general:

“La tecnología de la electrocoagulación reducirá significativamente la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) de las aguas residuales del mercado Ciudad de Dios en Juan de San de Miraflores”.

Tabla 17. Resultados de la experimentación, la respuesta se expresa en porcentaje de remoción del valor inicial de la caracterización

CODIGO	Tiempo	Densidad	Carga Diluida	DBO ₅	Respuesta (DBO de caracterización: 1725 mg/Lt)
TRAT-EC-01	20	50	0.4	606.00	65%
TRAT-EC-02	30	30	0.4	588.00	66%
TRAT-EC-03	20	30	1.0	205.80	88%
TRAT-EC-04	20	30	1.0	187.20	89%
TRAT-EC-05	20	50	0.4	991.00	43%
TRAT-EC-06	30	50	1.0	105.80	94%
TRAT-EC-07	20	50	0.4	549.00	68%
TRAT-EC-08	20	30	1.0	235.50	86%
TRAT-EC-09	30	50	1.0	100.70	94%
TRAT-EC-10	30	30	0.4	378.00	78%
TRAT-EC-11	30	30	0.4	154.90	91%
TRAT-EC-12	30	50	1.0	110.3	94%

En las Tablas 18, 19, 20, 21 y 22 se muestran los grupos de repeticiones A, B, C, D y sus respectivos promedios de reducción para la DBO₅:

De la Tabla 18 se observa que el valor del tratamiento TRAT-EC-05, puede representar un valor anómalo al conjunto de datos producto de ruido de la interacción del investigador durante la ejecución de las corridas.

Tabla 18. Promedio de repeticiones del grupo A

GRUPO A (- + -)				
Código	Tiempo	Densidad	Carga Diluida	Reducción (Respuesta)
TRAT-EC-01	20	50	0.4	65%
TRAT-EC-05	20	50	0.4	43%
TRAT-EC-07	20	50	0.4	68%
PROMEDIO				59%

En la Tabla 19 se observan valores con una varianza cercana a la media, pero mantienen una distribución normal.

Tabla 19. Promedio de repeticiones del grupo B

GRUPO B (+ - -)				
Código	Tiempo	Densidad	Carga Diluida	Reducción (Respuesta)
TRAT-EC-02	30	30	0.4	66%
TRAT-EC-10	30	30	0.4	78%
TRAT-EC-11	30	30	0.4	91%
PROMEDIO				78%

Mientras que en la Tabla 20 se observan valores homogéneos con respecto a su media de 88%

Tabla 20. Promedio de repeticiones del grupo C

GRUPO C				
Código	Tiempo	Densidad	Carga Diluida	Reducción (Respuesta)
TRAT-EC-03	20	30	1.0	88%
TRAT-EC-04	20	30	1.0	89%
TRAT-EC-08	20	30	1.0	86%
PROMEDIO				88%

Tabla 21. Promedio de repeticiones del grupo D

GRUPO D				
Código	Tiempo	Densidad	Carga Diluida	Reducción (Respuesta)
TRAT-EC-06	30	50	1.0	94%
TRAT-EC-09	30	50	1.0	94%
TRAT-EC-12	30	50	1.0	94%
PROMEDIO				94%

Tabla 22. Comparación entre los grupos
A (- + -), B (+ - -), C (- - +), D (+ + +)

Grupo	Reducción	Tiempo	Densidad	Carga Diluida
A	59%	20	50	0.4
B	78%	30	30	0.4
C	88%	20	30	1.0
D	94%	30	50	1.0

Como se puede observar en las Tablas del 18 al 21, los mayores porcentajes de reducción de la DBO₅ corresponden a una densidad de corriente de 50 *amp/m²* y un tiempo de 30 *min*, para la carga mayor diluida. Tomando como referencia, que el valor de la DBO₅ de la caracterización fue 1725 mg/L mostrado en el informe de ensayo N° IE1903106A del laboratorio R-Lab, ver en el Anexo 9.

3.2.1. Resultados obtenidos respecto al Densidad de Corriente

Densidad de Corriente a 30 amp/m²

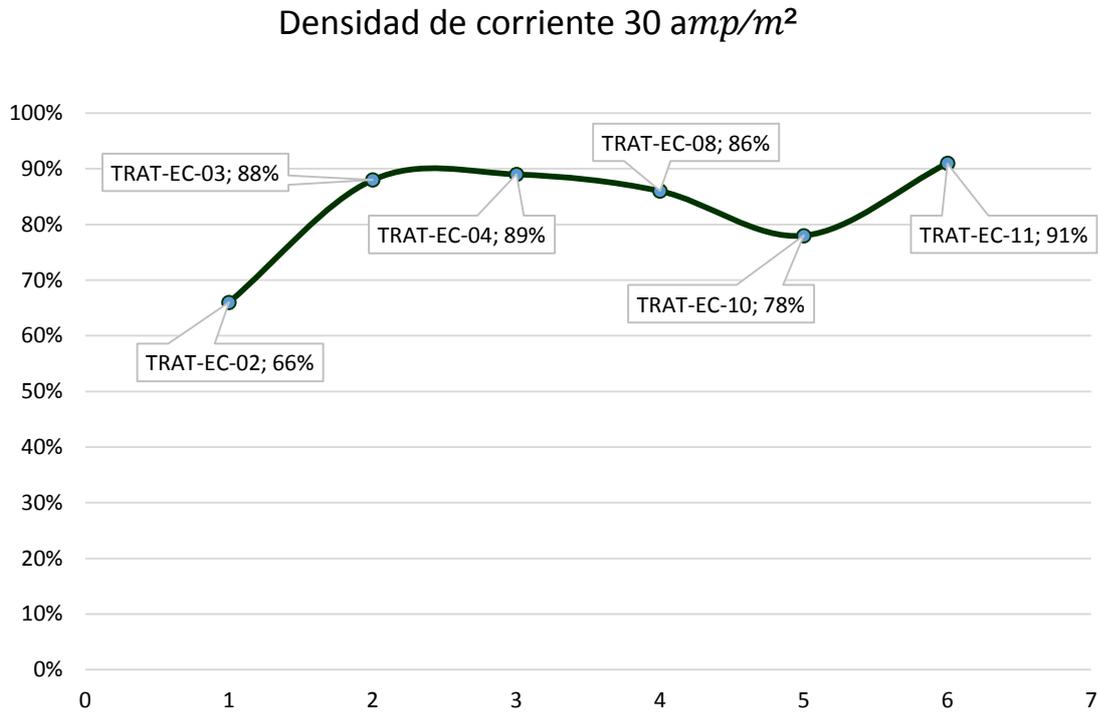
Tabla 23. Promedio de Densidad de corriente a 30 amp/m²

CODIGO	Densidad	Reducción
TRAT-EC-02	30	66%
TRAT-EC-03	30	88%
TRAT-EC-04	30	89%
TRAT-EC-08	30	86%
TRAT-EC-10	30	78%
TRAT-EC-11	30	91%
Promedio		83%

Los tratamientos del grupo C (TRAT-EC-03- TRAT-EC-04- TRAT-EC-08) obtuvieron un promedio de reducción de 88%, siendo el valor más alto el correspondiente al tratamiento “TRAT-EC-04” de combinación de valores tiempo de reacción a 20 minutos y una densidad de corriente de 50. Para el tratamiento “TRAT-EC-08” se tiene una ligera reducción en el porcentaje a 86%.

Para el grupo B (TRAT-EC-02- TRAT-EC-10- TRAT-EC-11) Se obtiene una reducción promedio de 78% que resulta mayor frente a una baja densidad de corriente de 30 amp/m². El valor más alto el correspondiente al tratamiento TRAT-EC-11 de combinación de valores tiempo de reacción a 30 minutos y carga diluida de R2 indica una fuerte interacción entre el tiempo de reacción y la densidad de corriente.

Figura 16. Variación de la remoción de DBO_5 para el grupo de Densidad de corriente a $30 \text{ amp}/\text{m}^2$



La Figura 16 muestra el conjunto de datos para la densidad de corriente $30 \text{ amp}/\text{m}^2$ según el orden de corrida, se observa que los elementos del grupo C se encuentran por debajo del valor más alto del grupo B (TRAT-EC-11), aun cuando el promedio de C es mayor al de B. Por lo tanto, se desliza que, para una misma densidad de corriente, los otros factores principales influyen significativamente en la eficiencia del proceso.

La variable densidad de corriente necesita durante las pruebas una rectificación en el voltaje para mantener la intensidad de corriente fija, así lograr una densidad de corriente constante de $30 \text{ amp}/\text{m}^2$, es importante mencionar esto porque el grupo B tuvo un tiempo de 30 minutos y el C 20 minutos. Esto puede deslizar que la interacción de las otras variables tiempo de reacción y carga diluida es decir *tiempo x carga diluida*, tenga mayor significancia sobre la densidad de corriente.

Densidad de Corriente a 50 amp/m²

Tabla 24. Promedio de Densidad de corriente a 50 amp/m²

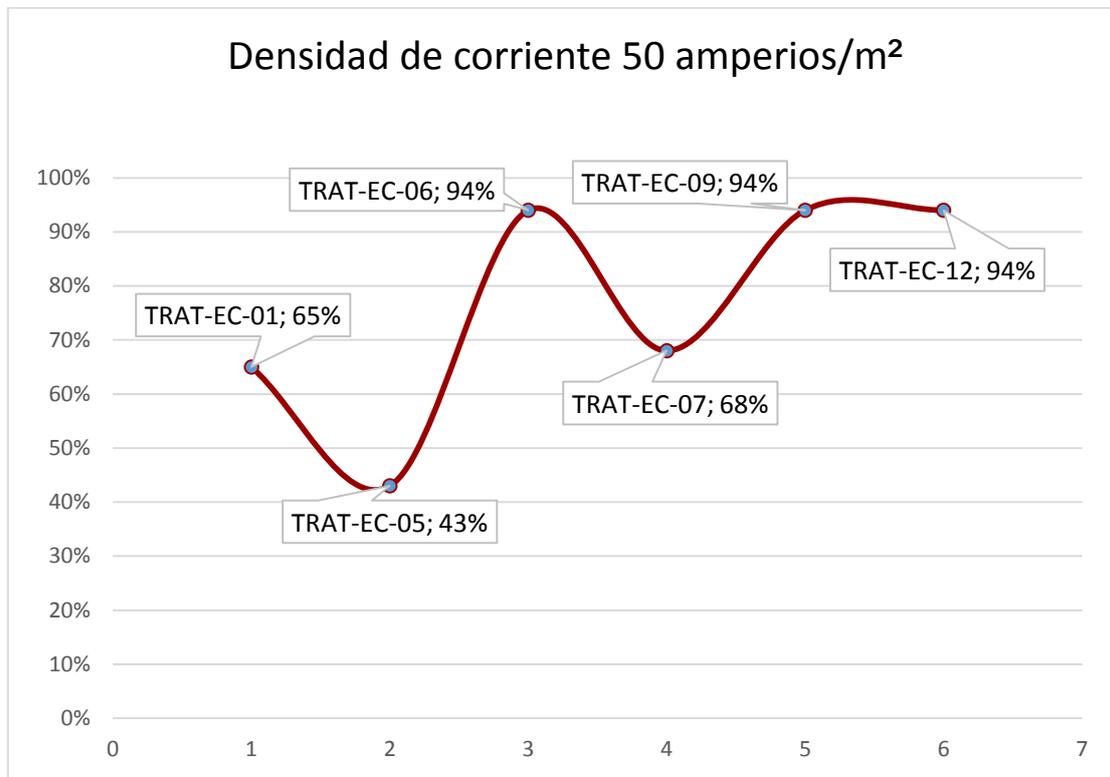
CODIGO	Densidad	Reducción
TRAT-EC-01	50	65%
TRAT-EC-05	50	43%
TRAT-EC-06	50	94%
TRAT-EC-07	50	68%
TRAT-EC-09	50	94%
TRAT-EC-12	50	94%
Promedio		76%

Fuente: Elaboración propia

Los tratamientos del grupo D (TRAT-EC-06, TRAT-EC-09, TRAT-EC-12) obtuvieron un promedio de reducción de 94%, siendo el grupo con mayor reducción de la demanda bioquímica de oxígeno. Por otro lado, en el grupo A solo el tratamiento TRAT-EC-05 resulta un valor anómalo en comparación con sus repeticiones TRAT-EC-01 y TRAT-EC-07.

Se compara un grupo de tipo (+ + +) con uno de tipo (- + -) la influencia del tiempo de reacción y carga diluida es menor cuando el valor de densidad de corriente es alto. Esto puede deberse a la cantidad de iones aluminio que ingresan al sistema producto de la energía electroquímica. Además, es importante mencionar en este caso la cantidad de espuma formada durante la ejecución de las pruebas fue de 4.5 cm cubriendo toda el área de flotación.

Figura 17. Variación de la remoción de DBO_5 para el grupo de Densidad de corriente a 50 amp/m^2



La Figura 17 muestra el conjunto de datos para Densidad de corriente 50 amp/m^2 según el orden de corrida, se observa todos los elementos el grupo D están por encima de los elementos del grupo A. Se puede inferir que para una misma densidad de corriente hay una diferencia significativa entre los promedios de 94% a 59% respectivamente.

Sobre la hipótesis específica HE2: Si, la densidad de corriente es mayor, entonces se obtendrá mayor reducción de la demanda bioquímica de oxígeno. Se puede afirmar que la densidad de corriente ha sido altamente significativa aun cuando el tratamiento TRAT-EC-05 tiene un valor extremo que se tomara como anómalo.

3.2.2. Resultados obtenidos respecto a la Tiempo de reacción

Tiempo de Reacción a 20 minutos

Tabla 25. Promedio de tiempo de reacción a 20 minutos

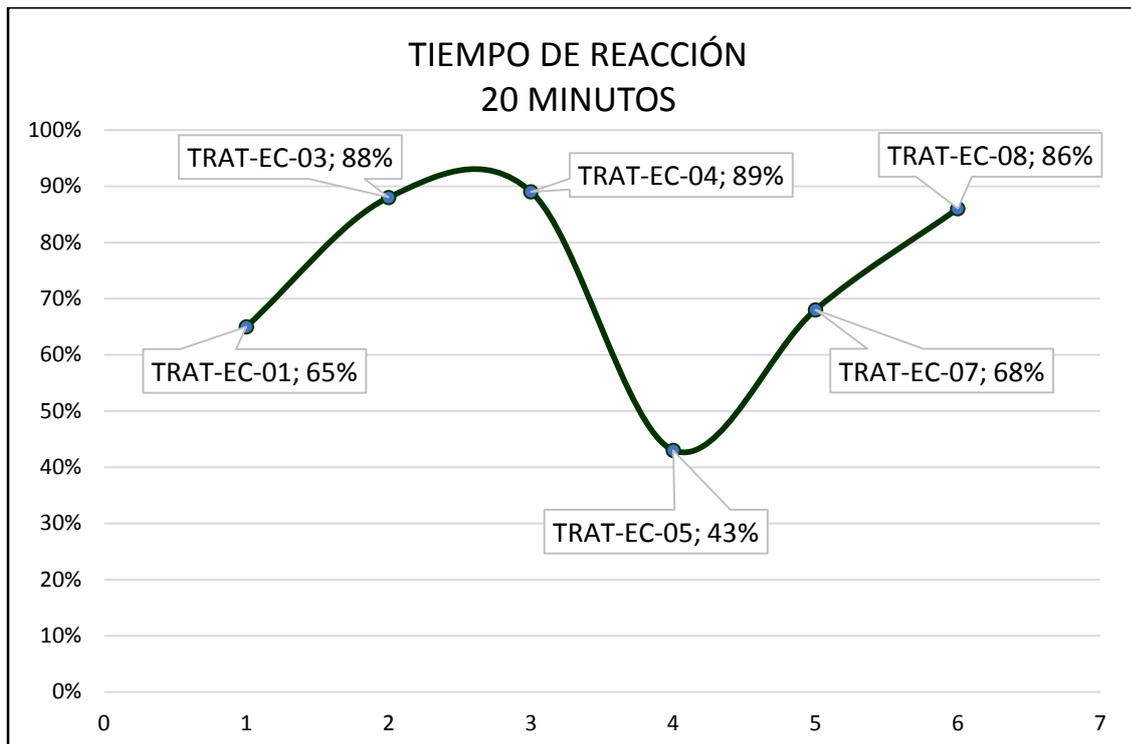
Código	Tiempo	Reducción
TRAT-EC-01	20	65%
TRAT-EC-03	20	88%
TRAT-EC-04	20	89%
TRAT-EC-05	20	43%
TRAT-EC-07	20	68%
TRAT-EC-08	20	86%
PROMEDIO		73%

Los tratamientos del grupo C (TRAT-EC-03- TRAT-EC-04- TRAT-EC-08) obtuvieron un promedio de reducción de 88%, siendo el valor más alto el correspondiente al tratamiento “TRAT-EC-04” de combinación de valores tiempo de reacción a 20 minutos, densidad de corriente $30 \text{ amp}/\text{m}^2$, y carga diluida de R4. Para el tratamiento “TRAT-EC-08” se tiene una ligera reducción en el porcentaje a 86%.

Para el grupo A (TRAT-EC-01- TRAT-EC-05- TRAT-EC-07) Se obtiene una reducción promedio de 59% que resulta menor aun cuando la densidad de corriente de $50 \text{ amp}/\text{m}^2$ haya sido alta.

Estos valores son consistentes ante la prueba de normalidad con p-valoré mayor a 0.1. Del total de valores de la Tabla 23 se obtiene una media de 73.17 con Desviación estándar 18.10, observar en Anexo 9.

Figura 18. Variación de la remoción de DBO_5 para el grupo de tiempo de reacción de 20 minutos



La Figura 18 muestra el conjunto de datos para el tiempo de 20 minutos según el orden de corrida, se observa todos los elementos el grupo A por encima de los elementos del grupo C. Por lo tanto, se deslga que para un mismo tiempo hay una diferencia significativa entre los promedios de 59% a 88% respectivamente.

Tiempo de Reacción a 30 minutos

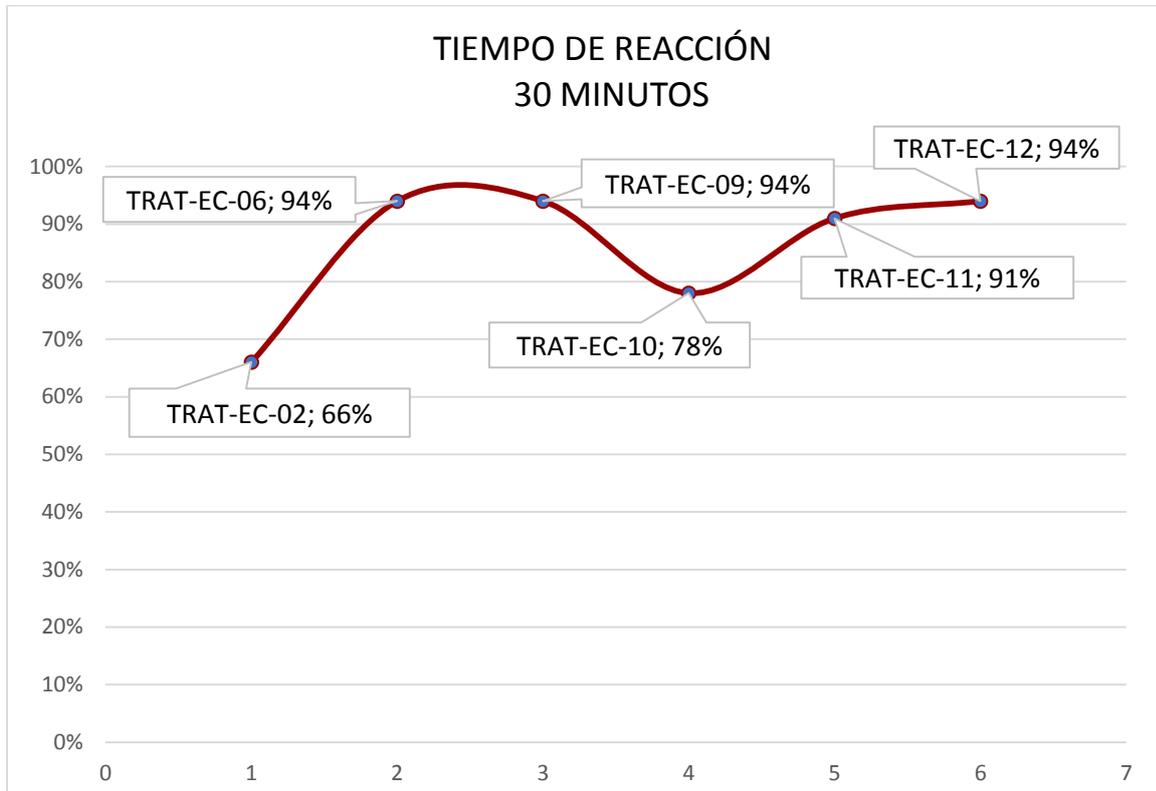
Tabla 26. Promedio de tiempo de reacción a 30 minutos

CODIGO	Tiempo	Reducción
TRAT-EC-02	30	66%
TRAT-EC-06	30	94%
TRAT-EC-09	30	94%
TRAT-EC-10	30	78%
TRAT-EC-11	30	91%
TRAT-EC-12	30	94%
PROMEDIO		86%

Los tratamientos del grupo D (TRAT-EC-06 - TRAT-EC-09- TRAT-EC-12) obtuvieron un promedio de reducción de 94% en todas las repeticiones de combinación de valores tiempo de reacción a 30 minutos, densidad de corriente 50 amp/m^2 , y carga diluida de R4.

Los tratamientos del grupo B (TRAT-EC-02- TRAT-EC-10 - TRAT-EC-11) obtuvieron un promedio de reducción de 78%, siendo el valor más alto el correspondiente al tratamiento “TRAT-EC-11” de combinación de valores tiempo de reacción a 30 minutos, densidad de corriente 30 amp/m^2 , y carga diluida de R2. Para el tratamiento “TRAT-EC-02” se tiene una menor reducción del contaminante con 66% de reducción.

Figura 19. Variación de la remoción de DBO_5 para el grupo de tiempo de reacción de 30 minutos



La Figura 19 muestra el conjunto de datos para el tiempo de 30 minutos según el orden de corrida, se observa todos los elementos el grupo D por encima de los elementos del grupo B. Por lo tanto, se desliga que para un mismo tiempo hay una diferencia significativa entre los promedios de 78% a 94% respectivamente.

Entonces de manera a priori se acepta la hipótesis tres (HE3): “Si el tiempo de reacción aumenta, entonces se favorece la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de las aguas residuales del mercado “Ciudad de Dios”.

Es necesario contrarrestar la información provista por la estructura de alias de la Tabla 7, para determinar la influencia de la interacción teniendo en cuenta que la resolución tipo III del diseño factorial fraccionado confunde los efectos de factores principales con efectos de interacción.

3.2.3. Resultados obtenidos con respecto a la Dilución de la Carga Orgánica

Carga Diluida 1.0

La variable de carga diluida 1.0 corresponde a la ecuación R4:

$$(Re_{des} + Re_{esc} + Re_{pel} + Re_{lav} + Re_{vis})$$

Se trata de una muestra puntual que se tomó de manera puntual sin embargo está compuesta de varios residuos líquidos que se acumulan.

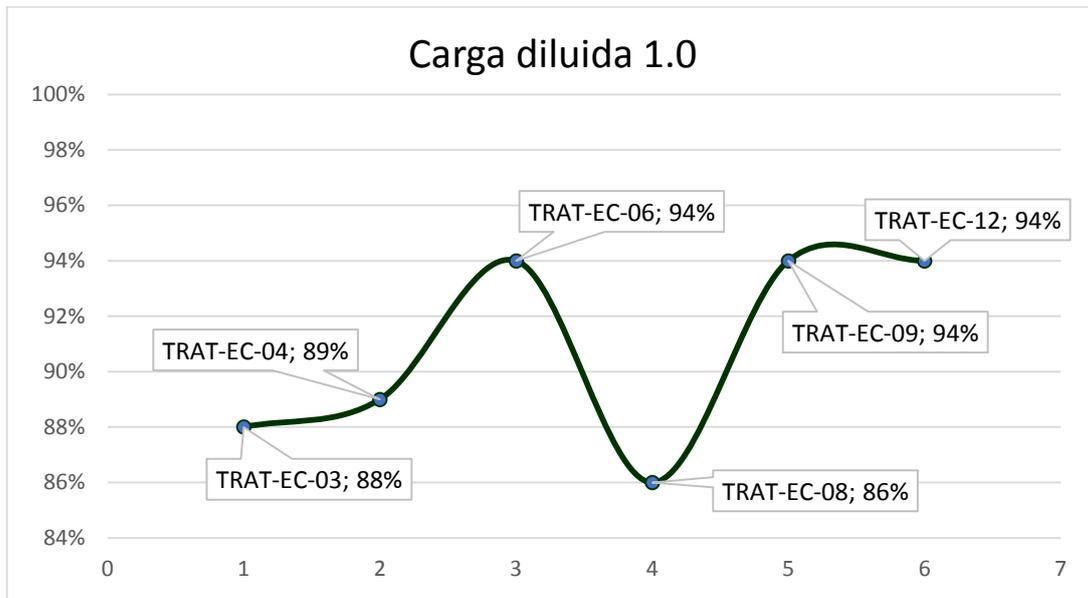
Tabla 27. Promedio de carga diluida 1.0

CODIGO	Carga Diluida	Reducción
TRAT-EC-03	1.0	88%
TRAT-EC-04	1.0	89%
TRAT-EC-06	1.0	94%
TRAT-EC-08	1.0	86%
TRAT-EC-09	1.0	94%
TRAT-EC-12	1.0	94%
Promedio		91%

Los tratamientos del grupo C (TRAT-EC-03- TRAT-EC-04- TRAT-EC-08) obtuvieron un promedio de reducción de 88%, siendo el valor más alto el correspondiente al tratamiento “TRAT-EC-04” de combinación de valores tiempo de reacción a 20 minutos, densidad de corriente 30 amp/m^2 , y carga diluida de R4. Para el tratamiento “TRAT-EC-08” se tiene una ligera reducción en el porcentaje a 86%.

Los tratamientos del grupo D (TRAT-EC-06 - TRAT-EC-09- TRAT-EC-12) obtuvieron un promedio de reducción de 94% en todas las repeticiones de combinación de valores tiempo de reacción a 30 minutos, densidad de corriente 50 amp/m^2 , y carga diluida de R4.

Figura 20. Variación de la remoción de DBO₅ para el grupo de carga diluida 1.0



La Figura 20 muestra el conjunto de datos para la carga diluida 1.0, según el orden de corrida, se observa todos los elementos el grupo D están por encima de los elementos del grupo C. Se puede inferir que para una misma densidad de corriente hay una diferencia significativa entre los promedios de 94% a 88% respectivamente.

Carga Diluida 0.4

La variable de carga diluida 0.4 corresponde a la ecuación R2:

$$(Re_{des} + Re_{esc} + Re_{pel} + Re_{vis})$$

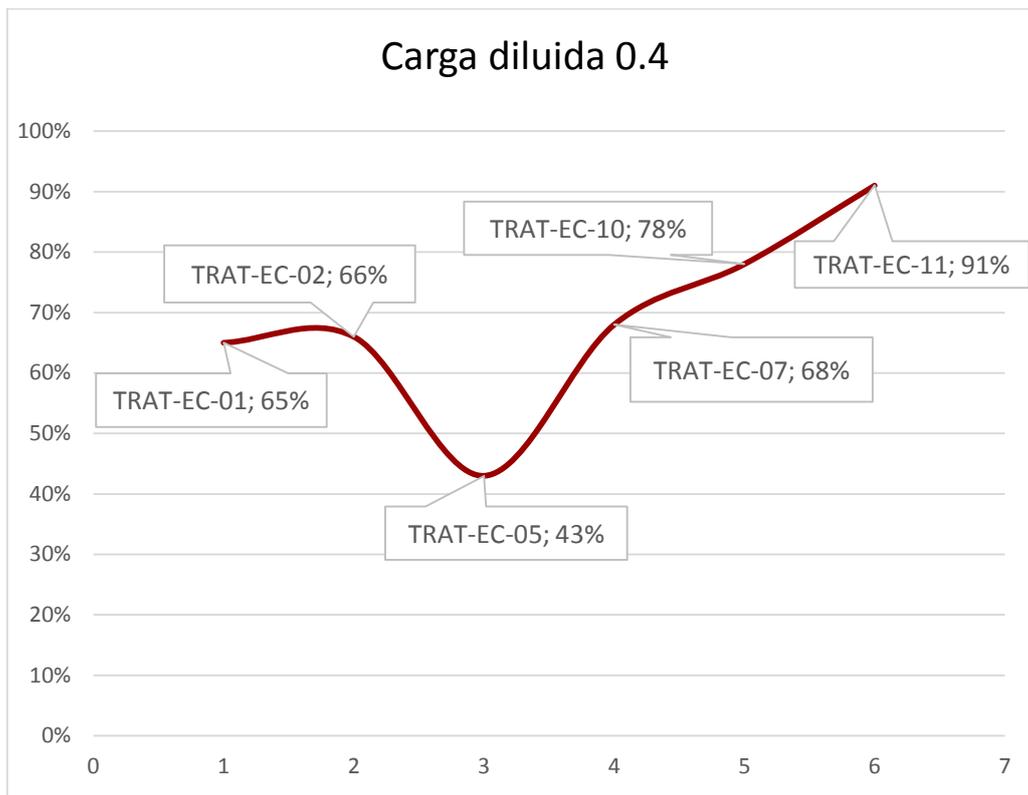
Tabla 28. Promedio de carga diluida a 0.4

CODIGO	Carga Diluida	Reducción
TRAT-EC-01	0.4	65%
TRAT-EC-02	0.4	66%
TRAT-EC-05	0.4	43%
TRAT-EC-07	0.4	68%
TRAT-EC-10	0.4	78%
TRAT-EC-11	0.4	91%
Promedio		69%

Para el grupo A (TRAT-EC-01- TRAT-EC-05- TRAT-EC-07) Se obtiene una reducción promedio de 59% que resulta menor aun cuando la densidad de corriente de 50 amp/m^2 haya sido alta.

Mientras que para el grupo B (TRAT-EC-02- TRAT-EC-10- TRAT-EC-11), se obtiene una reducción promedio de 78% que resulta mayor frente a una baja densidad de corriente de 30 amp/m^2 . El valor más alto el correspondiente al tratamiento TRAT-EC-11 de combinación de valores tiempo de reacción a 30 minutos y carga diluida de R2 indica una fuerte interacción entre el tiempo de reacción y la densidad de corriente.

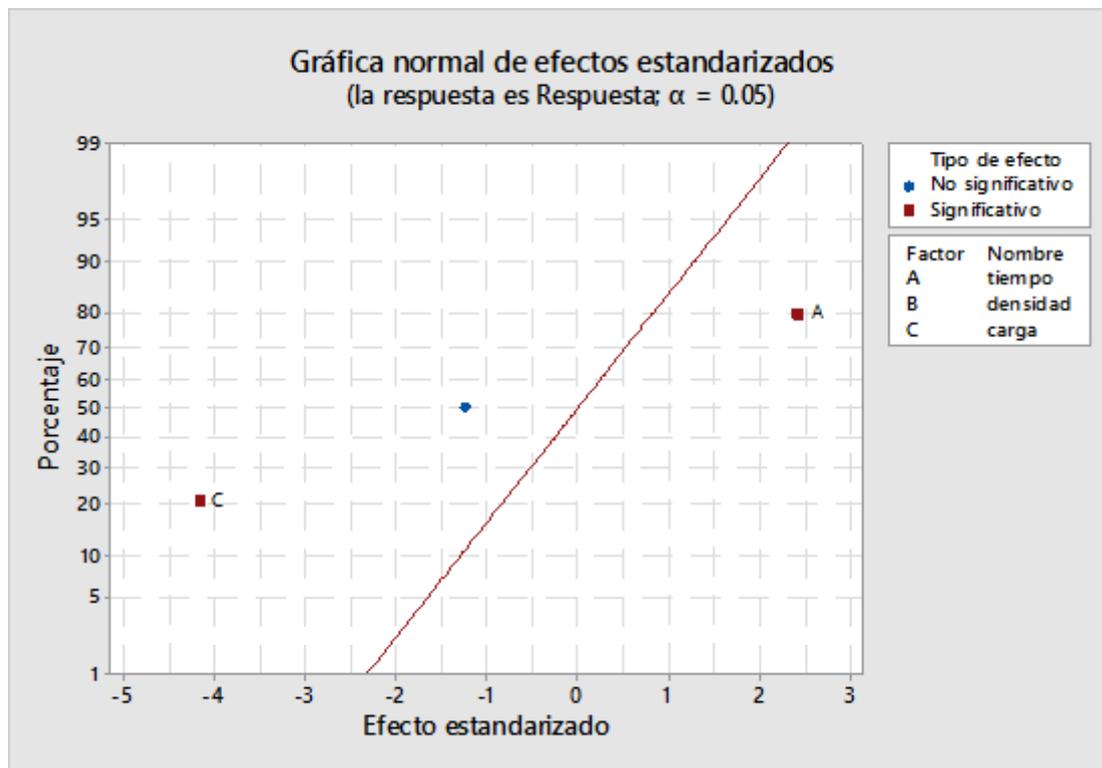
Figura 21. Variación de la remoción de DBO₅ para el grupo de carga diluida 0.4



La Figura 21 muestra el conjunto de datos para la carga diluida 0.4 según el orden de corrida, se observa todos los elementos el grupo B por encima de los elementos del grupo A. Por lo tanto, se desliga que para un mismo tiempo hay una diferencia significativa entre los promedios de 59% a 78% respectivamente.

3.2.4. Resultado de la interacción de variables independientes

Figura 22. Gráfica normal de efectos estandarizados



En la gráfica normal de efectos estandarizados se tiene como valores significativos al Tiempo de reacción y Carga diluida. Sin embargo, es necesario analizar la estructura de alias para determinar que interacciones pueden ser significativas y no se presentan en la Figura 22 debido a que en el tipo de resolución tipo III del diseño factorial fraccionado algunos efectos principales se confunden con interacciones. Interacciones extraídas de la tabla 19:

A + BC: Se tiene entonces que el factor representado por A: Tiempo de reacción está confundido con la interacción BC, que corresponde a Densidad de corriente y Carga diluida

B + AC: El factor B: densidad de corriente, está confundido con la interacción AC: Tiempo de reacción y Carga diluida.

CONCLUSIONES

Basado en los resultados y considerando las condiciones particulares del efluente líquido del mercado Ciudad de Dios se concluye:

1. El valor inicial de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) fue de 1725 mg/Lt , el cual se redujo en el grupo D hasta 100.70 mg/Lt , que representa una eficiencia de reducción del 94%.
2. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) inicial del agua residual proveniente del mercado Ciudad de Dios, era de 1725 mg/Lt .
3. La densidad de corriente óptima es de 50 amp/m^2 , con respecto a la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5).
4. El tiempo de reacción óptimo es de 30 minutos, determinado que el mayor tiempo de reacción aumentara la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5).
5. Los residuos líquidos obtenidos de los procesos del desangrado, escaldado, pelado, lavado y eviscerado, aumenta significativamente la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), influyendo de manera significativamente en el tratamiento de electrocoagulación.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda cumplir con las normas mínimas de seguridad con respecto al uso del equipo de electrocoagulación, materiales de laboratorio y manipulación de la muestra residual, para una mejor cuantificación del porcentaje de reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
2. Procurar que el agua residual a ser tratada, esté libre de cualquier tipo de impureza (como piedras, plumas, fibras, etc.) que pueda interrumpir su normal circulación en la celda de electrocoagulación, así mismo se obtenga una muestra representativa confiable del valor inicial de la DBO.
3. Se recomienda limpiar la acumulación de restos que se puedan formar en los electrodos, para garantizar el correcto paso de energía, así como fijar correctamente los electrodos para garantizar una correcta superficie de contacto durante las pruebas experimentales.
4. Se recomienda investigar cual es el periodo de sedimentación óptimo para reducir la carga de contaminante e investigar eficiencia par aun tiempo mayor a 30 minutos.
5. Se propone utilizar otros electrodos (hierro, cobre, zinc, etc.), o la combinación de electrodos de diferente naturaleza con la finalidad de evaluar el porcentaje de remoción de contaminantes, en el tratamiento de aguas residuales con elevada carga orgánica.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, G., Coy, C., Bourdón, A., & Cuervo, E. (2013). La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 9(2), 1900-4699.
- Aguilar, E. (2015). *Evaluación de una celda de electrocoagulación a escala de laboratorio para el tratamiento de agua* (Tesis de maestría), Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Alvarez, A., & Prieto, E. (2016). Biofísicoquímica El agua. Recuperado de <https://slideplayer.es/slide/5550976/>
- Arango, Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 49-56.
- Autoridad Nacional del Agua (2013). *Reglamento para el otorgamiento de autorizaciones de vertimiento y reusó de aguas residuales tratadas. Resolución Jefatural N° 224-2013-ANA*, Perú.
- Autoridad Nacional del Agua (2016). *Protocolo Nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales. Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA*, Perú.
- Barboza, G. (2011). *Reducción de la Carga de Contaminantes de las Aguas Residuales de la Planta de Tratamiento de Totorá –Ayacucho Empleando la Técnica de Electrocoagulación* (Tesis de maestría), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Betancourt, E. & Domínguez S. (2013). *Electrocoagulación*. Recuperado de <https://www.monografias.com/trabajos99/electrocoagulacion/electrocoagulacion.shtml>
- Cisneros, A. (2017). *Uso de la Tecnología de Electrocoagulación para el Tratamiento de Efluentes de Camal Avícola a nivel de Laboratorio, SJL 2017* (Tesis de pregrado), Universidad César Vallejo, Lima, Perú.
- Deghles, A., & Kurt, U. (2016). Treatment of tannery wastewater by a hybrid electrocoagulation/electrodialysis process. *Chemical Engineering and Processing*, 104:43-50.
- Diario El Peruano (2009). *Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. Decreto Supremo N°021-2009-Vivienda*, Perú.
- Diario El Peruano (2012). *Reglamento sanitario del faenado de animales de abasto. Decreto Supremo N° 015-2012-AG*, Perú.
- Foro Ambiental (2017). *Aguas residuales, un problema mundial que aumenta la brecha entre ricos y pobres*. Recuperado de <https://www.foroambiental.net>
- Flores, D. & Lozano, A. (2013). Disminución de DBO y color en el licor negro de la industria papelera trupal mediante ozonización catalizada con carbón activado. (Tesis de pregrado), Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
- Gobierno del Perú (2019). *Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. Decreto Supremo N°010-2019-Vivienda*, Perú.

- Guerrero, A. (2017). *Influencia del tiempo y voltaje en la disminución de la carga orgánica por electrocoagulación del agua residual de la curtiembre Cuenca S.A.C.* (Tesis de pregrado), Universidad César Vallejo, Lima, Perú.
- Holt, P., Barton, G., & Mitchell, C. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 59(3), 355-367.
- Jaramillo, E. (2012). *Diseño y construcción de un reactor de electrocoagulación para el estudio de tratamiento de agua residual de tintura y acabado textil. Ibarra, Ecuador* (Tesis de pregrado), Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.
- Martínez, F. (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional* (Tesis de doctorado). Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, España.
- McMurry, J., & Fay, R. (2008). *Chemistry 5th Edition*. United States: Pearson
- Medina, J., Peralta M. (2015). *Validación de un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica presentes en la industria* (Tesis de pregrado), Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador.
- Metcalf & Eddy, I. (1996). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización volumen II*. España: McGraw-Hill.
- Ministerio de Agricultura (2012). *Guía Metodológica para el faenamiento de aves*, Perú.
- Ministerio de Agricultura (2016). *Uso y manejo de agua*. Recuperado de <http://minagri.gob.pe/portal/42-sector-agrario/recurso-agua/329-uso-y-manejo-deagua>
- Ministerio del Ambiente. (2009). *Aprueba Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de las actividades agroindustriales tales como plantas de camales y plantas de beneficio*, Perú.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *MINAM aprobó Estándares de Calidad Ambiental para Agua*, Perú.
- Naciones Unidas (2010). *Calidad del agua y el saneamiento*. Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio.
- Norma Técnica de Edificación OS.090 (2006). *Plantas de tratamiento de aguas residuales*, Lima, Perú.
- Organización de Fiscalización Ambiental (2013). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*, Lima, Perú.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2017). *Las aguas residuales, una oportunidad desaprovechada*. Recuperado de: <http://www.fao.org/news/story/es/item/853653/icode>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso no explotado*, Paris, Francia.
- Paitan, L., & Palomino, D. (2017). *Remoción de arsénico del agua potable del distrito de quero provincia de jauja, por el método de electrocoagulación, a nivel laboratorio* (Tesis de pregrado), Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.

- Paitan, M., & Sifuentes, G. (2018). *Remoción de contaminantes de aguas residuales de un matadero de equinos por el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- Pantoja, A. (2015). *Reducción de concentración de hierro en agua, mediante la Electrocoagulación*, Universidad Nacional del Callao, Perú.
- Penn, M., Pauer, J., Mihelcic, J. (2003). *Biochemical Oxygen Demand Environmental and Ecological Chemistry*, 2.
- Pérez, L. (2018). *Uso de la electrocoagulación para reducir la carga de contaminantes en la planta de tratamiento de aguas residuales Ajeper-Huachipa 2017 II* (Tesis de pregrado), Universidad César Vallejo, Perú.
- Pérez, F. (2015). *Hidrología superficial: Formas y tipos de precipitación*. Recuperado de <https://vdocuments.site/uso-consuntivo-y-no-consuntivo-del-agua.html>
- Poma J., & Quispe, P. (2016). *Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas por el metodo de Electrocoagulación* (Tesis de pregrado), Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo humano Perú (2009). Informe sobre Desarrollo Humano Perú 2009. Por una densidad del Estado al servicio de la gente. Cartilla I: Las brechas en el territorio, Lima, Perú
- Quijano, D. A. (2012). *Remoción de microorganismos patógenos mediante Electrocoagulación empleando anodos de Aluminio* (Tesis de pregrado), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Quispe, K. (2015). *Electrocoagulación en la remoción de mercurio de las aguas residuales en el centro poblado La Rinconada- Puno* (Tesis de pregrado), Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Raffo, E., & Ruiz E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 17(1), 71-80.
- Reyes D., & Mercado, I. (2003). Estudio de tratabilidad por electrocoagulación de los lixiviados del relleno sanitario la Esmeralda (Tesis de pregrado), Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Colombia.
- Ruiz, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 49-56.
- Sahu, O., Mazumdar, B., & Chaudhari, P. (2014). Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(4), 2397–2413.
- Sanchez, E. (2017). ¿Cómo será la población mundial en el año 2100?. *Euronews*. Recuperado de <https://es.euronews.com/2017/07/11/como-sera-el-mundo-en-el-ano-2100>
- Sanchez, M. (2017). Las aguas residuales en Perú, realidad al 2017. *Iagua*. Recuperado de <https://www.iagua.es/blogs/maria-sanchez-montes/aguas-residuales-peru-costo-improvisacion>
- Torres, E. (2016). Perú busca revertir la alarmante contaminación de sus aguas. *RT Español*. Recuperado de <https://actualidad.rt.com/actualidad/212174-peru-revertir-contaminacion-aguas>

ANEXOS

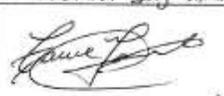
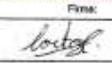
ANEXO 1

Figura 23. Certificado del investigador en MONITOREO AMBIENTAL



ANEXO 2

Figura 24. Cadena de Custodia

CADENA DE CUSTODIA										F-RTM-01 Revisión: 04 Fecha: 10-07-2019 Página 1 de 1			
DATOS DEL CLIENTE Y FACTURACIÓN										Nº Cadena de Custodia:	1903106A	Nº Plan de Muestras:	—
N: Iam Alexander Tame Gamboa No del Cliente: M2. 51 LT23 5a Buenas Milagras - Pamplona ALTA 5JM No: 10474294396 Teléfono: 962 340 057 No: Iam Alexander Tame Correo: alioccha.tamale@gmail.com										Preservante:			
DATOS PARA EJECUCIÓN DEL MUESTREO										Tipo de frasco / envase (2)			
No realizado: El Cliente Análisis de Campo: - No de Orden de Trabajo: 1903027 de Muestreo: MBO "Ciudad de Dios" 5JM - Lima.										ENSAYO (S) SOLICITADO (S)			
Sitio de Campo: - Ensayo: Agua No R-LAB: - Teléfono(s): - Correo: -										Dinámica de conservación de las muestras			
TIPICIDAD DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE MUESTREO (dd-mm-aa)	HORA DE MUESTREO (hh:mm)	TIPO DE MUESTRA (VD PRODUCTO (1))	Nº DE ENVASES / FRASCOS	ESTADO DE CONSERV. (2)	DESCRIPCIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO						
9C-EC-00	1903106A-01	21-03-19	11:00	ARI	1	R	—	X					
7-EC-08	1903106A-02	21-03-19	18:00	ARI	1	R	—	X					
7-EC-04	1903106A-03	21-03-19	17:30	ARI	1	R	—	X					
7-EC-07	1903106A-04	21-03-19	21:00	ARI	1	R	—	X					
7-EC-12	1903106A-05	21-03-19	15:50	ARI	1	R	—	X					
7-EC-03	1903106A-06	21-03-19	17:00	ARI	1	R	—	X					
7-EC-02	1903106A-07	21-03-19	20:20	ARI	1	R	—	X					
7-EC-01	1903106A-08	21-03-19	19:00	ARI	1	R	—	X					
OBSERVACIONES: Método de Envase: <input type="checkbox"/> SI (1) <input type="checkbox"/> NO (2) (3) TEMPERATURA: AMBIENTE (1), PRESERVADO (P), REFRIGERADO (R)										CONFORMIDAD DEL SERVICIO POR EL CLIENTE (EN CAMPO) NOMBRE: Iam Alexander Tame Gamboa CARGO: Bachiller Ing. Ambiental			
FIRMA: 													
SOLO PARA SER LLENADO POR PERSONAL DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS													
Entregado por:		Firma:		Recibido por:		Firma:		CONDICIÓN DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS					
Iam Alexander Tame Gamboa				Deysy Cortez Arauco				En buen estado: <input type="checkbox"/> SI <input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> NO Recipiente apropiado: <input type="checkbox"/> SI <input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> NO Dentro del tiempo de conservación: <input type="checkbox"/> SI <input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> NO Correctamente preservadas: <input type="checkbox"/> SI <input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> NO					
ACCIONES: CONFORME: <input checked="" type="checkbox"/> X NO CONFORME: <input type="checkbox"/>													
Sedes en Lima: Calle Jirón M100, Urb Portales de Javier Prado, Sur Etapa Ate / Av. De Vivero de Cruz de Motupe, MC B. L136-188a el Gabacho / Teléfono: 9776533 / E-mail: laboratorio@rta.com / Visitarnos en: www.rta.com													



CADENA DE CUSTODIA

F-RTM-04
 Revisión: 04
 Fecha: 10-01-2019
 Página 1 de 1

DATOS DEL CLIENTE Y FACTURACIÓN					N° Cadena de Custodia:	N° Plan de Muestreo:	
Ian Alexander Tame Gamboa Mz. 51 LT 23 Sc. Buenos Milagros - Pampolina Alta - SJM 10474259 396 Teléfono: 962 340 057					1903106A	---	
DATOS PARA EJECUCIÓN DEL MUESTREO					Preservante		
EL CLIENTE Afecto de Campo: 1903027					Tipo de frasco / envase (2)		
MBO "Ciudad de Dios" SJM - Lima Envase: Agua					ENSAYO (S) SOLICITADO (S)		
El Cliente Teléfono: Correo: Teléfono: Correo:					PREPARAR RESPONSA DE ORIGEN		
IFRICACIÓN DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE MUESTREO (dd-mm-aa)	HORA DE MUESTREO (hh:mm)	TIPO DE MATRIZ Y/O PRODUCTO (1)	N° DE ENVASES / FRASCOS	ESTADO DE CONSERV. (3)	DESCRIPCIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO
-EC-06	1903106A-09	21-03-19	17:40	ARI	1	R	-
-EC-05	1903106A-10	21-03-19	20:50	ARI	1	R	-
-EC-10	1903106A-11	21-03-19	21:20	ARI	1	R	-
-EC-09	1903106A-12	21-03-19	18:30	ARI	1	R	-
-EC-11	1903106A-13	21-03-19	22:30	ARI	1	R	-
ENVASIÓN:					CONFORMIDAD DEL SERVICIO POR EL CLIENTE (EN CAMPO)		
Muestra de Envase: SI () NO (X) (3) TEMPERATURA: AMBIENTE (T), PRESERVADO (P), REFRIGERADO (R)					NOMBRE: Ian Alexander Tame Gamboa CARGO: Radicador Ing. Ambiental		
NATURAL: Superficial/Lago/Agua (ANSLS), Río/ANSR), Subterránea/Manantial(ANSM) / Pozo (ANSAP), Terrestre (ANSbT) SALINA: Mar/ASAM, Salobre/SASO; AGUA RESIDUAL: Doméstico(ARD), Industrial (ARI), Municipal(ARM); PARA USO Y CONSUMO HUMANO: Subida Potable(ACHPo), Mezcla(ACHM), Emvasada(ACHE), Floculada(ACHF), Laguna Artificial(ACHEA), Suelo (S), Lodo(SL), Sedimento(SSED), Aire(A), EMISIONES EN FUENTES ESTACIONARIAS: (EM), OTROS(O); ARE PLÁSTICO(P), VIDRIO(V), VIDRIO AMBAR(VA), BOLSA ZIPLOC(BZ), SOBRE MAJILLA(SM), PLACA PETRI (PP), TUBOS ABSORBENTES (TA), OTROS(O)					FIRMA:		
SOLO PARA SER LLENADO POR PERSONAL DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS							
Entregado por:		Firma:		Recibido por:		Firma:	
Alexander de Gamboa				Deysy Cortes Arauco			
CONDICIÓN DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS							
En buen estado:	SI	X	NO				
Recipiente apropiado:	SI	X	NO				
Dentro del tiempo de conservación:	SI	X	NO				
Correctamente preservadas:	SI	X	NO				
CONFORME		X		NO CONFORME			
Sede en Lima: Calle Santa Rosa 300, Urb Portales de Javier Prado, La Estapa-Ate / Av. De la Libertad Cruz de Motupe, MC 8, LT-04-Villa el Salvador / Teléfono: 0710533 / E-mail: laboratorio3@gmail.com / Visitarnos en: www.rlab.com							

ANEXO 3

Figura 25. Sistema de electrocoagulación



Figura 26. Electrodo de aluminio usado como cátodo y ánodo



ANEXO 4

Figura 27. Tratamiento de electrocoagulación





Figura 28. Formación de espuma



ANEXO 5

Figura 29. TRAT-EC-01



Figura 30. TRAT-EC-02



Figura 31. TRAT-EC-03



Figura 32. TRAT-EC-05



Figura 33. TRAT-EC-10



Figura 34. TRAT-EC-11



ANEXO 6

Figura 35. 1^{er} grupo de tratamiento



Figura 36. 2^{do} grupo de tratamiento



ANEXO 7

Figura 37. Etiquetado de las botellas



ANEXO 8

Figura 38. Llenado de las botellas utilizando el caño del reactor



Figura 39. Llenado de las botellas utilizando una pipeta



ANEXO 9

Figura 40. Informe de ensayo N° 1903106A, elaborado por el laboratorio R – Lab S.A.C., (1^{ra} hoja)

INFORME DE ENSAYO N° 1903106A

Cliente	: IAN ALEXANDER TAME GAMBOA
Dirección del cliente	: MZ.51 LT.23 SR. BUENOS MILAGROS - PAMPLONA ALTA SAN JUAN DE MIRAFLORES
Usuario	: -
Lugar de Muestreo	: MDO. "CIUDAD DE DIOS" SJM - LIMA
Tipo de Matriz y/o Producto	: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Muestreo Realizado por	: -
Procedimiento de Muestreo	: -
Referencia al Plan de Muestreo	: -
Número de Muestras	: 13
Fecha de Recepción	: 22-03-2019
Fecha de Inicio y Término de Ensayo:	22 -03-2019 al 27-03-2019

F-IE-01
Revisión: 04
Fecha: 24-01-2019

Fecha de emisión: 03 - 04 - 2019

Figura 41. Informe de ensayo N° 1903106A, elaborado por el laboratorio R – Lab S.A.C., (2^{da} hoja)

INFORME DE ENSAYO N° 1903106A

Código de Laboratorio	1903106A-01	1903106A-02	1903106A-03			
Identificación de la Muestra	CARAC - EC - 00	TRAT - EC - 08	TRAT - EC - 04			
Descripción del Punto de Muestreo	-	-	-			
Fecha y hora de muestreo	21-03-2019 (11:00)	21-03-2019 (18:00)	21-03-2019 (17:30)			
Ubicación Geográfica (WGS-84)	N: - E: -	N: - E: -	N: - E: -			
Tipo de Matriz y/o Producto	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Tipo de Ensayo	Unidad	L.C.M.	L.D.M	Resultados		
² Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	0,4	0,1	1 725	235,5	187,2

Código de Laboratorio	1903106A-04	1903106A-05	1903106A-06			
Identificación de la Muestra	TRAT - EC - 07	TRAT - EC - 12	TRAT - EC - 03			
Descripción del Punto de Muestreo	-	-	-			
Fecha y hora de muestreo	21-03-2019 (21:00)	21-03-2019 (18:50)	21-03-2019 (17:00)			
Ubicación Geográfica (WGS-84)	N: - E: -	N: - E: -	N: - E: -			
Tipo de Matriz y/o Producto	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Tipo de Ensayo	Unidad	L.C.M.	L.D.M	Resultados		
² Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	0,4	0,1	549,0	110,3	205,8

Notas:

- ✓ Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas al laboratorio.
- ✓ La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.
- ✓ La (s) muestra (s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.
- ✓ L.C.M: Límite de cuantificación del método; L.D.M: Límite de detección del método.
- ✓ El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.
- ✓ (*) Método de ensayo no acreditado por el INACAL-DA.
- ✓ ¹ Ensayos realizados en la Sede de Ate-Lima ubicada en Calle Berna N° 100, Urb. Los Portales de Javier Prado 1ra Etapa, Ate-Lima.
- ✓ ² Ensayos realizados en la Sede de Villa el Salvador-Lima Ubicada en Asoc. Cruz de Motupe, Mz. B, Lote 4, Villa el Salvador-Lima.

F-IE-01
Revisión: 05
Fecha: 24-01-2018

Figura 42. Informe de ensayo N° 1903106A, elaborado por el laboratorio R – Lab S.A.C., (3ª hoja)

INFORME DE ENSAYO N° 1903106A

Código de Laboratorio	1903106A-07	1903106A-08	1903106A-09			
Identificación de la Muestra	TRAT - EC - 02	TRAT - EC - 01	TRAT - EC - 06			
Descripción del Punto de Muestreo	-	-	-			
Fecha y hora de muestreo	21-03-2019 (20:20)	21-03-2019 (19:00)	21-03-2019 (17:40)			
Ubicación Geográfica (WGS-84)	N: - E: -	N: - E: -	N: - E: -			
Tipo de Matriz y/o Producto	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Tipo de Ensayo	Unidad	L.C.M.	L.D.M	Resultados		
² Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	0,4	0,1	588,0	606,0	105,8

Código de Laboratorio	1903106A-10	1903106A-11	1903106A-12			
Identificación de la Muestra	TRAT - EC - 05	TRAT - EC - 10	TRAT - EC - 09			
Descripción del Punto de Muestreo	-	-	-			
Fecha y hora de muestreo	21-03-2019 (20:50)	21-03-2019 (21:20)	21-03-2019 (18:30)			
Ubicación Geográfica (WGS-84)	N: - E: -	N: - E: -	N: - E: -			
Tipo de Matriz y/o Producto	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Tipo de Ensayo	Unidad	L.C.M.	L.D.M	Resultados		
² Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	0,4	0,1	991,0	378,0	100,7

Notas:

- ✓ Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas al laboratorio.
- ✓ La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.
- ✓ La (s) muestra (s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.
- ✓ L.C.M: Límite de cuantificación del método; L.D.M: Límite de detección del método.
- ✓ El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.
- ✓ (*) Método de ensayo no acreditado por el INACAL-DA.
- ✓ ¹ Ensayos realizados en la Sede de Ate-Lima ubicada en Calle Berna N° 100, Urb. Los Portales de Javier Prado 1ra Etapa, Ate-Lima.
- ✓ ² Ensayos realizados en la Sede de Villa El Salvador-Lima Ubicada en Av. Cruz de Miraflores - Miraflores - Inte 4 - Villa El Salvador-Lima

F-IE-02
Revisión: 05
Fecha: 24-03-2019

Figura 43. Informe de ensayo N° 1903106A, elaborado por el laboratorio R – Lab S.A.C., (4^{ta} hoja)

INFORME DE ENSAYO N° 1903106A

Código de Laboratorio	1903106A-13	---	---		
Identificación de la Muestra	TRAT - EC - 11	---	---		
Descripción del Punto de Muestreo	-	---	---		
Fecha y hora de muestreo	21-03-2019 (22:30)	---	---		
Ubicación Geográfica (WGS-84)	N: - E: -	---	---		
Tipo de Matriz y/o Producto	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL				
Tipo de Ensayo	Unidad	L.C.M.	L.D.M	Resultados	
² Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	0,4	0,1	154,9	---

Notas:

- ✓ Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas al laboratorio.
- ✓ La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.
- ✓ La (s) muestra (s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendarios luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.
- ✓ L.C.M: Límite de cuantificación del método; L.D.M: Límite de detección del método.
- ✓ El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.
- ✓ (*) Método de ensayo no acreditado por el INACAL-DA.
- ✓ ¹ Ensayos realizados en la Sede de Ate-Lima ubicada en Calle Berna N° 100, Urb. Los Portales de Javier Prado 1ra Etapa, Ate-Lima.
- ✓ ² Ensayos realizados en la Sede de Villa el Salvador-Lima Ubicada en Asoc. Cruz de Motupe, Mz. B, Lote 4, Villa el Salvador-Lima.


F-IE-02
Revisión: 05
Fecha: 24-03-2019

Tipo Ensayo	Norma de Referencia		Año de versión o Edición
	Código	Título	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA- AWWA-WEF Part. 5210 B 23rd Ed.	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test	2017

Fin de documento

ANEXO 10

Figura 44. Prueba de normalidad para los valores de reducción de DBO_5 de los grupos A y C.



ANEXO 11

Tabla 29. Comparación de los resultados obtenidos con los Valores Máximos Admisibles (VMA)

CODIGO	Tiempo	Densidad	Carga diluida	Aleatorización mediante signos			DBO ₅	Reducción (Respuesta)	VMA Agua no domestica	Cumple los VMA
TRAT-EC-01	20	50	0.4	-	+	-	606	65%	500	NO
TRAT-EC-02	30	30	0.4	+	-	-	588	66%	500	NO
TRAT-EC-03	20	30	1	-	-	+	205.8	88%	500	SI
TRAT-EC-04	20	30	1	-	-	+	187.2	89%	500	SI
TRAT-EC-05	20	50	0.4	-	+	-	991	43%	500	NO
TRAT-EC-06	30	50	1	+	+	+	105.8	94%	500	SI
TRAT-EC-07	20	50	0.4	-	+	-	549	68%	500	NO
TRAT-EC-08	20	30	1	-	-	+	235.5	86%	500	SI
TRAT-EC-09	30	50	1	+	+	+	100.7	94%	500	SI
TRAT-EC-10	30	30	0.4	+	-	-	378	78%	500	SI
TRAT-EC-11	30	30	0.4	+	-	-	154.9	91%	500	SI
TRAT-EC-12	30	50	1	+	+	+	110.3	94%	500	SI

La tecnología de electrocoagulación redujo de manera significativa la demanda bioquímica de oxígeno, esto se comprueba en la comparación de la tabla 29.

En la tabla 29, se observa que los valores obtenidos de DBO₅ del grupo A (TRAT-EC-01, TRAT-EC-05 y TRAT-EC-07), y del grupo B (TRAT-EC-02), sobrepasan los valores VMA establecidos en el D.S. N° 001 – 2012 – VIVIENDA.