

**Universidad Católica de Santa María**

**Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y  
Biotecnológicas**

**Escuela Profesional de Ingeniería Biotecnológica**



**Tratamiento de lactosuero mediante proceso combinado de  
electrocoagulación y biocoagulante compuesto por quitosano y mucílago  
de nopal (*Opuntia ficus-indica*)**

Tesis presentada por la Bachiller:

**Navarrete Herrera, Claudia Valeria**

**ORCID: 0009-0008-0252-2335**

para optar el Título Profesional de Ingeniera Biotecnóloga

Asesor (a):

**Dr. Jiménez Pacheco, Hugo Guillermo**

**ORCID: 0009-0001-5177-1126**

Arequipa- Perú

2025

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**

**INGENIERIA BIOTECNOLOGICA**

**TITULACIÓN CON TESIS**

**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 06 de Octubre del 2024

**Dictamen: 008569-C-EPIB-2024**

Visto el borrador del expediente 008569, presentado por:

**2017223362 - NAVARRETE HERRERA CLAUDIA VALERIA**

Titulado:

**TRATAMIENTO DE LACTOSUERO MEDIANTE PROCESO COMBINADO DE  
ELECTROCOAGULACIÓN Y BIOCOAGULANTE COMPUESTO POR QUITOSANO Y MUCÍLAGO DE  
NOPAL (OPUNTIA FICUS-INDICA)**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

**INGENIERO BIOTECNOLOGO**

**29440909 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS  
DICTAMINADOR**



**29728642 - VALDIVIA CARPIO WILLY ANIBAL  
DICTAMINADOR**



**44810251 - TERAN HILARES RULY  
DICTAMINADOR**



# Tratamiento de lactosuero mediante proceso combinado de electrocoagulación y biocoagulante compuesto por quitosano y mucílago de nopal (Opuntia ficus-indica)

## INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

INDICE DE SIMILITUD

17%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	3%
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	1%
3	Submitted to Tecsup Trabajo del estudiante	1%
4	<a href="https://repositorio.uap.edu.pe">repositorio.uap.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://repositorio.ucsm.edu.pe">repositorio.ucsm.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://repositorio.untels.edu.pe">repositorio.untels.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://repositorio.unfv.edu.pe">repositorio.unfv.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="https://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1%

## DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada a mí por cada momento de perseverancia y dedicación que me ha llevado hasta aquí. Agradezco el esfuerzo, las noches largas y la pasión que he invertido en cada página de este trabajo.

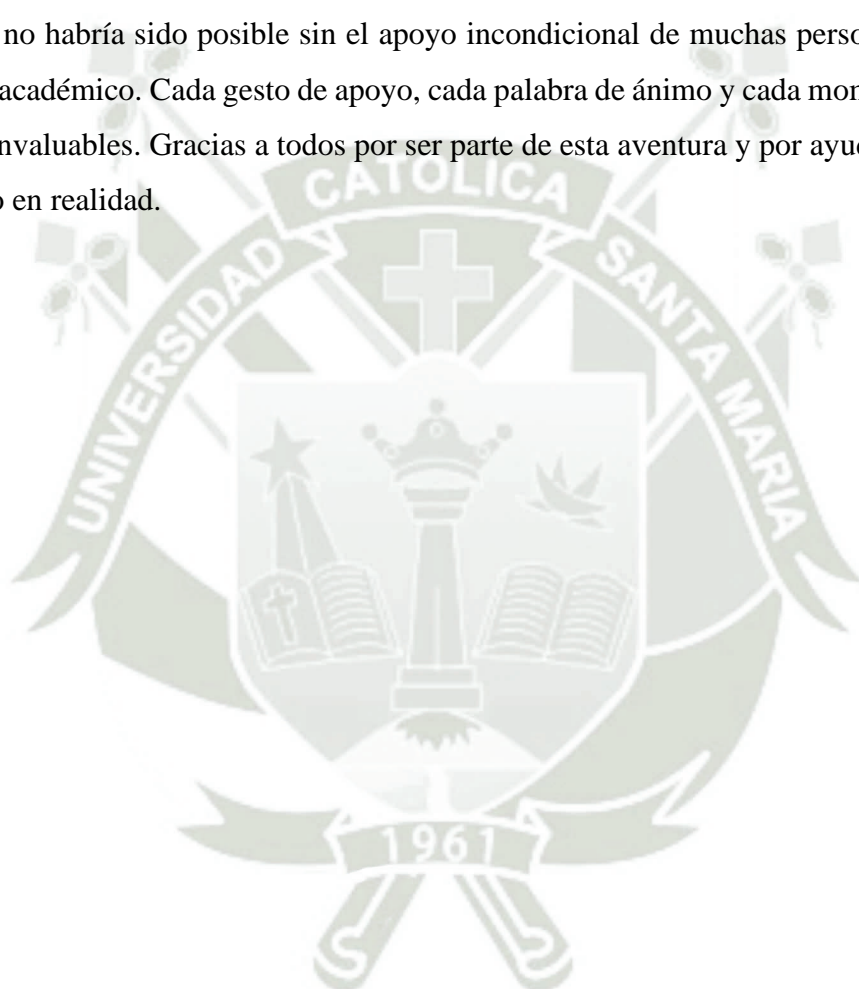
Y a mi mamá por su apoyo inquebrantable. Esta tesis es un testimonio de tu generosidad y de tu inestimable contribución a mi futuro.



## AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento al Vicerrectorado de investigación de la UCSM que subvencionó este trabajo en el marco del concurso “Fondos para la investigación 2019”, según resolución 6903-CU-2019

Esta tesis no habría sido posible sin el apoyo incondicional de muchas personas a lo largo de este viaje académico. Cada gesto de apoyo, cada palabra de ánimo y cada momento compartido han sido invaluable. Gracias a todos por ser parte de esta aventura y por ayudarme a convertir este sueño en realidad.



## RESUMEN

Anualmente se generan alrededor de 145 millones de toneladas de lactosuero, un subproducto de la industria láctea que representa un serio desafío ambiental debido a su alta concentración de materia orgánica. Para mitigar este problema, se están explorando una variedad de tratamientos biológicos, químicos y electroquímicos con el objetivo de disminuir la carga contaminante y recuperar nutrientes contenidos en el lactosuero, promoviendo así una gestión más sostenible de este recurso. Este estudio se realizó un tratamiento que combina electrocoagulación y un biocoagulante natural a base de quitosano y mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) para reducir el impacto ambiental de este efluente. Se empleó un reactor de vidrio de 100 ml como sistema de reacción, equipado con electrodos de aluminio, los cuales fueron conectados en paralelo y sumergidos en la muestra de lactosuero y se añadió una dosis fija de coagulante acuoso (quitosano y mucílago de nopal) para llevar a cabo los experimentos. Cada experimento, se ajustó y evaluó diferentes variables operacionales, como el pH de la muestra (3.5, 7.5 y 10.5), la densidad de corriente (correspondiente a voltajes de 4, 8 y 12 V) y el tiempo de reacción (30, 60 y 90 minutos) para inducir la electrocoagulación. Durante este proceso, el sistema se mantuvo bajo agitación constante a temperatura ambiente. Se encontró que las mejores condiciones para la remoción de turbidez se alcanzaron a un pH inicial de 7.5 y final de 8.5, con tiempos de tratamiento prolongados y voltajes de 8V y 12V. Los resultados obtenidos demostraron que la combinación de electrocoagulación y biocoagulación permitió alcanzar una alta eficiencia en la remoción de turbidez (94.98%) y demanda química de oxígeno (DQO) (95.38%).

El presente trabajo demostró que el tratamiento de lactosuero en un proceso combinado con electrocoagulación y biocoagulante a base de quitosano y mucílago de nopal es una alternativa efectiva y sostenible, reduciendo significativamente la contaminación y promoviendo el aprovechamiento de recursos naturales en la industria láctea.

**Palabras clave:** *Aguas residuales de la industria láctea, Quitosano, Opuntia ficus-indica, Electrocoagulación*

## ABSTRACT

Approximately 145 million tons of whey, a byproduct of the dairy industry, are produced annually. This poses a significant environmental challenge due to its high organic load. To mitigate this issue, various biological, chemical, and electrochemical treatments are being explored to reduce the pollutant load and recover nutrients contained in whey, thus promoting more sustainable management of this resource. This study investigated a treatment that combines electrocoagulation and a natural biocoagulant based on chitosan and nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*) to reduce the environmental impact of this effluent.

A 100 ml glass reactor was used as a reaction system, equipped with aluminum electrodes connected in parallel and immersed in the whey sample. A fixed dose of aqueous coagulant (chitosan and nopal mucilage) was added to conduct the experiments. For each experiment, different operational variables were adjusted and evaluated, such as the pH of the sample (3.5, 7.5, and 10.5), current density (corresponding to voltages of 4, 8, and 12 V), and reaction time (30, 60, and 90 minutes) to induce electrocoagulation. During this process, the system was maintained under constant agitation at ambient temperature. The best conditions for turbidity removal were found at an initial pH of 7.5 and a final pH of 8.5, with longer treatment times and voltages of 8V and 12V. The results obtained demonstrated that the combination of electrocoagulation and biocoagulation achieved a high efficiency in the removal of turbidity (94.98%) and chemical oxygen demand (COD) (95.38%).

This study demonstrated that the treatment of whey using a combined process of electrocoagulation and a biocoagulant based on chitosan and nopal mucilage is an effective and sustainable alternative, significantly reducing contamination and promoting the utilization of natural resources in the dairy industry.

**Key words:** *Wastewater from the dairy industry, Chitosan, Opuntia ficus-indica, Electrocoagulation.*

## ÍNDICE

*DEDICATORIA*

*AGRADECIMIENTO*

*RESUMEN*

*ABSTRACT*

*ÍNDICE*

*ÍNDICE DE TABLAS*

*ÍNDICE DE FIGURAS*

*INTRODUCCIÓN*..... 2

*CAPITULO I* ..... 4

*1. PLANTEAMIENTO TEÓRICO*..... 4

1.1. Determinación del problema ..... 4

1.2. Enunciado del problema ..... 4

1.3. Descripción del problema ..... 4

1.4. Justificación..... 5

*2. OBJETIVOS*..... 6

OBJETIVO GENERAL..... 6

OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 6

TABLA DE VARIABLES E INDICADORES ..... 7

*3. MARCO TEÓRICO*..... 8

3.1. El agua residual de la industria de los derivados lácteos ..... 8

3.2. Lactosuero ..... 8

3.2.1. Tipos de lactosuero..... 10

3.2.2. Aplicaciones del lactosuero..... 10

3.2.3. Contaminación ambiental..... 11

3.3. Métodos de tratamiento de efluentes lácteos..... 12

3.3.1. Procesos de tratamientos biológicos convencionales..... 12

3.3.2.	Procesos de tratamiento biológicos avanzados .....	14
3.3.3.	Procesos de tratamiento electroquímicos.....	14
3.3.4.	Procesos de tratamientos fisicoquímicos .....	18
3.2.	Fenómenos de coagulación.....	24
3.2.4.	Etapas del proceso de coagulación.....	25
3.2.5.	Mecanismo del proceso de coagulación .....	26
3.2.6.	Absorción y neutralización de cargas.....	26
3.2.7.	Calidad del agua sin procesar .....	27
3.2.8.	Variables que influyen en el proceso de coagulación .....	28
3.3.	Tipos de coagulantes.....	30
3.3.4.	Coagulantes sintéticos .....	30
3.3.5.	Coagulantes naturales.....	30
3.4.	Quitina y quitosano .....	31
3.4.4.	Quitina.....	31
3.4.5.	Quitosano .....	32
3.4.6.	Aplicaciones .....	33
3.5.	Mucilago de nopal ( <i>Opuntia Ficus-indica</i> ).....	33
3.5.4.	Composición.....	34
3.5.5.	Taxonomía.....	35
3.5.6.	Aplicaciones del mucílago.....	36
3.6.	Diseños experimentales .....	36
3.6.4.	Diseño experimental factorial completo (FFD) .....	37
3.6.5.	Diseño experimental de superficie de respuesta (MSR) .....	38
3.6.6.	Diseño experimental de Taguchi (TD).....	38
3.7.	Marco legal.....	39
<b>4.</b>	<b>HIPÓTESIS.....</b>	<b>40</b>
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>41</b>	
<b>1.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
1.1.	Lugar de ejecución de la investigación .....	41
1.2.	Materiales .....	41

1.2.1. Material biológico.....	41
1.2.2. Insumos y reactivos .....	41
1.2.3. Materiales.....	41
1.2.4. Aparatos y equipos .....	42
<b>1.3.METODOLOGÍA .....</b>	<b>42</b>
1.3.1. Diseño experimental.....	42
1.3.2. Recolección del efluente y el material.....	44
1.3.3. Obtención de Quitosano.....	44
1.3.4. Obtención de Mucílago de <i>Opuntia Ficus indica</i> .....	45
1.3.5. Purificación del mucílago extraído .....	45
1.3.6. Caracterización del efluente lácteo .....	46
1.3.7. Preparación de Coagulantes y efluente lácteo .....	46
1.3.8. Tratamiento de electrodos de aluminio.....	47
1.3.9. Proceso electrocoagulación.....	47
1.3.10. Toma de muestra .....	48
1.4. Flujograma de actividades.....	49
<b>CAPITULO III. ....</b>	<b>50</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>50</b>
1. Caracterización de lactosuero .....	50
2. Análisis estadístico de los parámetros de proceso en el proceso coagulación- electrocoagulación .....	51
3. Influencia del pH y tiempo de tratamiento .....	54
4. Evaluación comparativa de remoción de Turbidez y DQO .....	55
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>58</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>60</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>73</b>
Anexo 1: Figuras de procedimiento experimental .....	73
Anexo 2: Resultados finales del proceso de electrocoagulación .....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Cuadro de variables e indicadores .....</i>	<b>7</b>
<i>Tabla 2: Caracterización de lactosuero .....</i>	<b>9</b>
<i>Tabla 3: Comparación de ventajas y desventajas de la electrocoagulación .....</i>	<b>16</b>
<i>Tabla 4: Tabla de ventajas y desventajas algunas alternativas de tratamiento de aguas residuales de la industria láctea .....</i>	<b>21</b>
<i>Tabla 2: Componentes de la Opuntia Ficus-indica .....</i>	<b>35</b>
<i>Tabla 3: Clasificación científica.....</i>	<b>35</b>
<i>Tabla 7: Factores de diseño con los 3 niveles de estudio .....</i>	<b>44</b>
<i>Tabla 8: Matriz ortogonal de experimentos aplicando el diseño Taguchi .....</i>	<b>44</b>
<i>Tabla 9: Características fisicoquímicas del lactosuero sintético (dilución 1:10) y sin diluir.....</i>	<b>50</b>
<i>Tabla 10: Análisis de Varianza de Relaciones SN.....</i>	<b>51</b>
<i>Tabla 11: Análisis de Varianza de Relaciones SN.....</i>	<b>52</b>
<i>Tabla 12: Resumen del modelo para estimado para Relaciones SN.....</i>	<b>52</b>
<i>Tabla 13: Cuadro de resultados del proceso de electrocoagulación. ....</i>	<b>55</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Tecnologías convencionales para la eliminación de aguas residuales.....</i>	<b>13</b>
<i>Figura 1: Etapas del proceso de coagulación .....</i>	<b>26</b>
<i>Figura 2: Zonas que se producen durante la coagulación. ....</i>	<b>30</b>
<i>Figura 4: Estructuras químicas de la quitina, el quitano y el quitosano. ....</i>	<b>32</b>
<i>Figura 5: Diagrama de flujo de actividades .....</i>	<b>49</b>
<i>Figura 6: Gráfico de efectos principales para S/N .....</i>	<b>52</b>
<i>Figura 7: Gráfico comparativo entre métodos de electrocoagulación con coadyuvantes químicos, orgánicos y tratamientos biológicos convencionales.....</i>	<b>56</b>
<i>Figura 8: Quitosano, producto final.....</i>	<b>73</b>
<i>Figura 9: Pencas de nopal limpias, peladas y cortadas en cubo. ....</i>	<b>73</b>
<i>Figura 10: Agua destilada después del lavado del mucílago.....</i>	<b>74</b>
<i>Figura 11: Mucílago sedimentado y dispuesto en placas de Petri para facilitar su secado. ....</i>	<b>74</b>
<i>Figura 12: Mucílago secado a 50°C en la estufa .....</i>	<b>75</b>
<i>Figura 13: Mucílago después del lavado con etanol y agua destilado, previo a entrar al proceso de secado en la estufa.....</i>	<b>75</b>
<i>Figura 14: Solución final de Mucílago diluido en agua destilada .....</i>	<b>76</b>
<i>Figura 15: Lactosuero desgrasado y acondicionado en el laboratorio. ....</i>	<b>76</b>
<i>Figura 16: Electrodo de aluminio después del tratamiento inicial con ácido.....</i>	<b>77</b>
<i>Figura 17: Reactor monopolar de vidrio. ....</i>	<b>77</b>
<i>Figura 18: Soporte de acrílico para electrodos de aluminio. ....</i>	<b>78</b>
<i>Figura 19: Sistema de electrocoagulación. ....</i>	<b>79</b>
<i>Figura 20: Efluente lácteo después del tratamiento y el periodo de decantación.....</i>	<b>79</b>
<i>Figura 21: Efluente tratado .....</i>	<b>80</b>

***Figura 22: Efluente tratado diluido depositado en el digestor HACH DR200 y colorímetro DR900 (especificación técnica) para la lectura de DQO ..... 81***



## INTRODUCCIÓN

La industria láctea, genera grandes volúmenes de efluentes, los principales procesos que generan contaminación en esta industria son la fabricación de los derivados lácteos, así como el uso de soluciones de limpiezas alcalinas; siendo el lactosuero; que es el residuo líquido derivado del procesamiento de leche en queso, uno de los más problemáticos debido a su alta carga orgánica. Diariamente se genera significativamente efluentes residuales en proporciones de 4 a 10 litros de agua por cada litro de leche, en función del tipo de producto a obtener<sup>1</sup>. Tradicionalmente, el tratamiento de estos residuos ha implicado altos costos y generando subproductos que pueden comprometer la calidad ambiental.

El lactosuero es reportado como el 90% del volumen total de leche procesada para la elaboración de queso. Una gran parte de los compuestos solubles en agua, de la leche se encuentra en el lactosuero, incluyendo el 95% de la lactosa, el 25% de las proteínas, y el 8% de los componentes lipídicos presentes en la leche<sup>2</sup>. El efluente generado presenta una DBO<sub>5</sub> que oscila entre 40000.00 a 50000.00 mg O<sub>2</sub>/L, DQO es de 17278.00 mgO<sub>2</sub>/L, Solidos Suspendidos 9,800.00 mg/L, Solidos Totales 12,400.00 mg/L.<sup>3</sup> Ante este escenario, la búsqueda de tecnologías eficientes y sostenibles se vuelve imperativa.

Durante estos últimos años se ha tenido un progresivo avance en la aplicación de tecnologías de tratamiento de efluentes residuales de la industria lechera; no obstante, los enfoques más comunes y extendidos son las tecnologías de tratamiento biológicas y físico-químicas, que aprovechan la materia orgánica con organismos microscópicos con altas aptitudes para el procesamiento y utilización de compuestos químicos o macromoléculas sintéticas.<sup>4,5</sup> sin embargo, estos procesos de tratamiento requieren costos elevados.<sup>6</sup>

Por otro lado, la electrocoagulación es un procedimiento investigado en el tratamiento de aguas y con propuestas de mejora en la tecnología, en especial en la industria láctea; es una técnica de tratamiento de agua que emplea la transferencia de carga eléctrica a través de electrodos metálicos; tales como hierro y aluminio, para inducir la coagulación y sedimentación de partículas contaminantes de distintos materiales<sup>7</sup>. En este contexto, la coagulación eléctrica se presenta como un proceso que, al optimizar sus componentes, puede lograr resultados positivos para la conservación del medio ambiente.<sup>4</sup>

Los biocoagulantes actúan en un proceso fisicoquímico de neutralización de cargas mediante la adición de extractos orgánicos que componen los vegetales, los cuales generan la desestabilización de los coloides como son los polifenoles (taninos), gomas, alcaloides, mucílagos o proteínas<sup>4</sup>. En el fenómeno de coagulación el incremento de la fuerza de los iones en el medio permite reprimir la capa eléctrica y generando la repulsión entre las partículas suspendidas, se logra la remoción de DQO<sup>3,4,5</sup>. Estos coagulantes naturales se han reportado en investigaciones anteriores en la clarificación de aguas<sup>8</sup>; son seguros, ambientalmente amigables y no tóxicos; producen menos lodo en comparación con los coagulantes convencionales que comúnmente son de origen químico. Dado que provienen de fuentes naturales, son biodegradables y presentan eficacia en la remoción de metales pesados.<sup>8,9</sup>

La concentración y proporción del biocoagulante (Quitosano-Mucílago) utilizada en este estudio se establecieron en la etapa previa del proyecto de investigación, donde se evaluó y determino la dosis óptima para maximizar la remoción de contaminantes. Dichos resultados sirven como base para los experimentos realizados en esta segunda etapa, enfocados en optimizar el proceso de electrocoagulación.

Por lo tanto, el presente trabajo se enfoca en el tratamiento del efluente que se produce en la fabricación de queso, mediante el proceso de electrocoagulación usando un biocoagulante líquido a base de mucílago de nopal (*Opuntia Ficus-indica*) y quitosano como alternativa natural en comparación a los numerosos sistemas empleados para el tratamiento de efluentes residuales no domésticas sanitarias; la gran ventaja de este es tratamiento es que nos brinda una alternativa eficiente libre de insumos químicos que resultan sumamente contaminantes y perjudiciales para la salud.

## CAPITULO I

### 1 PLANTEAMIENTO TEÓRICO

#### 1.1. Determinación del problema

Las industrias de procesamiento de alimento, como la industria láctea generan preocupación por los impactos ambientales que pueden generar si no se tiene una adecuada gestión de los residuos líquidos y sólidos generados, en especial los líquidos que se generan entre 0.2 a 10 litros de aguas residuales por cada litro de leche procesada. En ese contexto, las aguas residuales contienen elevada carga de contaminantes (DQO, DBO, sólidos suspendidos, entre otros) y nutrientes que puede afectar la biota acuática al ser eliminadas al medio ambiente sin ningún tratamiento, generando problemas de aguas superficiales e incluso subterráneas, generación de eutrofización debido a la presencia de nitratos y fosfatos incrementando el riesgo de la salud humana. Este impacto generado, es posible remediar con las tecnologías emergentes que aportan las investigaciones realizadas, la electrocoagulación es una de ellas, sin embargo, a pesar de ser una alternativa eficiente se han propuesto mejoras en su aplicación para obtener mayores rendimientos, una de ellas es la combinación de la coagulación química previo a la electrocoagulación. Sin embargo, al usar insumos químicos en todo el proceso ha generado nuevas oportunidades de brindar soluciones a base de coagulantes naturales, es por ello que la biocoagulación como método alternativo puede conllevar a obtener remociones similares a la de una coagulación química combinada con la electrocoagulación.

#### 1.2. Enunciado del problema

¿Cómo tratar de manera eficiente y **sustentable** con el medio ambiente un efluente lácteo al aplicar biocoagulantes naturales de quitosano y mucilago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en medio acuoso en un proceso combinado de biocoagulación y electrocoagulación?

#### 1.3. Descripción del problema

La producción de leche en Perú es de 2 057 000 Toneladas por año (aprox. 5 470 000 L/día) en el 2017, siendo un 25.1% la producción de la región Arequipa según el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). **Sin embargo**, estas aguas residuales lácteas **al ser monitoreadas en los puntos de descarga de los pequeños productores de queso poseen elevados valores en: demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), conductividad y turbidez, que por la ubicación de estos centros de producción las descargas incontroladas superan los estándares de calidad ambiental, comprometiendo a los**

cuerpos receptores cuando no son dispuestos o tratados apropiadamente para la posterior descarga al cuerpo receptor o reutilización del mismo, que a pesar de la existencia de metodologías convencionales para este tipo de efluentes como los tratamientos biológicos o los químicos aún existe un vacío de conocimientos de otras alternativas que también pueden ser prometedoras al aplicar coadyuvantes naturales a partir de los residuos orgánicos de la región que también pueden ser combinados con procesos electroquímicos para el tratamiento de efluentes lácteos.

#### 1.4. Justificación

- **Justificación tecnológica:** En la actualidad, las empresas de productos lácteos ubicados en Majes – Arequipa no poseen un adecuado tratamiento de sus aguas residuales industriales, superando así los límites máximos permisibles de descargas líquidas industriales, por lo que es indispensable proponer un tratamiento amigable con el medio ambiente como es el uso de biocoagulantes naturales en el proceso de electrocoagulación.
- **Justificación ambiental:** Esta investigación se basa en el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea usando biocoagulantes, mediante la aplicación del proceso de electrocoagulación, esta es una tecnología limpia debido a que no requiere uso de productos químicos, la cual se basa en la desestabilización de las partículas coloidales producto del paso de cargas eléctricas con ayuda de un biocoagulante compuesto por quitosano y mucílago de *Opuntia ficus-indica*.
- **Justificación económica:** El tratamiento de los efluentes de la industria láctea permite disminuir el consumo de materia hídrica que son destinados para actividades de limpieza de tanques de acopio, de proceso, mantenimiento, entre otros y que indirectamente son considerados como costos fijos en una planta procesadora de derivados lácteos independientemente de la escala de producción, sin embargo, al aportar que el tratamiento de estos efluentes residuales también puede ser tratados con coagulantes naturales a partir de residuos orgánicos u otras fuentes es posible ser evaluados a largo plazo como una alternativa que puede aportar a disminuir o no a costos de tratamiento versus los convencionales.
- **Justificación Social:** El presente trabajo de investigación significa un desarrollo, progreso, bienestar de la zona urbana ya que plantea un estudio del uso de un compuesto biocoagulante basado en mucilago de *Opuntia ficus –indica* y quitosano bajo un proceso de electrocoagulación como tratamiento para disminuir parámetros

fisicoquímicos contaminantes y así mismo disminuyendo el impacto ambiental producido por los mismos.

## 2. OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Evaluar el tratamiento de agua residual de la industria láctea de la localidad de Majes-Arequipa aplicando un proceso combinado de electrocoagulación y biocoagulante en medio acuoso compuesto por quitosano y mucilago de nopal (*Opuntia ficus - indica*).

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las condiciones óptimas de remoción de turbidez al combinar coagulantes líquidos de quitosano y *Opuntia ficus – indica* en la electrocoagulación.
- Evaluar la influencia del pH inicial y tiempo de tratamiento en la operación de coagulantes líquidos de quitosano y *Opuntia ficus – indica* en el resultado de remoción de turbidez y DQO
- Determinar la máxima eliminación de contaminantes de turbidez y DQO en un solo reactor electroquímico en comparación de otros métodos electroquímicos tradicionales y biotecnológicos.

## TABLA DE VARIABLES E INDICADORES

*Tabla 1: Cuadro de variables e indicadores*

Elementos		Denominación	Valores	Unidad
Parámetros		Velocidad	70	RPM
		Distancia entre electrodos	2	cm
		Temperatura	20	° C
		Dosis coagulante (Quitosano/Mucilago), v/v	1:1	-
Variables	<i>Independientes</i>	Voltaje	4, 8, 12	V
		pH	3.5; 7.5; 10.5	-
		Tiempo	0.5; 1.0; 1.5	h
	<i>Dependientes</i>	Turbidez	R*	NTU
		DQO	R*	mg O <sub>2</sub> /L

R\*: Resultados que se obtendrán al finalizar la experimentación.



### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. El agua residual de la industria de los derivados lácteos

Los efluentes generados por las industrias láctea suelen ser neutras o ligeramente alcalinas y con el riesgo de convertirse en ácidas rápidamente debido al proceso de degradación del azúcar presente en la leche, especialmente en condiciones de ausencia de oxígeno. Este proceso conlleva simultáneamente la formación de ácidos como es el caso del butírico, disminuyendo el pH a un rango de 4,5 a 5,0. Estos efluentes líquidos incluyen componentes orgánicos disueltos como sales inorgánicas, lactosa y partículas coloidales de proteínas, incluyendo globulinas, albúminas y caseína. Los valores de DQO superan a los de DBO en estas aguas, con un rango que va desde los 20000 hasta los 40000 mg/L, mientras que la DBO se encuentra entre 2000 y 3000 mg/L. El agua empleada para la elaboración de derivados lácteos en las industrias lácteas es oscilante en el intervalo de 8,0 a 35 L/Kg leche<sup>10 11</sup>

Entre el 90 y el 95% de la DBO<sub>5</sub>, que se representa con las siglas DBO, en las aguas de desecho o residuales de la industria de los lácteos proviene principalmente del desperdicio o pérdida del producto lácteo o leche, durante las etapas de fabricación<sup>5</sup>. El empleo de productos químicos y microbiológicos en la producción como colorantes de *Norbixina*, E-160b, agente fermentador, cloruro de calcio, cuajo y levaduras como aditivos en el proceso de producción son aquellos que contribuye con la presencia de la DBO y DQO<sup>12-15</sup>.

#### 3.2. Lactosuero

El suero de leche es el componente líquido que queda después de separar los sólidos de la leche durante el proceso de coagulación para la elaboración del queso. Este líquido está compuesto por todos los elementos de la leche que permanecen en estado líquido. Los efluentes del procesamiento de los derivados lácteos presentan temperaturas elevadas al momento de la descarga final y grandes variaciones en el pH, TSS, demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT), fósforo total (TP) y composición oleosa. En ese contexto, existe poca información sobre la composición específica de los efluentes lácteos a escala industrial ya que estos dependen del producto procesado o del valor agregado adicional que le brindan, es por ello existen valores aproximados de la concentración de los contaminantes como se muestran en la Tabla 2, la información bibliográfica brinda datos aproximados<sup>16-19</sup>. Adicionalmente, las aguas residuales de la industria láctea presentan características extras como el color blanco e incluso amarillento o con tendencia al color verde

con olores desagradables y de carácter turbio, estas aguas depredan biológicamente a fuentes receptoras como el suelo e incluso el agua superficial de lagos y ríos<sup>20-22</sup>.

**Tabla 2: Caracterización de lactosuero**

Parámetros	Concentración
DBO <sub>5</sub> , g/L	0.24-5.9
DQO, g/L	0.5-10.4
Aceites y grasas, g/L	0.02-1.92
Sólidos totales, g/L	0.71-7.0
Sólidos suspendidos, g/L	0.06-5.80
Nitrógeno total, g/L	0.01-0.66
Fosforo Total, g/L	0-0.6
pH	4-11
Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub> , g/L	0.32-1.2
Materia seca, g/L	55-75
Lactosa, g/L	44-52
Cloruros, g/L	2.0-2.2
Ácido láctico, g/L	2-6.4
Potasio, g/L	1.4-1.6

Nota: Tomado de<sup>23,24</sup>

De acuerdo con la FAO, para el caso del producto lácteo conocido como “queso”, clasificado como producto alimenticio por excelencia a nivel de todo el mundo. La lista en cuanto a la producción y el consumo de quesos es encabezada por la Unión Europea y seguido de los Estados Unidos, las instalaciones de producción generan efluentes que presentan un impacto medio ambiental considerable y significativo.

Estos efluentes lácteos son considerados como uno de los contaminantes más representativos y en abundancia de la industria de la leche; este se origina de la precipitación y eliminación de la proteína de la caseína en la fase de fabricación de queso y la producción de caseína, representando el aproximado del 90% del volumen total de la leche.<sup>25,26</sup> Cuando se llega a el PI (punto isoelectrico) de la caseína se forma este suero, resultando en la neutralización de las cargas que las mantienen distantes debido a las fuerzas de repelencia que producen, lo que impide la floculación. Este proceso implica la disgregación completa de las micelas.<sup>27</sup>

Este suero lácteo posee más del 50% de sólidos totales que se encuentran en la leche, lo que la hace altamente nutritiva. Se le atribuyen muchas propiedades, como depurativas, fortalecedoras

del sistema inmunológico y desintoxicantes y regeneradoras de la flora intestinal. Además, se cree que cuando se usa fresca, brinda al cuerpo los nutrientes que este requiere para lograr el equilibrio metabólico. Es el método más delicado, pero altamente eficaz para facilitar el flujo de bilis, la evacuación de heces y el vaciado de la vejiga.<sup>28</sup>

En el proceso de elaboración de queso, la mayor proporción de la lactosa contenida en la leche se transfiere al lactosuero, que constituye un subproducto relevante en la industria de los productos lácteos. La demanda global de lactosuero ha experimentado un crecimiento sustancial en la última década, alcanzando alrededor de 500,000 toneladas anuales.<sup>29</sup>

Sin embargo; dado su elevado contenido orgánico en los efluentes no son adecuados para ser dirigidos a instalaciones convencionales de tratamiento de aguas. Por ende, se están implementando diversos métodos de tratamiento, como procesos biológicos, químicos, electroquímicos, entre otros, con el objetivo de reducir la carga biológica de estos líquidos de desecho y utilizar los componentes nutritivos que contienen.<sup>24</sup>

### 3.2.1. Tipos de lactosuero

Según las propiedades fisicoquímicas se clasifican de acuerdo con la forma de eliminación de la caseína:

- a. **Lactosuero dulce:** líquido residual que resulta de la etapa de precipitación de proteínas en la hidrólisis caseína durante la coagulación enzimática. Este suero se caracteriza por tener un rango de temperatura de 15-50 °C y un pH de 5,9 a 6,6, con un contenido elevado de proteínas, lactosa y lípidos, y una menor concentración de calcio.<sup>28,30</sup>
- b. **Lactosuero ácido:** Se obtiene mediante coagulación ácida o acidificación, siendo ricos en Ca y P. Presenta un pH que varía entre 4,3 y 4,7, y se origina a partir de queso fresco o queso de pasta blanda como resultado de la producción de ácido láctico y su elevado contenido mineral, que representa valores mayores al 80% de los minerales presentes en la forma inicial de la leche.<sup>28</sup>

### 3.2.2. Aplicaciones del lactosuero

La concentración de proteínas solubles presentes en agua de suero lácteo, se ha demostrado que mediante diversas tecnologías de procesamiento se pueden obtener concentrados proteicos con amplias aplicaciones en los procesos industriales alimentarios para la obtención de subproductos como la lactosa en polvo, el suero en polvo comercial, el desmineralizado,

deslactosado, con bajo contenido de lactosa (RLW), las proteínas concentradas de suero (WPC), los aislados proteicos de suero (WPI), la lactoalbúmina y el suero permeado (WP)<sup>31</sup>.

### 3.2.3. Contaminación ambiental

Como se ha indicado previamente, el lactosuero ha sido históricamente tratado como un residuo de desecho, con una producción anual de aproximadamente 145 millones de toneladas<sup>32</sup>. El residuo lácteo (suero) es vertido en cuerpos receptores acuíferos y suelos, generando impactos ambientales negativos y significativos debido a su alto potencial contaminante, debido a su abundancia en materiales de origen biológico, especialmente lactosa. Esta última es la principal causa de contaminación, dado su rol como sustrato para la fermentación microbiana. Cuando el suero es liberado en cuerpos acuáticos, los microorganismos encargados de su descomposición requieren una cantidad significativa de oxígeno, lo que resulta en una reducción en la concentración de OD. El déficit puede provocar la mortalidad de los organismos acuáticos en esos ecosistemas. Asimismo, si el suero se descarga en suelos, puede infiltrarse en las aguas subterráneas, constituyendo un riesgo sanitario para humanos y animales.<sup>31</sup>

De acuerdo con la información bibliográfica el 10 % del total de la leche es convertida en queso, mientras que el 90% en lactosuero es un subproducto que por lo general es eliminado en la línea de proceso. Este lactosuero contiene alrededor del 55% de los elementos globales de la leche, incluyendo lactosa, proteínas solubles, vitaminas, grasas y minerales. Han sido planteadas varias posibilidades para el aprovechamiento de estos residuos; esto se debe a que constituye una fuente alimentaria de elevado valor nutricional, lo que ofrece oportunidades de crecimiento para el sector agrícola y lo convierte en un sustrato económico y beneficioso; sin embargo, las cifras demuestran que gran porcentaje de este efluente es descartado como aguas residuales, lo que crea un grave desafío ambiental, ya que daña al medio ambiente. Estas acciones afectan en la estructura de la tierra, tanto química o físicamente, disminuye la productividad de los cultivos y, al ser liberado en cuerpos de agua, provoca una disminución en la fauna acuática al reducir el contenido de oxígeno disuelto.<sup>25,26,33-35</sup>

La abundante concentración de nutrientes, donde la lactosa destaca, en el lactosuero, provoca una elevada carga orgánica, cuantificada en 3.5 kg de DBO y 6.8 kg de DQO por cada 100 kg de producto. Este alto valor se atribuye principalmente a la capacidad de la lactosa de consumir oxígeno durante los procesos de degradación biológica y química. Así mismo, el lactosuero

presenta una alta conductividad ocasionada por el derrame de cloruro de sodio derivado del proceso de salado del queso<sup>36</sup>.

- **Demanda química de oxígeno (DQO)**

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se refiere a la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente tanto la materia orgánica como inorgánica presente en las aguas residuales. Aunque la DQO no corresponde a un solo compuesto, se clasifica como un contaminante convencional de acuerdo con las normativas peruanas sobre **calidad ambiental del agua**, y se establece dentro del **Reglamento de la Ley General de Aguas (Ley N° 29338)** y las **Normas de Calidad Ambiental para el Agua (Resolución Ministerial N° 090-2010-ANA)**, que especifican los límites permisibles de DQO para los efluentes de diversas actividades industriales y urbanas; y es frecuentemente empleada por organismos reguladores para evaluar la efectividad de los sistemas de tratamiento de aguas. Además, sirve como un indicador del nivel de contaminación del efluente y del posible impacto ambiental que puede generar la liberación de aguas residuales en cuerpos acuáticos. La medición de la DQO se realiza utilizando un oxidante químico potente bajo condiciones estándar. Los componentes que contribuyen a la DQO incluyen compuestos orgánicos biodegradables, no biodegradables y compuestos inorgánicos susceptibles a la oxidación<sup>37</sup>.

- **Demanda química de oxígeno (DBO)**

El análisis de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) evalúa la cantidad de oxígeno consumido en la oxidación de la materia orgánica. En términos más específicos, mide el oxígeno utilizado por los microorganismos para descomponer biológicamente la materia orgánica presente en una muestra de agua. Este proceso está relacionado con el metabolismo microbiano, por lo que también se conoce como una prueba de "respiración". El análisis estándar de DBO tiene una duración de 5 días (DBO5). En esta prueba, una muestra de agua se coloca en una botella sellada y se mantiene en oscuridad a 20 °C durante 5 días. La diferencia entre la concentración de oxígeno disuelto antes y después de la incubación se considera la DBO5, y se expresa en mgO<sub>2</sub>/l. En el caso de aguas residuales, se requiere dilución para evitar que el oxígeno de la muestra se agote durante el tiempo de incubación<sup>38</sup>.

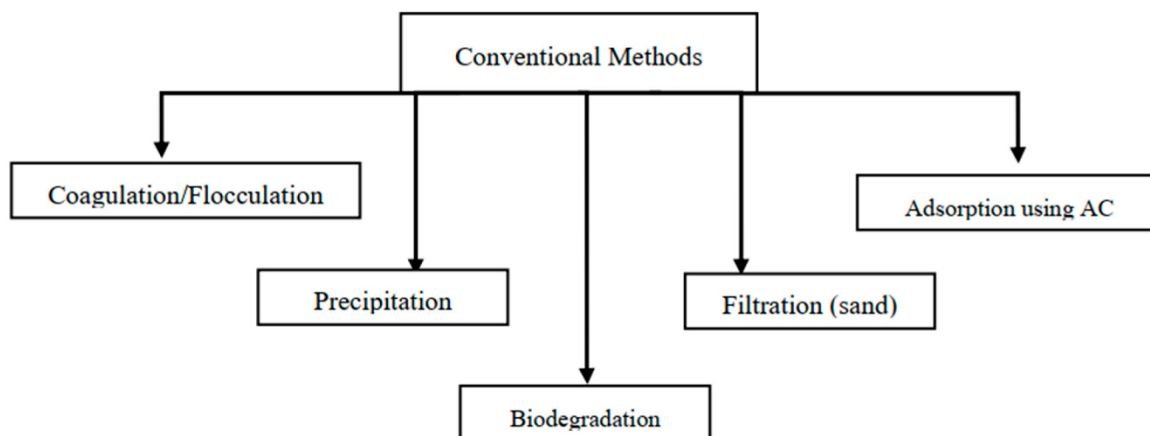
### 3.3. Métodos de tratamiento de efluentes lácteos

#### 3.3.1. Procesos de tratamientos biológicos convencionales

Aquellos procesos que han tenido mejor versatilidad en términos de rendimiento en la tasa de tratamiento por día, remoción de turbidez, DQO, DBO, compuestos oleosos y otros relacionados al lactosuero son aquellos tratamiento biológicos anaeróbico, aeróbico, facultativo o la combinación en serie que presentan en su línea de proceso sistemas de lodos activados ya que estos microorganismos son retenidos continuamente por medios de recirculaciones hidráulicas a tasas constantes de flujo y tiempo, se mantienen las cepas específicas bio surfactantes para degradar nuevos ingresos de flujos en sistemas continuos e incrementar la eficiencia de tratamiento. Otros aspectos positivos a rescatar, es la correcta distribución de energía eléctrica en los equipos de tratamiento aunque el consumo es elevado en los aireadores no se alejan de las rentabilidad que estas tecnologías tienen a comparación de las alternativas que tratan bajas tasas de flujo debido a los diseños por lotes que lo conforman, además, las tecnologías de lodos activados presenta desventajas como la generación elevada de lodos biológicos que requieren estabilización para la disposición final no cumpliendo con estándares de eliminación<sup>39,40</sup>.

Por otro lado, cuando se trata de lagunas anaeróbicas el consumo de energía es insignificante, sin embargo, la eficiencia en la eliminación de materia orgánica generalmente no cumple con los estándares de eliminación. Para la mayoría de las EDAR que contienen lagunas anaeróbicas, el uso posterior de una laguna aireada o facultativa es común como un medio para aumentar la eliminación de materia orgánica biodegradable y también oxidar N-NH<sub>4</sub>. Las industrias que utilizan reactores anaeróbicos (Upflow Anaerobic Sludge Blanket – UASB o un filtro anaeróbico) deben quemar el biogás generado, ya que contiene metano, que es un gas de efecto invernadero más dañino que el CO<sub>2</sub>. El biogás no se puede capturar cuando se produce en lagunas anaeróbicas descubiertas, lo que representa otra desventaja importante de este tipo de tratamiento<sup>41,42</sup>. En la Figura 1 se detalla las tecnologías convencionales para la eliminación de aguas residuales.

***Figura 1: Tecnologías convencionales para la eliminación de aguas residuales***



Tomado de: Al-Tayawi <sup>40</sup>

### 3.3.2. Procesos de tratamiento biológicos avanzados

Los procesos biológicos aeróbicos no convencionales que en estudios evaluaron el uso de biorreactores de membranas sumergidas eliminaron el 99% de la carga orgánica expresada en  $DBO_5$  y la DQO en el tiempo de 6 horas, e incluso estas eliminaron de forma eficiente aquellos compuestos moleculares de baja masa molecular mientras que los de alta masa molecular fueron retenidos en las membranas, el nitrógeno amoniacal se encontró por debajo del límite máximo permitido<sup>43,44</sup>. Por otro lado, otros respecto a los procesos biológicos anaeróbicos también evaluaron el uso de enzimas como las lipasas de micelio de hongos como el *P. citrinum* empleado como un catalizador por excelencia, sin embargo, la eliminación de los contaminantes fue en 46%. Estas alternativas de tratamiento pueden ser relativamente eficientes en cuanto a remoción de  $DBO_5$  y DQO e incluso la producción de biogás, sin embargo, desde un punto de vista económico no son viables por el elevado costo de proceso y por las cantidades de enzimas deficientes a mayor escala.<sup>45,46</sup>

### 3.3.3. Procesos de tratamiento electroquímicos

Los producción de leche por el sector ganadero y la industrialización del mismo en derivados lácteos, y este último utiliza grandes cantidades de agua dulce que genera a lo largo del proceso productivo un volumen significativo de aguas residuales, cuya consecuencia despertó el interés de brindar alternativas sostenibles de solución como la aplicación de tratamientos electroquímicos de oxidación avanzada bajo el concepto de economía circular con el objetivo de reutilizar las aguas residuales y que cumplan con los estándares legales de vertido y sean potencialmente reutilizables<sup>47</sup>.

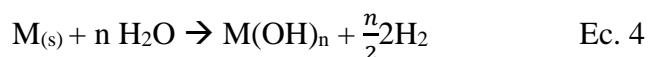
Algunas técnicas como los procesos de oxidación avanzada de Fenton. Electro fenton, ultrasónica de alta frecuencia, ozonización fotocatalítica (UV/TiO<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) han alcanzado eficiencias de eliminación de DQO en un 80% y en algunos casos eliminaciones deficientes lo que atribuye que existe mayores tiempos de retención y a bajo caudal en un sistema continuo. Por otro lado, la influencia del pH en el sistema electroquímico es importante regularlo ya que existe reportes donde el medio ácido prevalece en la reducción catódica de los electrones del aire inyectado en la solución de la superficie del cátodo donde destacan la importancia del uso de cátodos de carbono aumentando la electro-generación de peróxido cuando este último es empleado<sup>48-50</sup>. En el caso de los procesos basados en el fentón donde las eficiencias de remoción de DQO y COT se debieron a la formación de radicales hidroxilos donde también el pH es el factor de importancia, en medio ácido a pH 3 como se indican en las reacciones químicas siguientes:



Para los casos que usan otras fuentes metálicas, el comportamiento seguido de reacción es el siguiente:



Adicionalmente, a los conceptos científicos previamente reportados las técnicas electroquímicas tienen el objetivo la eliminación de contaminantes al ser conectados a una fuente de alimentación externa donde el proceso de oxidación comienza en el ánodo generando cationes metálicos, que, al mismo tiempo el agua se reduce para formar burbujas de gas hidrogeno e iones de hidróxido en el cátodo, tal como se detalla en la siguiente ecuación:



Induciéndose a la neutralización de las cargas de los contaminantes presentes en las aguas residuales cuando los agentes coagulantes alcanzan un punto isoeléctrico M(OH)<sub>n</sub>, estas especies colisionan dando lugar a flóculos de rápido crecimiento, más grandes y absorbentes que inducen a la eliminación de contaminantes, posterior a ello esos flóculos se eliminan mediante procesos de separación física<sup>51-55</sup>.

Por otro lado, la electrocoagulación se ha realizado también sola o por combinación con otros procesos como el electro flotación, peroxi-EC y fitorremediación. De acuerdo con los reportes bibliográficos las remociones de contaminantes son rápida en los primeros minutos, posteriormente a medida que continua la electrolisis las concentraciones van disminuyendo debido a que se almacenan más especies coagulantes dentro de la celda electroquímica alcanzando etapas estables. La energía suministrada, pH y tiempo son las variables más importantes de operación en estas metodologías<sup>56,57</sup>.

### 3.3.3.1. Principales ventajas y desventajas de la electrocoagulación

La siguiente tabla informa las ventajas y desventajas de la electrocoagulación.

**Tabla 3: Comparación de ventajas y desventajas de la electrocoagulación**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montajes simples y fáciles de operar.</li> <li>• No se usa reactivos químicos excedentes</li> <li>• Generación de poca cantidad de sólidos y de fácil sedimentación al tratar aguas residuales con partículas coloidales pequeñas el agua tratada resultante permite implementar procesos de filtración.</li> <li>• La eficiencia de la electrocoagulación en el tratamiento del agua residual se refleja en una reducción significativa del color, la eliminación del olor y la eliminación completa del contaminante.</li> <li>• Las burbujas de gas producidas contribuyen al proceso de separación mediante flotación de los flóculos formados.</li> <li>• Se puede emplear energías renovables (solar) para el funcionamiento de la celda electroquímica para aquellos lugares donde no hay acceso a energías convencionales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los "electrodos de sacrificio" deben reemplazarse periódicamente ya que estas se disuelven.</li> <li>• Los lodos presentan elevadas concentraciones de metales, como hierro y aluminio, en función del tipo de material empleado en los electrodos de sacrificio, requiriendo un tratamiento adicional antes de su disposición final. Los lodos ricos en aluminio pueden procesarse para obtener óxidos de aluminio, que son utilizados en la industria cerámica o como catalizadores<sup>58</sup>, pueden incorporarse como aditivos en la fabricación de cemento, mejorando ciertas propiedades mecánicas del material<sup>59,60</sup>.</li> <li>• En algunas aplicaciones hay excedentes de costos generados por el consumo de energía eléctrica.</li> </ul>

- |  |   |
|--|---|
|  | <ul style="list-style-type: none"><li>• En algunos casos se forma películas de óxido impermeable en el cátodo, generando pérdida en la eficiencia de la unidad de electrocoagulación.</li></ul> |
|--|---|

Nota: Tomado de Mollah<sup>61</sup>

#### 3.3.3.4. Factores que afectan la electrocoagulación

##### El pH

De acuerdo con los reportes bibliográficos se indica que el pH genera una dependencia en la eficiencia de la corriente eléctrica y cuya consecuencia es la formación de hidróxidos. Reportándose estudios donde el pH varío significativamente en el trayecto de la electrocoagulación; dependiendo también del material del electrodo y de las condiciones iniciales del agua contaminada. En la caracterización de aguas ácidas el pH presenta incrementos debido a la producción de hidrógeno molecular generados en el cátodo, mientras que en aguas residuales alcalinas el pH disminuye; así mismo dependiendo del tipo de contaminante el pH afecta la eficiencia del proceso. Se reportaron que en el rango específico de pH de acuerdo con el tipo de agua residual se da mayor eficiencia en la remoción de contaminantes, los resultados más satisfactorios se obtuvieron en valores de pH cercanos a 7.<sup>62</sup>

##### La energía suministrada

Las variables eléctricas son parámetros bastante influyentes y relevantes y están ligadas al factor económico. La remoción de contaminantes es dependiente de la corriente suministrada al medio acuoso está incrementándose proporcionalmente y originando mayor consumo de energía e incremento de temperatura del medio acuoso<sup>62</sup> y en cuanto a rentabilidad algunos inviabilizan económicamente por el excedente de gastos generados.

##### Temperatura

Aunque el impacto de la temperatura en la electrocoagulación aún no ha sido muy estudiado, se ha determinado que al llegar a los 60 °C incrementa la eficiencia inicial de corriente para electrodos de aluminio<sup>62</sup>.

##### Distancia entre electrodos

La distancia que existe entre los electrodos debe ser la más mínima posible para reducir el valor óhmico del sobrepotencial. Sin embargo, es esencial encontrar un equilibrio que permita un rendimiento hidrodinámico eficaz del reactor para favorecer la transferencia de masa y evitando posibles problemas como obturaciones en caso de formación de espumas, entre otros<sup>61</sup>.

Influye directamente en el campo electrostático entre los ánodos y los cátodos. Si se disminuye la distancia entre electrodos el campo electrostático aumentará eventualmente. Ocasionando que los hidróxidos metálicos (que son los que ayudan en la coagulación debido a que forman flóculos) se deterioren por las intensas colisiones estimuladas por la alta atracción electrostática. Como resultado, la eficiencia del proceso electrocoagulación mejora significativamente con un espaciado de electrodos más corto. Así mismo, una distancia mayor entre electrodos detiene la producción posterior de flóculos a base de hidróxido metálico debido a las bajas fuerzas electrostáticas. Demasiada distancia entre los electrodos también reduce la eficiencia del proceso, lo que origina un alto consumo de energía que compensa la baja liberación de iones metálicos entre los electrodos. Entre el ánodo y el cátodo debe existir una distancia de 0.5 a 1 cm en promedio para los distintos tratamientos de aguas residuales<sup>63</sup>.

### **Tiempo**

La influencia del tiempo en el proceso de electrocoagulación es observada al obtener resultados que se encuentran con relación a los sólidos formados, ello es debido a que los electrodos al tener mayor tiempo de contacto con la corriente eléctrica en la superficie estas se ven afectadas por fenómenos fisicoquímicos donde ocurren reacciones de oxidación y reducción. Los iones metálicos al ser liberados por las reacciones en la superficie de los electros estas permiten las partículas de mayor tamaño se junten entre sí formando partículas más grandes e incluso la generación de espuma por la degradación de materia orgánica. Seguidamente la posterior decantación para eliminar el lodo remanente, la pequeña variación del tiempo representa la influencia en la cantidad de sólidos obtenidos. Sin embargo, algunos reportes bibliográficos indican que esta variable no es significativa en el proceso de electrocoagulación siendo otras como el pH, ya que éste, está muy vinculado a la constante del producto de solubilidad (Kps).<sup>64</sup>

#### **3.3.4. Procesos de tratamientos fisicoquímicos**

Los tratamientos fisicoquímicos, tales como la coagulación y floculación hace referencia a el procedimiento donde coloides se reúnen en pequeñas aglomeraciones, denominadas flóculos, que poseen una densidad mayor a la que tiene el agua. Este método fisicoquímico consiste en

añadir reactivos químicos al agua residual para fomentar la sedimentación de partículas coloidales que no logran sedimentarse de manera natural o para acelerar este proceso mediante el agrupamiento de partículas<sup>65</sup>.

Este proceso se emplea con el propósito de conseguir:

- Incrementar la eficiencia de eliminación de turbidez, contaminantes orgánicos e inorgánicos.
- Eliminación de color real y aparente.
- Eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos que generan turbidez y alteran las propiedades organolépticas.
- La esterilización e inactivación de agentes etiológicos
- La erradicación completa de la biomasa algal y planctónica <sup>66</sup>.

La presencia color en el agua y turbidez se debe principalmente a la existencia de partículas extremadamente pequeñas conocidas como partículas coloidales, estas son sustancias, disueltas, en suspensión, orgánicas e inorgánicas, debido a esto el enfoque del tratamiento de aguas se dirige a la eliminación de los coloides. Estas partículas se mantienen en suspensión en el agua a lo largo de períodos prolongados y tienen la capacidad de atravesar incluso medios filtrantes muy finos<sup>67</sup>.

Las sustancias en suspensión pueden tener dimensiones y densidades que permiten su eliminación del agua mediante sedimentación directa. Sin embargo, ciertas partículas son tan diminutas y poseen una carga eléctrica superficial que les impide aglomerarse, lo cual resulta en una continua repulsión, dificultando la formación de partículas más pesadas que podrían sedimentar. La repulsión entre materia coloidal se debe a la carga eléctrica que comparten. En el agua, la carga negativa es característica de las partículas coloidales, lo que impide su aglomeración y les permite permanecer en el líquido. Por esta razón, es necesario y esencial incorporar un electrolito para neutralizar la carga eléctrica del coloide con el fin de facilitar su eliminación mediante el proceso de decantación y lograr una eficiente purificación por coagulación y floculación<sup>66</sup>.

Es fundamental aplicar con precisión estos métodos de tratamiento para incrementar el valor de la calidad del agua, ya que la formación de un floc demasiado pequeño o liviano conduce a una

sedimentación inadecuada. Si se presenta un incremento de concentración de flocs al momento en que el agua ingresa a los filtros, provoca una rápida obstrucción de los mismos, lo que exige lavados frecuentes. De esta forma, cuando la pequeña partícula es inestable, se desintegra en tamaños submicrométricos que pueden transportarse con facilidad por el medio filtrante, comprometiendo así la calidad del efluente tratado<sup>67</sup>.

Finalmente, en la Tabla 4 se detalla un comparativo en términos generales del proceso que gobierna algunas alternativas de tratamiento de aguas residuales de la industria láctea, como las características ventajas y desventajas.



**Tabla 4: Tabla de ventajas y desventajas algunas alternativas de tratamiento de aguas residuales de la industria láctea**

Proceso	Característica(s) principal(es)	Ventajas	Desventajas
Decantación química <sup>68</sup>	Reacción química orgánica y separación de contaminantes	Eficiencia para aguas con altas cargas contaminantes. Eliminación de metales, fosforo y fluoruros.	Consumo de productos químicos Control de pH. Problemas con la generación, manipulación y eliminación de lodos Elevados costos.
Coagulación/ floculación <sup>69,70</sup>	Captación de contaminantes y decantación.	Bajo gasto de capital. Simplicidad integrada. Métodos fisicoquímicos. Químicos están disponibles comercialmente. Buena sedimentación y manejo de lodos. Eficiencia significativa de la DQO y la DBO. Potencial de inactivación bacteriana Eliminación eficaz de colorantes.	Se requiere adición de productos químicos no reciclables (coagulantes, floculantes, coadyuvantes). Monitoreo fisicoquímico de efluentes. Se ha incrementado el volumen de producción de lodos (gestión de costos, tratamiento)

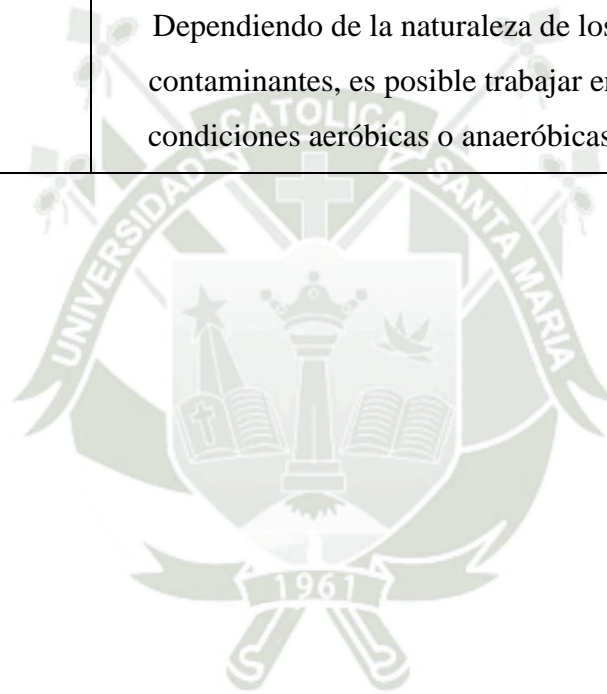
<p>Adsorción/ filtración<sup>71</sup></p>	<p>Método no destructivo Utilización de un material sólido</p>	<p>Esencial en términos de tecnología (equipo simple) y adaptable a varias modalidades de tratamiento. Dirigido a la amplia gama de contaminantes Técnica eficiente y cinética rápida Calidad de efluente tratado Separación de moléculas refractarias. Tratamiento altamente efectivo cuando se combina con coagulación para eliminar sólidos suspendidos, DQO y color. Uso finito de productos químicos.</p>	<p>La inversión es relativamente alta. Costos de materiales, procesos no selectivos. La regeneración es costosa y genera desperdicio de material. Modificación química para mejorar la capacidad de adsorción. Manejo de residuo del adsorbente con alto costo. Saturación y bloqueo rápidos del reactor. Ineficiente para ciertos tipos de colorantes y metales.</p>
<p>Biodegradación<sup>72</sup></p>	<p>Utilización de un microorganismo</p>	<p>Capacidad de descomponer contaminantes orgánicos peligrosos. Se requiere menos energía. Puede biodegradar contaminantes orgánicos mediante la actividad metabólica de los microorganismos. Debido a su adaptabilidad específica a las circunstancias abióticas en las que se originan, el uso de microorganismos aislados de hábitats extremos se vuelve</p>	<p>Debido a la inhibición, este proceso es lento y ocurre solo en concentraciones bajas. Se requiere una gran superficie para el desarrollo. Se requiere mucha energía para los aireadores. Se requiere un remedio adicional.</p>

ventajoso.

Como resultado de su resiliencia al pH, la temperatura y la salinidad, pueden ayudar en la biodegradación.

Dependiendo de la naturaleza de los contaminantes, es posible trabajar en condiciones aeróbicas o anaeróbicas.

De acuerdo a lo reportado por Hannah<sup>73</sup>



### 3.2. Fenómenos de coagulación

Consiste en reducir las fuerzas repulsivas entre las partículas coloidales para facilitar su coagulación, aglomeración. Como resultado, se logra la eliminación de las sustancias suspendidas que son estables. Además de reducir la turbidez, la coagulación disminuye la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la concentración de microorganismos <sup>67</sup>.

Para el proceso de saneamiento de aguas, se describe la coagulación como el efecto electroquímico generado al añadir coagulantes químicos al agua que ayudan a contrarrestar las cargas, provocando un colapso de la "capa de iones" que rodea los coloides para permitir que se agrupen. Esto resulta en la disminución de las cargas eléctricas superficiales de la materia coloidal, al mismo tiempo que se forman complejos de hidróxidos. Estos efectos generalmente ocurren de manera instantánea, sin requerir más tiempo que el necesario para mezclar los reactivos con el agua<sup>66,67</sup>

Los agentes químicos inducen la neutralización de las cargas eléctricas en la capa superficial del coloide, facilitando la coalescencia de las suspensiones coloidales para la formación de flóculos. Inicialmente, los flóculos son de dimensiones diminutas, pero conforme se agregan, evolucionan hacia flóculos de mayor tamaño, capaces de sedimentar.

Desde una perspectiva energética, algunas suspensiones coloidales se han considerado estables termodinámicamente y se denominan coloides reversibles. Ejemplos de estos incluyen las partículas de jabones o detergentes, aminas, algunos polímeros y proteínas de cadena larga. Por otro lado, existen coloides que, desde el punto de vista termodinámico, son inestables y se conocen como irreversibles. Entre ellos se encuentran algunos microorganismos, los óxidos metálicos y las arcillas, los cuales tienden a coagularse con facilidad. La coagulación puede ocurrir de manera rápida o lenta dependiendo del coloide. Es relevante destacar que los términos "termoestable" e "inestable" a menudo se aplican a los coloides irreversibles, centrándose principalmente en la cinética de coagulación en lugar de sus propiedades energéticas y termodinámicas. De esta manera, un sistema coloidal que es inestable cinéticamente se clasifica como irreversible, en el cual la coagulación desempeña un papel crucial <sup>74</sup>.

La coagulación destaca como el procedimiento más significativo para eliminar partículas coloidales y suspendidas durante el proceso de potabilización del agua, logrando remociones que alcanzan el 80-90%<sup>75</sup>.

Si la coagulación se lleva a cabo de manera inadecuada puede ocasionar una rápida disminución en la calidad del agua y resultar en gastos operativos injustificados. Por lo tanto, se destaca la importancia de ajustar adecuadamente la cantidad del coagulante, ya que esto regula el rendimiento de los equipos de decantación y hace inviable lograr una sedimentación si dosis de coagulante no se encuentra adecuadamente ajustada<sup>67</sup>.

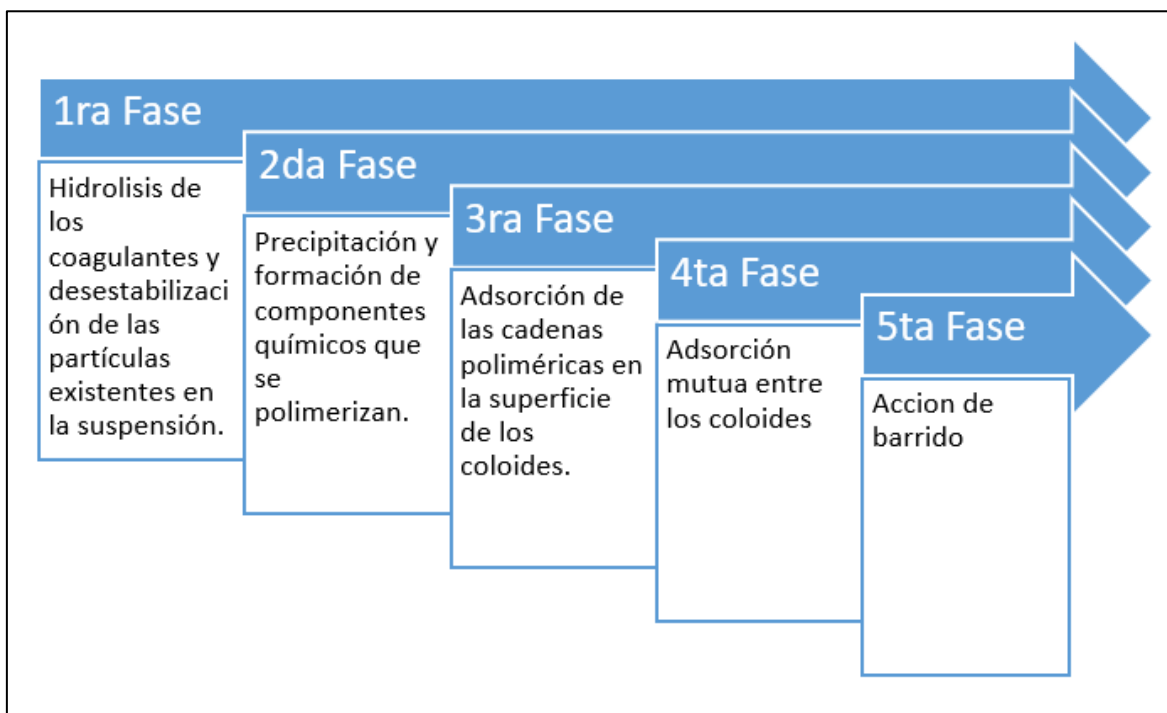
Se argumenta que para desestabilizar las partículas coloidales y lograr su separación, se necesita un tratamiento físico-químico de separación sólido-líquido mediante coagulación, floculación y sedimentación o flotación para la remoción de sólidos en suspensión<sup>65,76</sup>.

El proceso de coagulación y floculación ocurren en etapas secuenciales, de manera que, tras la desestabilización de las partículas, las colisiones entre ellas promueven la formación de micro flóculos, que son apenas visibles a simple vista, y estos se desarrollan posteriormente en flóculos de mayor diámetro. La coagulación se considera exitosa cuando se observa una buena separación de fases, con micro flóculos densos y un sobrenadante claro. Si esto no sucede, es probable que no se haya neutralizado completamente todas las cargas de las partículas, indicando que la coagulación no ha concluido y, en este caso, se requerirá agregar más coagulante<sup>77</sup>.

#### **3.2.4. Etapas del proceso de coagulación**

En la Figura 2 se explica resumidamente el proceso de coagulación representado en 5 etapas de: hidrólisis de coagulantes, precipitación y formación, adsorción de cadenas poliméricas, adsorción entre partículas coloidales y las de acción de barrido. De este modo es posible remover los contaminantes orgánicos y poder reusar el agua tratada e incluso poder ser vertida a un cuerpo receptos sin alterar las propiedades físicas y químicas.

En ese sentido, la teórica nos reporta conceptos en el cual son importante conocerlos como: los mecanismos del proceso de coagulación, factores de mayor influencia en la coagulación y calidad del agua sin procesar.

*Figura 1: Etapas del proceso de coagulación*

Nota: Tomado de <sup>67</sup>

### 3.2.5. Mecanismo del proceso de coagulación

Las partículas coloidales, microorganismos y húmicas aportan carga catiónica negativa al agua, lo que dificulta su aproximación. En el proceso de tratamiento de efluentes residuales es indispensable el ajuste de las cargas eléctricas en las partículas coloidales presentes en estas, se logra mediante la adición de coagulantes inorgánicos como sales de aluminio o hierro, así como polímeros sintéticos, con el fin de inducir el fenómeno de coagulación. En la actualidad la coagulación o desestabilización se considera como el producto de la intervención de cuatro mecanismos fisicoquímicos<sup>74</sup>:

### 3.2.6. Adsorción y neutralización de cargas

Los elementos coloidales poseen una carga eléctrica negativa conocida como carga primaria que atrae los iones positivos presentes en el agua generando una doble capa eléctrica en la superficie del coloide, el cual es regulado el movimiento de los coloides e interpretado por el denominado potencial ZETA.

Los procesos de coagulación también se comprenden como la neutralización altamente significativa al añadir productos químicos que permitan realizar procesos de coagulación-floculación. En dicho proceso, la mezcla natural provocada por el movimiento browniano

no es suficiente, por lo que es necesario aplicar energía adicional, la mezcla hidráulica y la agitación son una de las metodologías comúnmente empleadas en la industria. Si se agrega un exceso de coagulante al agua tratada, las partículas pueden volver a estabilizarse. Esto ocurre debido a que el coagulante se adhiere a la superficie de las partículas, invirtiendo la polaridad de su carga en comparación con la carga original<sup>67,78</sup>.

### 3.2.7. Calidad del agua sin procesar

Los elementos del agua en su estado natural que tienen una influencia considerable en la efectividad del proceso influyen factores como la concentración de coloides, que suele medirse a través de la turbidez o la coloración del agua, además de la temperatura, el pH, el tamaño de las partículas y la alcalinidad.

- **Alta concentración de coloides y alcalinidad baja**

El método más fácil de implementar, dado que únicamente demanda la evaluación de una variable química: la cantidad precisa de coagulante. La desestabilización ocurre a través de la adsorción de compuestos con carga positiva e hidrolíticos, las cuales forman rápidamente dependiendo del tipo de coagulante entre valores ácidos de 4 hasta 6 de pH.

- **Alta concentración de coloides y alcalinidad alta**

Bajo estas circunstancias, se lleva a cabo de nuevo la desestabilización mediante la neutralización y la adsorción de las cargas en condiciones de pH neutros o ácidos. La proximidad del pH al punto isoeléctrico de los polímeros de hidróxidos metálicos, caracterizado por una baja densidad de carga superficial, simplifica los procesos de neutralización.

- **Baja concentración de coloides y alcalinidad alta**

En este caso, la coagulación se realiza utilizando una dosis relativamente elevada de coagulantes para atrapar las partículas coloidales. Se puede incorporar arcilla o bentonita como alternativa para incrementar la concentración de coloides y el contacto entre las partículas. La desestabilización se conseguiría a través de la adsorción y neutralización de las cargas.

- **Baja concentración coloidal y alcalinidad baja**

Los procesos de tratamiento por coagulación resultan más complicados en sistemas con baja concentración de coloides y alcalinidad reducida. Este proceso fisicoquímico es más desafiante debido a que la adición de coagulante disminuye el pH, dificultando la formación de hidróxidos. De igual manera, la coagulación por adsorción se torna difícil porque la concentración de coloides es insuficiente para facilitar el contacto entre las partículas. Para lograr una coagulación efectiva en estos casos, se debe añadir alcalinidad adicional y/o preferiblemente arcilla o bentonita.

### 3.2.8. Variables que influyen en el proceso de coagulación

#### Temperatura

La temperatura también juega un papel importante, especialmente en regiones con clima extremadamente severo, especialmente cuando las temperaturas alcanzan la congelación.

Un parámetro adicional que condiciona el comportamiento del sistema de coagulación es la temperatura del agua ya que esta tiene un impacto en la duración y efectividad. La temperatura, al modificar la densidad del solvente o agua, influye en las interacciones intermoleculares y, por ende, en la dinámica de las partículas coloidales, resultando en tiempos de sedimentación más prolongados. Las temperaturas más bajas aumentan la viscosidad del agua, lo que no favorece la formación del floc<sup>67,79</sup> y el fenómeno de transporte disminuye, la temperatura influye en el pH óptimo, de manera que a temperaturas más bajas se requieren valores de pH más bajos.<sup>74</sup>

Cahill y Fitz Patrick como reportaron en sus estudios, examinaron el efecto de este componente en una serie de plantas de tratamiento en Chicago y encontraron dos intervalos de variación significativos: uno entre 0 y 10 °C y otro entre 10 y 40 °C. Se observó que la eficiencia aumentaba a medida que aumentaba la temperatura entre 10 y 40 °C debido al aumento de la tasa de colisiones entre las partículas. La turbidez y la alcalinidad son factores importantes dentro de este rango.<sup>74</sup>

#### Influencia del pH

El valor del pH es clave durante la coagulación de las moléculas orgánicas e inorgánicas. La turbidez causada por partículas coloidales inorgánicas se elimina de manera efectiva

mediante coagulantes orgánicos con un pH aproximadamente. Por su parte, las sustancias orgánicas naturales se recomiendan ser eliminadas a valores de pH ácidos; de acuerdo con el tipo de coagulante, el rango recomendado es de 4 a 7.5. En términos generales, para la coagulación de aguas con color, el pH ideal es más bajo (entre 4 a 6) en comparación con aquellas con mayor turbidez (entre 6,5 a 8,5). En general, el rango de pH óptimo para la acción coagulante de las sales férricas es mayor que el de las sales de aluminio<sup>67,74</sup>.

### **Turbidez**

La turbidez del agua es una propiedad óptica que provoca que la luz se disperse y absorba, en lugar de ser transmitida. La dispersión de la luz que atraviesa un líquido es provocada principalmente por los sólidos suspendidos. A mayor turbidez, mayor será la luz dispersa.

La turbidez es un indicador y no dará resultados acerca de un contaminante en específico. Sin embargo, brinda información valiosa acerca del grado de contaminación general de una muestra de agua. Existen diferentes métodos para la medición de turbidez y su elección dependerá de la aplicación en la que se desean utilizar. Cada método cuenta con sus unidades de medición específicas. El estándar ISO utiliza las FNU (Unidades Nefelométricas de Formacina), mientras que la EPA utiliza las NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez). Existen otras unidades como las FTU, JTU y EBC. El indicador que mide la turbidez, está relacionado con características como cantidad, tamaño y forma, se utiliza para cuantificar la cantidad de partículas coloidales en el agua. La turbidez se mide para evaluar la eficacia del proceso, siendo más eficientes las aguas con menos turbidez residual. Se identifica un rango de pH ideal entre 6.5 y 7.5, donde la coagulación se lleva a cabo sin dificultades<sup>67,79</sup>.

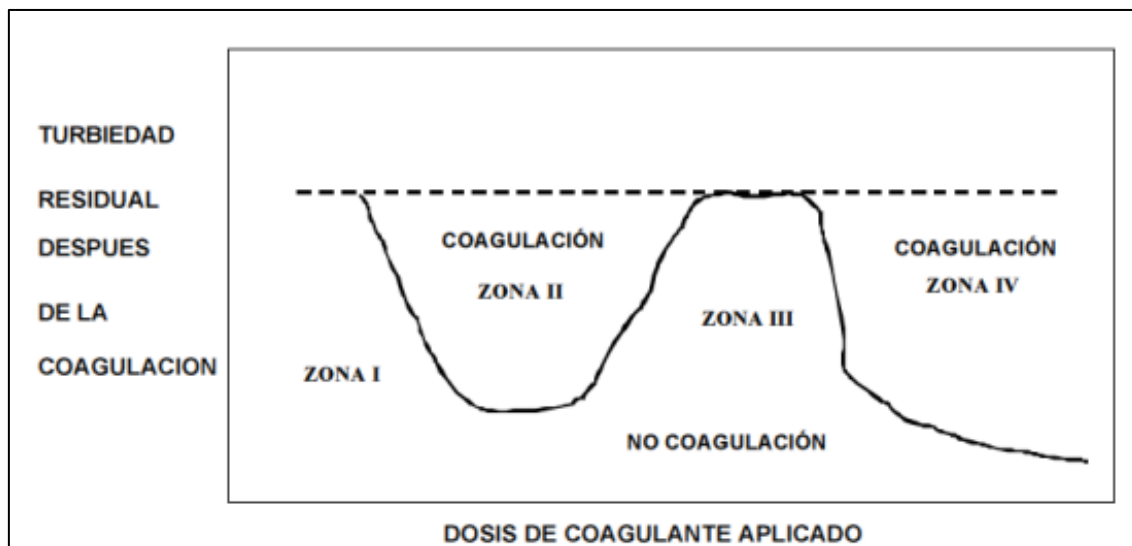
### **Dosis de coagulante**

La mezcla adecuada del coagulante en el agua representa el principal desafío para lograr una coagulación eficaz. La complicación radica cuando las dosis de coagulante son reducidas en comparación en función a la cantidad de volumen a tratar. Solo llevando a cabo pruebas de jarras con la muestra del agua contaminada que va a ser tratada se logrará determinar la concentración óptima a emplear en cada situación. Esto se debe a que la dosis del coagulante puede modificarse con facilidad en las plantas de tratamiento de agua<sup>74</sup>.

La cantidad ideal de coagulante se refiere a aquella que logra la desestabilización efectiva de los coloidales facilitando la formación de un floculo denso y compacto que sedimenta fácilmente. Esta dosis se determina a través de la prueba de jarras específica para el

coagulante, identificándose como la cantidad que resulta en la menor turbidez residual. La Figura 3 ilustra los distintos escenarios para la aplicación de las dosis de coagulante.

*Figura 2: Zonas que se producen durante la coagulación.*



Nota: Tomado de<sup>67</sup>

### 3.3. Tipos de coagulantes

#### 3.3.4. Coagulantes sintéticos

Los coagulantes sintéticos, principalmente de origen químico, presentan la capacidad de desestabilizar las partículas coloidales en suspensión, lo que provoca su sedimentación en el cuerpo de agua y la formación de lodos voluminosos e insolubles en el fondo. Estos coagulantes son ampliamente empleados debido a su eficacia para eliminar la turbidez, el color y ciertos metales. Entre los coagulantes químicos más comúnmente utilizados en el proceso de coagulación se encuentran el sulfato de aluminio y el cloruro de hierro. Estos coagulantes generan compuestos como hidróxidos de aluminio o hierro a través de sus reacciones de hidrólisis, formando precipitados que no se disuelven.<sup>67,79</sup>

Según Shrivastava<sup>67</sup> los coagulantes de origen químico utilizados en la coagulación son:  $\text{NaAlO}_2$ ;  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ;  $\text{FeCl}_3$ ;  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ;  $\text{AlCl}_3$ ;  $\text{FeSO}_4$  y polielectrolitos.

#### 3.3.5. Coagulantes naturales

Son aquellos reactivos de fácil solubilidad en el agua, extraídos a partir de materia vegetal que desempeñan la función de coagulantes y son capaces de remover sólidos sedimentables en forma de coloides cumpliendo la función similar a la de un agente coagulante químico.

No obstante, los coagulantes de origen vegetal ofrecen la ventaja adicional de eliminar microorganismos patógenos. Además, al ser de origen vegetal, no generan efectos perjudiciales en el organismo ni en su uso en la agricultura, y producen lodos que son biodegradables<sup>80</sup>. Aquellos coagulantes naturales derivados de plantas que también se emplearon en África subsahariana, la India y América del Sur fueron obtenidos a partir de las semillas de almendra, albaricoque, melocotón, cactus *Opuntia*, legumbres, guisantes, lentejas, nueces, habas, guar y *Moringa oleífera*<sup>80</sup>. Cuya relevancia en la elección del coagulante y la cantidad adecuada se debe a que influirá en la calidad adecuada o deficiente del agua tratada y en el rendimiento eficaz o deficiente de los procesos subsiguientes en el tratamiento del agua<sup>80,81</sup>.

No obstante, la principal limitación de los coagulantes naturales es que, al ser añadidos al agua en forma pulverizada, aumentan de manera considerable la carga orgánica, introduciendo hasta un 90% de sustancias orgánicas que no desempeñan el papel de agentes floculantes. Se observó que el tratamiento de agua con tuna resultó en un valor de DQO residual el doble en comparación con el tratamiento convencional utilizando sulfato de aluminio<sup>82</sup>.

Además de utilizarse en la clarificación y purificación de aguas crudas, se ha investigado el uso de coagulantes naturales en el tratamiento de efluentes residuales de la industria textil, la extracción de aceite de oliva, aguas con altos niveles de metales pesados como el cadmio, así como en la deshidratación de lodos, logrando obtener resultados favorables<sup>83</sup>.

### **3.4. Quitina y quitosano**

#### **Generalidades**

##### **3.4.4. Quitina**

Es el polímero natural más encontrado en la naturaleza, en segundo lugar, la celulosa. La quitina presenta una característica blanca, dura e inelástica, hidrófoba lo que conduce a su insolubilidad en agua atribuido por los puentes de hidrogeno y por la dureza que lo conforma<sup>57</sup>, siendo esta la mayor fuente natural de contaminación en los litorales marítimos<sup>84</sup>. El origen de este biopolímero natural es del exoesqueleto de los crustáceos e insectos, así como también de las paredes celulares de algunos hongos, levaduras y algas de acuerdo a lo reportado<sup>85</sup>. Este compuesto tiene como origen la investigación realizada por

Henri Braconnot en 1811, el proceso fue realizado al aislar un polisacárido de hongos por medio de un tratamiento alcalino. Posteriormente, la sustancia fue aislada de caparzones de crustáceos marinos recibiendo el nombre de quitina que cumple la función de túnica o cobertura en el crustaceo<sup>86</sup>.

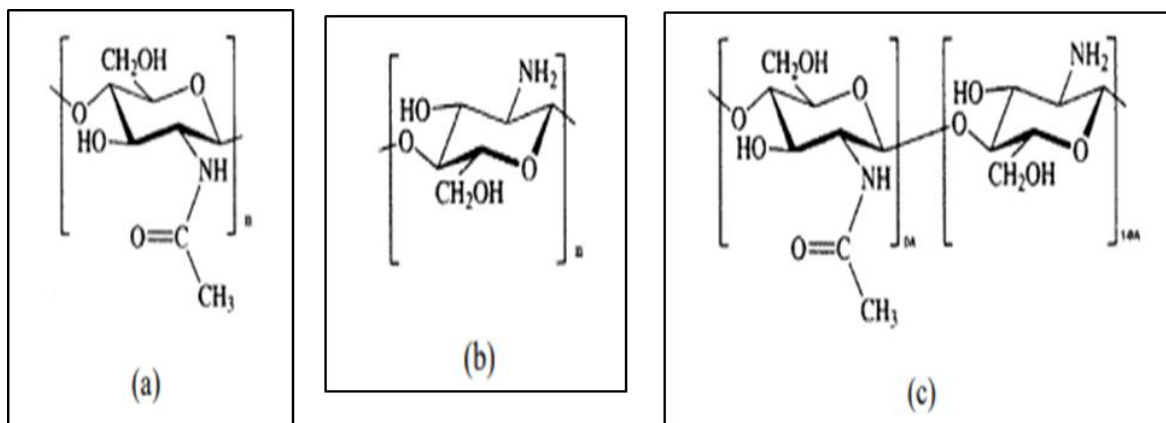
### 3.4.5. Quitosano

Principal amino-polisacárido derivado de la quitina, el segundo derivado es el quitano, es el único biopolímero que se obtiene a través de un proceso de desacetilización parcial de la quitina; este nombre adquiere cuando el grado de des acetilación de la quitina es mayor al 50% influyendo en las propiedades físicas de la resistencia a la tracción, solubilidad, área superficial, viscosidad, conductividad, porosidad y flexibilidad, y quitano cuando es mayor del 100%<sup>87</sup>. Su obtención es por medio de la hidrólisis de la quitina en medio alcalino usando hidróxido de sodio o potasio a elevadas temperaturas. El compuesto obtenido presenta propiedades de biodegradabilidad, biocompatibilidad y no toxicidad aplicados en la industria alimentaria, farmacéutica, agricultura e incluso como alternativa de remoción de metales pesados para el tratamiento de aguas residuales provenientes de industrias<sup>88</sup>. Además, que es soluble en agua, medio ácido, ácido acético, fórmico, málico, entre otros con por la formación de cargas positivas en los radicales aminos dependiendo de la cantidad presente que se encuentra libres. Es importante resaltar que es insoluble en medio neutro y alcalino<sup>86,89</sup>.

La composición del quitosano contiene una amina primaria compuesta por dos monómeros. Amino-polisacárido compuesto sobre todo de unidades repetitivas de 2-amino-2-desoxi- $\beta$ -D-Glucopiranososa y en segundo lugar 2-Acetilamina-2-desoxi- $\beta$ -D-(+)- Glucopiranososa<sup>85</sup>. Debido al alto contenido puro de nitrógeno (6.89%) la quitina y el quitosano tienen un alto interés comercial e industrial<sup>84,85</sup>. Sin embargo, su aplicación limitante va a depender del grado de des acetilación, tamaño de la cadena polimérica y purificación que afectan las propiedades finales del quitosano<sup>90</sup>.

En la Figura 4 se presentan las estructuras químicas de la quitina, el quitano y el quitosano.

**Figura 4: Estructuras químicas de la quitina, el quitano y el quitosano.**



Nota: Tomado de <sup>56</sup>

### 3.4.6. Aplicaciones

- ✓ **Química analítica:** Las aplicaciones en métodos analíticos como la cromatografía iónica, absorción de metales pesados y en biomedicina o salud como se dan en la liberación de fármacos, insulina, membranas de las hemodiálisis, también se aplica en suturas biodegradables, piel artificial en quemaduras, refuerzo de uñas y huesos, agente cicatrizante, tratamiento de tumores (leucemia) y en el control de sida, etc.
- ✓ **Agricultura y ganadería:** En la conservación de semillas durante el almacenamiento, clarificación de jugos de fruta, sistemas liberadores de fertilizantes, aditivo para alimento de animales, en formulación de pesticidas, protección de plántulas, control de agroquímicos, crecimiento de animales, retardante en la autooxidación de los frutos y tubérculos y uso exclusivo de biocidas.
- ✓ **Cosméticos:** se usa como aditivo bactericida en jabones, champús, espumas de afeitar, cremas para la piel, el cuerpo, pasta dental, etc. Agente hidratante para la piel, debido a que sus geles pueden suministrar agua y evitar la resequedad. Además, el quitosano forma una película que ayuda a dosificar otros principios activos<sup>87</sup>.
- ✓ **Industria y tratamiento de agua:** En la industria papelera, alimentaria como espesante en alimentos y preservante. Mientras que en el tratamiento de agua es usado como agente floculante, coagulante en aplicaciones de investigación básica, remoción de aceite de pescado en agua, filtros de agua para piscinas y spas, etc.<sup>85,87,91</sup>

### 3.5. Mucilago de nopal (*Opuntia Ficus-indica*)

Situado originalmente en el continente americano, y su presencia abarca desde Canadá hasta Argentina y Sudáfrica, destacándose en áreas caracterizadas por su aridez o semiáridas. Sus

atributos morfológicos y fisiológicos le confieren la capacidad de crecer diferentes tipos de climas, desde una baja precipitación hasta extremos de temperaturas elevadas y bajas<sup>92</sup>. Tournefort en 1700 fue quien le otorgo el nombre científico debido a la semejanza con una similar de tipo espinosa que crecía en el poblado de Opus en Grecia.<sup>93</sup>

Pertenece a la familia *Cactaceae* también conocida como nopal o tuna, adaptándose con facilidad a la poca cantidad de agua. Estas se caracterizan por las pencas de color verdoso y por la poca cantidad de espinas siendo esta característica física una recolección fácil ya que además adquieren una altura de 5 metros, cuenta con una gruesa cutícula, en algunas ocasiones, está recubierta de cera o pelos. Estos elementos ayudan a reducir la pérdida de agua, ya que la planta contiene un abundante parénquima<sup>94</sup>. El fruto se presenta como una baya con ovario ínfero simple y pulpa carnosa, con tamaños y colores variables. La piel de los frutos es similar a la de los cladodios, incluyendo areolas y numerosos gloquidios. Tanto el grosor de la cáscara como la cantidad de pulpa exhiben variaciones.<sup>95</sup>

Las estructuras llamadas cladodios son láminas aplanadas y articuladas con tejidos carnosos. Tanto la forma como el grosor de estas láminas pueden variar, al igual que su color, que va desde tonos verdes claros hasta grises o cenizos, dependiendo de la edad de la planta.<sup>92</sup>

#### 3.5.4. Composición

Los estudios muestran la presencia de polisacáridos como L-arabinosa, ácido Dgalacturónico, D-galactosa, D-xilosa, L-ramnosa permitiendo aglutinar sustancias presentes en el agua<sup>96</sup>. Lo espectros IR revela la presencia de grupos tiol (SH), nitroso (NO<sub>2</sub>), hidroxilos (OH), enlaces carbono-carbono (CC), hidrocarburos insaturados (CH), y enlaces. (CO). Estos hallazgos podrían ser atribuibles a la presencia de alcoholes, ésteres o éteres en el polímero<sup>97</sup>.

En la penca se encuentra la presencia de calcio y hierro atribuyéndole propiedades de poder coagulante, aunque son poco significativas son aportantes que pueden ser consideradas. La mayor parte del cuerpo se encuentra compuesto de agua en un 90%. Se consideró que los carbohidratos son realmente los que le confieran la cualidad coagulante al biomaterial debido a que se encuentra en mayor proporción; reportándose dichos componentes en la Tabla 5 algunas proporciones orgánicas detectadas.<sup>98</sup>

**Tabla 1: Componentes de la *Opuntia Ficus-indica* (contenido en 100g)**

Parámetro	Contenido
Porción comestible	78 g
Energías	27 kcal
Proteínas	1.70 g
Grasas	0.30 g
Carbohidratos	5.60 g
Calcio	93 mg
Hierro	1.60 mg
Tiamina	0.03 mg
Rivoflavina	0.06 mg
Niacina	0.03 mg
Ácido ascórbico	8 mg

Nota: Tomado de<sup>98</sup>

### 3.5.5. Taxonomía

Según Silva<sup>99</sup> La taxonomía de los nopales es extremadamente compleja debido a una variedad de razones, incluida la gran variabilidad de sus fenotipos según las condiciones ambientales, la frecuencia de poliploidía, la reproducción sexual o asexual y la gran cantidad de híbridos interespecíficos. En la Tabla 6 se describe la clasificación científica del nopal.

**Tabla 2: Clasificación científica**

CLASIFICACIÓN CIENTÍFICA	
Reino	Plantae
Subreino	Embryophita
División	Angiospermae
Clase	Dicotyledonea
Subclase	Dialipetalas
Orden	Opuntiales
Familia	Cactaceae
Sub-familia	Opuntioideae
Tribu	Opuntiae
Género	Opuntia Nopalea
Subgénero	Platyopuntia
Especie	Ficus-indica

Nota: Tomado de<sup>100</sup>

### 3.5.6. Aplicaciones del mucílago

La penca de nopal es un recurso valioso con múltiples aplicaciones en la industria y la alimentación, el nopal es una alternativa de materia prima para los procesos de producción de alimentos, medicamentos, cosméticos y productos agropecuarios. Además, el mucílago del nopal se puede utilizar como aditivo natural en la industria de alimentos para obtener espesantes, reemplazantes de grasas, estabilizador de emulsiones, empaques para mejorar la calidad de los alimentos<sup>101,102</sup>.

El *Opuntia Ficus-indica* es un biopolímero muy complejo y viscoso que se almacena en las almohadillas internas y externas de las pencas, los polisacáridos que contienen son semejantes a las pectinas que permiten encapsular y separar la materia disuelta en el agua<sup>103,98</sup>.

Usarlo como un insumo coagulante alternativo y de fácil uso ofrece un nuevo enfoque para el tratamiento de los efluentes residuales en las etapas primarias a nivel doméstico rural; sin embargo, aún se encuentra en evaluaciones la rentabilidad de esta alternativa por un lado positivo ya que estos materiales son de la localidad sin ningún grado de industrialización y bajo costo, lo que podría contribuir a afianzar las tecnologías sustentables de tratamiento de aguas<sup>104</sup>.

### 3.6. Diseños experimentales

El diseño de experimentos (DOE) constituye las diferentes técnicas para determinar las ubicaciones de los puntos de muestra en un espacio de diseño. Las muestras elegidas a través del DOE deben dar una buena representación de todo el espacio de diseño para que el modelo sustituto que se construye a partir de estos puntos de muestra pueda proporcionar una buena predicción de las respuestas de la simulación compleja. Además de eso, el número de muestras elegidas a través del DOE debe ser relativamente pequeño en comparación con el espacio de diseño real. En general, un método DOE debe poder proporcionar la máxima información sobre el espacio de diseño con la mínima cantidad posible de muestras. El método DOE que se utilice depende de varios factores como la dimensionalidad del problema, la estructura del modelo sustituto que se utilizará, los criterios de tolerancia de error para la

construcción del modelo sustituto y la existencia de error aleatorio en el modelo complejo<sup>105</sup>

Adicionalmente, Los métodos DOE pueden clasificarse en dos categorías: clásicos y modernos. En el caso de experimentos de laboratorio donde existe un error aleatorio, es decir, cada nueva ejecución del experimento da como resultado un error diferente, se prefieren los métodos DOE clásicos. Los métodos clásicos tienden a generar puntos de muestra en los extremos del espacio de diseño para representar adecuadamente el espacio de diseño incluso en presencia de este error aleatorio. Ejemplos de los métodos DOE clásicos son el diseño Box-Behnken, el diseño Central Composite, etc. Por otro lado, en el caso de simulaciones por computadora deterministas, se utilizan los métodos DOE modernos. El supuesto subyacente en el caso de estas simulaciones por computadora es que cada ejecución de la simulación da como resultado exactamente las mismas respuestas. Ejemplos de los métodos DOE modernos incluyen el muestreo de Monte Carlo, el muestreo de hipercubo latino y el muestreo de matriz ortogonal<sup>105</sup>.

#### 3.6.4. Diseño experimental factorial completo (FFD)

En un diseño factorial, cada factor varía entre configuraciones fijas. Un diseño factorial completo se define entonces por todas las combinaciones posibles de los factores y sus configuraciones. En ese contexto, si “ $k$ ” factores para investigar y que cada factor puede establecerse en  $m$  niveles diferentes. El número de combinaciones posibles de los factores y sus configuraciones será entonces “ $m^k$ ”. De esta forma, se llega al número de combinaciones posibles que incrementa rápidamente cuando aumenta el número de niveles y el número de factores. Por esta razón, el estudio del factor experimental en sistemas químicos se lleva a cabo generalmente utilizando solo dos niveles de la configuración del factor, diseños de dos niveles. Dichos diseños permiten la determinación de todos los efectos principales y todos los efectos de interacción<sup>106-108</sup>.

Los diseños factoriales completos de dos niveles son convenientes cuando el número de factores, “ $k$ ”, a explorar es  $\leq 4$ . Con más de cuatro factores a explorar, los diseños factoriales fraccionarios de dos niveles u otros diseños de dos niveles son más

convenientes. Estos diseños se analizan después de que se han descrito los diseños factoriales completos.<sup>109</sup>

### 3.6.5. Diseño experimental de superficie de respuesta (MSR)

Esta clase de diseños fueron desarrollados en 1951 por Box y Wilson. Con el tiempo, han evolucionado dos grupos principales de diseños: los diseños compuestos centrales y los diseños Box-Behnken (CCD y BBD). Ofrecen una comprensión del comportamiento del sistema (revelan un tipo de conexión entre el factor y la respuesta) y su optimización al mismo tiempo. El CCD se aplica generalmente después de limitar los factores importantes mediante algunos métodos de selección. Consiste en puntos centrales y axiales junto a puntos cúbicos, lo que permite obtener información sobre la curvatura de la respuesta y la estimación de efectos de orden superior. BBD es similar a CCD, pero requiere menos ejecuciones experimentales y no contiene puntos en los vértices del cubo (puntos bajos/altos), lo que puede ser muy útil para la experimentación física ya que los puntos extremos a veces son costosos o difíciles de probar. Por este motivo, en comparación con el CCD estándar, el diseño BBD contiene regiones de menor calidad de predicción. Aunque los RSM están orientados principalmente a optimizar el sistema, decidimos incluirlos en el estudio ya que ofrecen una evaluación de términos de orden superior (cuadráticos o cúbicos), lo que no es posible con los otros métodos<sup>110,111</sup>.

### 3.6.6. Diseño experimental de Taguchi (TD)

A pesar de su recepción dividida en la comunidad científica. El diseño de Taguchi, debido a ser un diseño práctico se ha convertido en el diseño experimental comúnmente aplicado en el sector industrial y en ciencia. El comportamiento del diseño aplica en matrices ortogonales efectivas donde los niveles de los factores se distribuyen de manera equilibrada, reduciendo el número de arreglos experimentales. La mayoría de los arreglos ortogonales se centran únicamente en los efectos principales, pero algunos diseños permiten la estimación de interacciones específicas. Algunos de los diseños son adecuados para el cribado (TD de dos niveles), mientras que otros son más adecuados para una caracterización y optimización más profundas<sup>112</sup>.

### 3.7. Marco legal

El Ministerio del Ambiente (MINAM) estableció normativas de calidad de agua en el país, asegurándose de que los límites establecidos en cada caso sean viables de alcanzar.

- Según la Ley N° 28611 “Ley General del Ambiente” el numeral 32.1 del artículo 32, se define los LMP como los límites máximos permisibles, para plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, los cuales deben tener una concentración final de sólidos totales en suspensión de 150 mg/L posterior al tratamiento.
- Según la Ley N° 29338 “Ley de Recursos Hídricos” en su artículo 79, queda prohibido el vertimiento directo o indirecto de agua residual sin autorización de las autoridades ambientales y de la fiscalización ambiental, y en caso de que el vertimiento del agua residual tratada pueda afectar al receptor la vida asociada. Por estos requerimientos se debe implementar un correcto tratamiento del agua residual con los permisos necesarios.
- Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, que aprueba los estándares Nacionales de Calidad de Agua.

Se han promulgado los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua con el propósito de determinar el nivel de concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua. Estos estándares se aplican a su condición como cuerpo receptor y componente esencial de los ecosistemas acuáticos, garantizando que no representan un riesgo significativo para la salud humana ni para el medio ambiente.

Según las disposiciones de ECA-Agua, la clasificación de los cuerpos de agua se organiza de la siguiente manera:

- ✓ Categoría número 1: Uso poblacional y recreacional.
- ✓ Categoría número 2: Actividades marinas-costeras.
- ✓ Categoría número 3: Riego de vegetales y bebidas de animales.
- ✓ Categoría número 4: Conservación del ambiente acuático.

#### 4. HIPÓTESIS

Dado que el lactosuero tiene una alta cantidad de contaminantes, es posible implementar un sistema combinado de electrocoagulación y biocoagulante compuesto por quitosano y mucílago a partir de *Opuntia ficus-indica* en medio líquido para el tratamiento de efluente lácteo (lactosuero), evaluando parámetros operativos como la fuerza electromotriz, tiempo de tratamiento en la electrocoagulación y pH óptimo del proceso.



## CAPITULO II.

### 1. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 1.1.Lugar de ejecución de la investigación

La siguiente investigación se llevó a cabo en la ciudad de Arequipa, la toma de muestra efluente lácteo fue realizado en el distrito de Majes, Arequipa. Se utilizaron los laboratorios de la Universidad Católica de Santa María:

- Laboratorio de investigación F-408
- Laboratorio de Físico-Química E-404

#### 1.2.Materiales

##### 1.2.1. Material biológico

- Pencas de Nopal (*Opuntia Fícus-indica*)
- Efluente lácteo

##### 1.2.2. Insumos y reactivos

- Etanol al 96%
- Ácido acético glacial (99.8%)
- Agua destilada
- Ácido Sulfúrico  $H_2SO_4$  (0.1 mol/L)
- Hidróxido de sodio NaOH (0.1 mol/L)
- Lauril éter sulfato sódico
- Quitosano comercial
- Viales de DQO de bajo rango

##### 1.2.3. Materiales

- Beaker de 100, 250 mL y 2 L.
- Fiolas 50, 100, 250 y 1000 mL.
- Matraz 100 y 250 ml
- Embudos
- Tubos fálcon de 15 mL
- Viales de vidrio de 10 mL
- Jeringas de 2.5, 5 y 10 mL.
- Bureta

- Papel aluminio
- Parafilm
- Cintas de pH
- Pipetas Pasteur
- Propipeta
- Soporte Universal
- Electrodo de aluminio
- Pastilla magnética
- Botellas de vidrio
- Espátula
- Puntas azules y amarillas para micropipeta
- Celda de acrílico
- Cables con pinzas alligator

#### **1.2.4. Aparatos y equipos**

- Balanza analítica (SARTORIUS PRACTUM 124-1S)
- Fuente de alimentación digital DC 0-30V 30A (MESTEK DP3030)
- Hot plate & Stirrer magnetic (Four E's Scientific K-MI0102005)
- Bomba peristáltica (MASTERFLEX® L/S® EW-77924)
- Turbidímetro (HANNA HI93703-11)
- Colorímetro (HACH DR900)
- Medidor multiparámetro de mesa (pH, conductividad, TDS, salinidad, etc)  
HANNA HI5522-02
- Multitester (AGILENT U1272A)
- Digestor (HACH DRB 200-1)
- Baño Ultrasonido Digital Pro 20A
- Estufa
- Desecador

### **1.3. METODOLOGÍA**

#### **1.3.1. Diseño experimental**

El DOE ortogonal de Taguchi L9 que utiliza las relaciones de señal/ruido (S/N) el cual se puede determinar mediante la ecuación 1:

$$S/N = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- $n$  = número de repeticiones para cada arreglo experimental
- $y_i$  = Valor de rendimiento de  $i$ -ésimo experimento.

Los factores y los niveles de evaluación para que el coagulante natural funcione eficientemente y aporte mayor rendimiento al tratamiento de un efluente residual lácteo en un proceso de electrocoagulación fueron seleccionados de acuerdo a los criterios sugeridos por las investigaciones reportadas en revistas indizadas donde los autores aplican potenciales desde 5 a 29 V, en medios desde ácidos a extremadamente alcalinos y en tiempos de residencia no mayores a 90 minutos (1.5 horas)<sup>113-115</sup> y en base a ensayos preliminares se establecieron los valores límites de evaluación en el presente estudio resultando que los factores como potencial aplicado, pH y tiempo de residencia en la celda electroquímica debería ubicarse en los niveles mostrados en la tabla 7. Adicionalmente, de acuerdo a las tendencias en investigaciones de ciencias básicas actuales en optimización de variables electroquímicas operativas en el tratamiento de efluentes se usa el método de Taguchi de acuerdo a los estudios realizados en los últimos 5 años<sup>115-118</sup>, debido a que contribuye a la interpretación estadística puntual ofrecido por los arreglos ortogonales para reducir significativamente la cantidad de experimentos lo que permite minimizar los recursos como el tiempo, costos y materiales, además, permite una distribución balanceada de los factores garantizando una evaluación de las interacciones más significativas en el proceso de evaluación que en comparación de las metodologías más complejas como el de superficie de respuesta (RSM), Taguchi en su enfoque práctico y eficiente no requiere conocimientos matemáticos y estadísticos avanzados y complejos debido a que su aplicabilidad también es útil en investigaciones exploratorias que se encuentran en fases iniciales<sup>116,119-122</sup>; por otro lado el análisis de ANOVA se realizó usando el MINITAB 17. En ese contexto, el diseño experimental aplicado brinda una matriz de 9 experimentos individuales como se detalla en la Tabla 8, generando un triplicado de estos con un total de 27 experimentos.

**Tabla 7: Factores de diseño con los 3 niveles de estudio**

Factores	Niveles		
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
Voltaje, V	4	8	12
pH	3.5	7.5	10.5
Tiempo, Hr.	0.5	1	1.5

Nota: Elaboración propia

**Tabla 8: Matriz ortogonal de experimentos aplicando el diseño Taguchi**

N° Experimentos	Factores		
	Voltaje (V)	pH	Tiempo (h)
1	4	3.5	0.5
2	4	7.5	1
3	4	10.5	1.5
4	8	3.5	1
5	8	7.5	1.5
6	8	10.5	0.5
7	12	3.5	1.5
8	12	7.5	0.5
9	12	10.5	1

Nota: Elaboración propia.

### 1.3.2. Recolección del efluente y el material

Las muestras de agua residuales de lactosuero fueron recolectadas del centro de acopio de leche “CAL ASPAM” ubicada en el distrito de Majes, Arequipa-Perú (-16.347502687219585, -72.2828639873833), las cuales se conservaron a 4 °C. Así mismo; fueron recolectadas las pencas de nopal (*Opuntia Ficus-indica*) de la misma zona y se transportaron a las instalaciones del Instituto INNOVERGY Laboratorio F-408 de la Universidad Católica de Santa María para su almacenamiento y conservación.

### 1.3.3. Obtención de Quitosano

A partir de quitina comercial se realizó la obtención del quitosano aplicando una desacetilación que se llevó a cabo mediante la reacción de la quitina seca con NaOH (45-50%) en una proporción de 1:10 (sólido/líquido, g/mL). La mezcla de reacción fue calentada a 115°C y agitada a 200 rpm utilizando un soporte magnético durante 24 horas, todo ello bajo un condensador de reflujo para mantener constante el volumen de la mezcla. El producto insoluble resultante, conocido como quitosano, fue filtrado y luego lavado con

agua destilada hasta alcanzar un pH neutro de 7. El producto lavado se secó en una estufa a 70°C hasta que su peso se mantuvo constante<sup>123</sup>.

Se procedió con la purificación del quitosano mediante el proceso de re-precipitación, que implica su disolución en ácido acético seguido de su precipitación con NaOH. Se disolvió el quitosano en ácido acético acuoso al 3 % (v/v) durante toda la noche, y el gel resultante se filtró utilizando un embudo de vidrio fritado para eliminar las partículas gelatinosas y no disueltas después de la completa disolución. La precipitación del quitosano se llevó a cabo agregando gradualmente una solución acuosa de NaOH 1 M mientras se agitaba. Para finalizar, el quitosano regenerado se lavó con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro, se secó al vacío y se trituro hasta obtener un polvo fino utilizando un mortero de laboratorio. El producto final (Anexo 1, Figura 8) fue diluido en agua destilada y se sometió a un proceso de diálisis frente a agua destilada durante dos días a 5 °C.<sup>123</sup>

#### **1.3.4. Obtención de Mucílago de *Opuntia Ficus indica***

Se inició con el pesado de 9.129 Kg de las pencas o cladodio del nopal, fueron lavadas con agua potable; para retirar las espinas se utilizó un cuchillo y se procedió a raspar la piel del nopal, seguidamente estas fueron peladas intentando conservar la mayor parte de pulpa. A continuación, el nopal fue cortado en cubos de aproximadamente 2 cm (Figura 9) y reservados en un beacker de 2 L con agua destilada en una proporción de 1:4 (v/v) para su maceración (Anexo 1, Figura 10), siguiendo las recomendaciones de Otarola<sup>124-126</sup>. El proceso de maceración se llevó a cabo durante un periodo de 24 horas, transcurrido este tiempo se procedió al licuado del nopal, se obtuvo 6100 ml de extracto, finalmente se filtró este utilizando gasas.

Se añadió etanol al 95% (v/v) en una proporción de 1:3 (v/v) al extracto filtrado obtenido, esto permitió que el mucílago precipitara en un lapso de 12 horas, según se indica en las referencias<sup>124,125</sup>. Transcurrido el tiempo especificado, se extrajo la fracción de mucílago presente en el sedimento (disuelto) y se dispuso en placas de Petri para facilitar su secado (Anexo 1, Figura 11). Posteriormente, se procedió a secar la muestra mediante evaporación del solvente en una estufa, con un tiempo aproximado de 24 horas a una temperatura de 50 °C (Anexo 1, Figura 13).

#### **1.3.5. Purificación del mucílago extraído**

Se llevó a cabo la purificación del mucílago extraído mediante un proceso en el cual se sumergió en etanol al 95% (v/v) a una temperatura de 4 °C durante 24 horas, repitiendo este procedimiento dos veces consecutivas. Una vez completado el tiempo establecido, se descartó el etanol y se realizaron cinco lavados adicionales con agua destilada utilizando un matraz Kitasato.

Se disolvió el mucílago obtenido tras el lavado en 2 litros de agua, permitiendo que las partículas vegetales sedimentaran a 4 °C durante 24 horas. Posteriormente, se transfirió el mucílago a placas de Petri mediante una pipeta, evitando aspirar cualquier sedimento. Las placas de Petri se colocaron en la estufa a 50 °C para su secado (Anexo 1, Figura 13). Finalmente se procedió a raspar de las placas Petri todo el mucílago obtenido y molerlo empleando un mortero antes de almacenar el polvo de mucílago en el desecador.

#### **1.3.6. Caracterización del efluente lácteo**

Para las pruebas experimentales de electrocoagulación siguiendo la metodología de Pacheco et al. 2023<sup>127</sup>; el lactosuero se preservó a 4 °C después del muestreo, la mayor parte de las grasas sólidas se encontraban en flotación, con una bomba peristáltica se procedió al desengrasado del efluente, logrando separar las grasas en suspensión del suero líquido; obteniendo así una muestra más limpia y libre de grasas sólidas. Las muestras fueron diluidas en proporción de 1:10 para la caracterización de DQO y turbidez ello debido a que, de acuerdo la información validada científicamente<sup>128,129</sup> los valores promedios de lactosuero oscilan entre 15 000 - 90 000 mg/L y de 500 – 1 500 en DQO y turbidez respectivamente<sup>130</sup> por ello que para estandarizar el procedimiento de cuantificación de DQO fueron usados viales de bajo rango en el ingreso y salida del tratamiento, para el caso de la turbidez un factor de dilución (1:10) fue empleado a razón que el equipo en laboratorio presenta un límite de detección máxima de 1000 NTU, mientras que los análisis de pH, sólidos totales disueltos, conductividad y porcentaje de salinidad fueron caracterizados en un HANNA HI 5522.

#### **1.3.7. Preparación de Coagulantes y efluente lácteo**

Ambas soluciones coagulantes se prepararon en una matriz de 5.0 g/L en referencia a los reportes publicados<sup>127</sup>. En una fiola de 250 ml de agua destilada se disolvió en agitación constante 1.25 g de mucílago de *Opuntia ficus-indica* pulverizado (Anexo 1, Figura 14).

Para la solución de quitosano se disolvió 1.25 g de este en una fiola de 250 mL de solución de ácido acético al 1% a partir de ácido acético glacial

Para las pruebas experimentales de electrocoagulación. El efluente lácteo fue acondicionado previamente a la dosificación mixta de coagulantes naturales en medio líquido en un reactor electroquímico, la dilución del lactosuero fue de 1:10 antes del proceso de electrocoagulación **para obtener soluciones sintéticas cercanas a un efluente real** obteniéndose turbiedades medias en el intervalo de 300 a 400 NTU.

### 1.3.8. Tratamiento de electrodos de aluminio

Se hizo un tratamiento inicial para quitar el revestimiento del electrodo de aluminio primero se empleó lauril éter sulfato sódico como agente surfactante por un periodo de 24 horas, pasado este tiempo se realizó un ligero frotado de los electrodos para eliminar impurezas, posteriormente se sumergieron los electrodos en una solución de hidróxido de sodio (3 Molar) durante 1 hora, inmediatamente después se utilizó una solución de ácido sulfúrico 3 M para sumergir los electrodos nuevamente durante 1 hora y finalmente se utilizó alcohol etílico para eliminar la grasa o impurezas por 24 horas (Anexo 1, Figura 16).

Entre cada experimento los electrodos se rectificaron y pulieron con lijas húmedas y se limpiaron con ultrasonido en etanol al 70% y agua destilada por un tiempo de 1 hora a temperatura ambiente<sup>119</sup>.

### 1.3.9. Proceso electrocoagulación

El tratamiento de lactosuero por electrocoagulación se llevó a cabo en un reactor discontinuo monopolar de vidrio de 100 ml; al cual se le acondicionó electrodos de aluminio como cátodo y ánodo, las dimensiones de los electrodos fueron de 5 x 2.5 cm (Figura 18). Los electrodos fueron pesados previo a su uso y posterior a este para evaluar el desgaste que se estaba produciendo del metal. La distancia entre electrodos fue de 2 cm, se preparó un soporte donde se introdujeron los electrodos para mantenerlos inmóviles, evitando así variación de la distancia entre estos (Anexo 1, Figura 18). Los electrodos se conectaron al modo de conexión en paralelo monopolar.

Cada experimento se realizó con 100 ml de la muestra del efluente lácteo preparado, a esta muestra se le ajustó el pH a 3.5, 7.5 y 10.5, añadiendo gotas de NaOH o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (con agitación vigorosa) según lo indique el diseño. **El biocoagulante utilizado consiste en una mezcla de quitosano y mucílago de nopal en una proporción 0.25 Quitosano-Mucílago (0.5 mL de**

Quitosano y 1.5 mL de Mucílago de *Opuntia Ficus-indica*), esta proporción fue determinada previamente en la primera etapa del proyecto como la dosis óptima para la remoción de turbidez; una vez ajustado el pH se añadió a todos los arreglos experimentales la misma dosis combinada de coagulantes en el reactor de electrocoagulación para evaluar a qué condiciones fisicoquímicas la dosis constante de los coagulantes naturales actúa eficientemente en los ensayos de tratamiento en un proceso combinado de coagulación electrocoagulación. El sistema electroquímico se mantuvo en agitación constante de 70 RPM y a temperatura ambiente (23-24°C). La FEM de alimentación en la fuente se ajustó de acuerdo con el diseño experimental 4, 8 y 12 V, el tiempo de electrocoagulación de 30 minutos, 60 minutos y 90 minutos (Anexo 1, Figura 19).

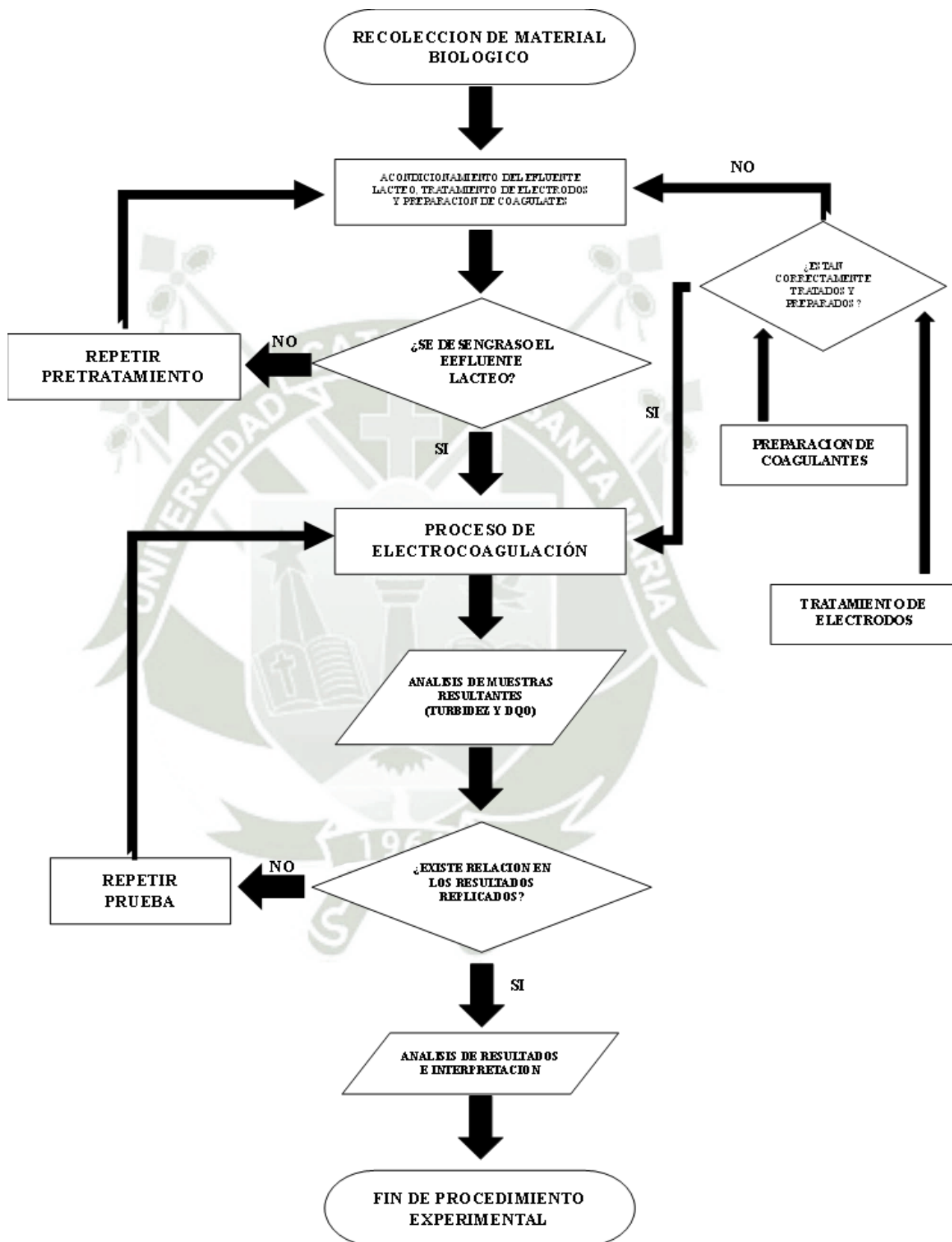
Concluido el tiempo de electrocoagulación se dejó en reposo cada experimento por 1 hora para conseguir la decantación de los flóculos formados (Anexo 1, Figura 20).

#### 1.3.10. Toma de muestra

Pasado el tiempo de decantación se procedió a la toma de muestra del sobrenadante con ayuda de una jeringa de 10 ml, se tuvo especial cuidado al momento de la succión del agua tratada para evitar el movimiento o desestabilización de los flóculos (Anexo 1, Figura 21). La muestra retirada se depositó en la celda del turbidímetro para ser leída y obtener el resultado de la turbidez después del tratamiento. Para la prueba con resultado óptimo se extrajo 1 ml del agua tratada que se enrasó en una fiola de 100 mL para posteriormente tomar una alícuota de 2.5 mL de esta dilución e introducirla en un vial de DQO y para proceder a digerir la muestra un periodo de 2 horas, finalizada la digestión por reflujo cerrado el vial fue leído en un colorímetro portátil HACH DR900 usado ampliamente en estudios ambientales, procesos de purificación en plantas de tratamiento de agua, calidad e incluso usados en metodologías de investigaciones científicas actuales<sup>131,132</sup>; hasta análisis específicos de Nitritos ( $\text{NO}_3^-$ ) y fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) expresados en mg/L. Para mayor información en el Anexo 1, Figura 22 se detalla lo empleado en la metodología de cuantificación.

1.4. Flujograma de actividades

Figura 5: Diagrama de flujo de actividades



Nota: Elaboración propia.

### CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 1. Caracterización de lactosuero

En la Tabla 9 se muestra detalladamente las características iniciales del efluente lácteo sintético cercano a las condiciones de un efluente real el cual la dilución de 1:10 ha permitido obtener un mejor resultado en la caracterización de la turbidez y que debido a la limitante del instrumento de medición solamente este permitía lecturas de turbidez no mayores a 1000 NTU, en base a ello los resultados de pH, conductividad, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto y DQO también son reportados y comparando el nivel de similitud de aquellos parámetros en estudio publicados en las investigaciones científicas. La caracterización de las aguas residuales lácteas presenta variaciones no muy significativas, ello en función del residuo generado a partir de un determinado derivado lácteo<sup>133,134</sup>. Algunas fuentes residuales lácteas reportan valores de 60 000 mg/L y 68 000 mg/L de DQO, pH comprendido entre 4 y 5<sup>135</sup> obteniendo relaciones cercanas a los resultados de la muestra problema en el presente estudio, valores de 61 240 mg/L que son elevados por la presencia de elevado contenido orgánico e inorgánico<sup>136</sup> y 3.67 para DQO y pH respectivamente se detallan en la muestra de lactosuero a tratar.

**Tabla 9: Características fisicoquímicas del lactosuero sintético (dilución 1:10) y sin diluir**

Parámetro	Unidad de medida	Muestra diluida	Muestra sin diluir
Temperatura inicial	°C	24.9	25.1
pH	Adimensional	3.67	4.55
Conductividad	uS/cm	881.2	5,038
SST	mg/L	392.6	2 526
Oxígeno Disuelto	mg/L	3.99	2.10
Turbidez	NTU	89	>1000
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	6 124	61 240

Nota: Elaboración propia.

## 2. Análisis estadístico de los parámetros de proceso en el proceso coagulación-electrocoagulación

Los análisis estadísticos resultantes de la matriz de Taguchi L9 clasifican a los factores de acuerdo a lo identificado por el valor de delta a partir de las respuestas para las relaciones de señal ruido tomando el criterio nominal<sup>120</sup> cuanto más grande mejor<sup>121,122</sup>, y la gráfica de efectos principales para las medias y desviaciones estándar, de esta forma fue determinada el orden del efecto de cada factor resaltando que el valor delta más grande representa el factor más significativo en el proceso clasificándolos de la siguiente manera: pH>tiempo>voltaje, los detalles fueron hallados en el software estadístico Minitab 17 demostrados en la Tabla 10

**Tabla 10: Análisis de Varianza de Relaciones SN**

Nivel	Voltaje	pH	Tiempo
1	-20.4536	-56.2161	-20.8002
2	-20.5839	-0.9571	-20.4691
3	-18.2790	-2.1432	-18.0472
Delta	2.3049	55.2590	2.7530
Clasificar	3	1	2

Nota: Elaboración propia.

Mostrado en la Tabla 11, se observa el análisis de varianza (ANOVA) revela que el pH es el factor más influyente y significativo en el tratamiento del lactosuero mediante el proceso combinado de electrocoagulación y biocoagulante compuesto por quitosano y mucílago nopal resultando los F-valor de 1842.29 y un P-valor de 0.001 a un nivel de confianza del 95% y nivel de significancia de 0.05, indicando que la influencia química del pH presenta significancia en el proceso combinado coagulación-electrocoagulación para la remoción de turbidez de esta investigación al usar un coagulante natural puede aportar información a la existente donde el efecto de los coagulantes en el tratamiento de aguas residuales a  $pH < 5$  indica que las especies contaminantes pueden encontrarse disueltas y no formar coágulos como es el caso de algunos hidratos de carbono (lactosa) presentes en el efluente lácteo siendo variables del tipo del efluente residual<sup>137</sup>, las condiciones iniciales del lactosuero en la investigación se encontraban por debajo del pH 5 observándose estabilidad química que a pesar de la electrocoagulación no se evidencio remoción de turbidez en los ensayos realizados, por otro lado, en el rango de 6-8 de pH la presencia de las especies hidroxiladas

de aluminio facilitan la formación de flóculos por las cargas positivas presentes y en presencia de los coagulantes naturales la formación de flóculos de gran tamaño son evidenciados debido a la presencia de cargas negativas influenciados por el pH ligeramente alcalino sobre el contenido proteico e hidrocarbonado presente en el efluente lácteo, ocurriendo lo opuesto a pH relativamente alcalinos ( $\text{pH} > 8$ ) aportándole mayor carga negativa al medio permitiendo la repulsión de cargas entre los coloides formados no permitiendo precipitar con facilidad<sup>138-141</sup>. En contraste, el voltaje y el tiempo no demostraron ser factores significativos, con valores P de 0.244 y 0.193 respectivamente.

**Tabla 11: Análisis de Varianza de Relaciones SN**

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Voltaje	2	10.06	10.06	5.03	3.10	0.244
pH	2	5978.84	5978.84	2989.42	1842.29	0.001
Tiempo	2	13.55	13.55	6.78	4.18	0.193
Error residual	2	3.25	3.25	1.62		
Total	8	6005.70				

Nota: Elaboración propia.

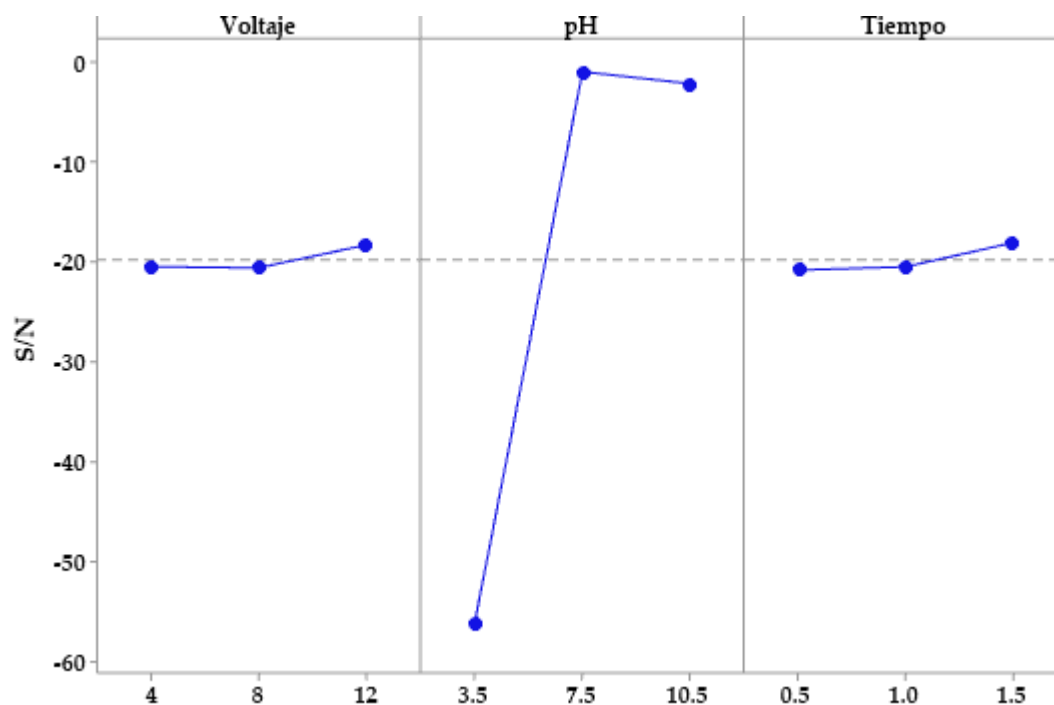
La Tabla 12, muestra el resumen del modelo estimado para las relaciones S/N destaca la robustez y precisión del modelo utilizado en el estudio. Con un error estándar de 1.2738, un R-cuadrado de 99.95% y un R-cuadrado ajustado de 99.78%, indicando que el modelo explica bien la variabilidad de los datos procesados.

**Tabla 12: Resumen del modelo para estimado para Relaciones SN**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)
1.2738	99.95%	99.78%

Nota: Elaboración propia.

**Figura 6: Gráfico de efectos principales para S/N**



El método ortogonal de Taguchi y de superficie de respuesta Box Behnken, ambos utilizados en la optimización en investigaciones científicas actuales para el tratamiento electroquímico de aguas residuales de la industria láctea, centrándose ambos en eliminar la máxima eliminación de turbidez y DQO. Sin embargo, la metodología de Taguchi es ampliamente reconocido con un enfoque sólido y eficaz para diseñar sistemas que den como respuesta niveles de calidad<sup>116,142</sup>. Además, la aplicación de este método en el presente estudio fue ventajoso al examinar de forma puntual y ventajosa para la elección de las variables operativas, que, a diferencia de las demás pruebas experimentales, esta reduce significativamente la cantidad de ensayos experimentales a comparación de aquellos de superficie de respuesta que en total brindaba 45 experimentos totales siendo el doble de los que Taguchi ofrecía. Es por ello, que los hallazgos sugieren que el pH inicial es la variable optima donde actúa sinérgicamente con los biocoagulantes de quitosano y mucilago **en medio líquido** para controlar y minimizar la turbidez del agua residual de industria láctea, que en la bibliografía científica muestran la influencia del mismo e incluso aplicando sales de iones férrico en presencia de medios oxidantes fuertes como el peróxido de hidrogeno<sup>114,127</sup>, mientras que por otro lado el voltaje aplicado y el tiempo mostraron efectos antagónicos en la eficiencia de remoción de turbidez.

### 3. Influencia del pH y tiempo de tratamiento

La Tabla 13 muestra que las condiciones más efectivas para la remoción de turbidez en el lactosuero diluido se encuentran con un pH de 7.5 y tiempos de tratamiento más largos, particularmente a voltajes de 8V y 12V. Las pruebas 5 y 8 destacan por alcanzar remociones de turbidez del 94.98% y 89.77% respectivamente, con bajas desviaciones estándar ( $\pm 0.03$  y  $\pm 0.16$ ), indicando alta efectividad y consistencia en estos parámetros. En contraste, los valores de pH bajos (3.5) resultaron en una remoción mínima de turbidez, como se observa en las pruebas 1, 4 y 7, con porcentajes de remoción inferiores al 1%, lo que sugiere que estas condiciones no son adecuadas para el tratamiento.

La celda de electrocoagulación se vio afectada en función al tiempo transcurrido, ello debido a la descomposición del agua y la acumulación de los iones OH, los resultados indican que un pH de 7.5 es óptimo para la remoción de turbidez variando hasta 8.85 en 1.5 horas obteniendo comportamientos similares reportados en la bibliografía<sup>143</sup>, el aporte de carga de hidroxilos en el medio de tratamiento es debido también a la protonación del grupo amino (R-NH<sub>2</sub>) de la molécula de quitosano<sup>144,145</sup>, que al liberar hidroxilos en el mecanismo de reacciones intermedias induce a formarse especies aniónicas como el Al(OH)<sub>x</sub><sup>-</sup> aportando a la degradación de materia orgánica e inorgánica presentes en el efluente lácteo, confiriéndole la denominación de coagulante a la solución de quitosano, ello debido a la interacción química que existe entre los iones de aluminio y iones hidroxilos liberados del quitosano, además de tener una cadena polimérica que también actúa como floculante catiónico desestabilizando las partículas coloidales del lactosuero y en conjunto con el mucilago este último no viéndose afectado por la electrocoagulación o por alguna reacción química externa en el intermedio del tratamiento adquiriendo la propiedad de floculante natural para el proceso electroquímico. El aspecto positivo de los coadyuvantes naturales fue la visualización de flóculos más grandes y densos que fueron separados en menos de 1 hora de decantación, y aplicaciones convencionales mostraron formas de flóculos similares para tratamiento de aguas residuales oleosas, textiles, entre otros<sup>146,147</sup>.

Por otro lado, el aumento del voltaje a 8V y 12V mejoro significativamente la efectividad del tratamiento. Las condiciones con un pH de 10.5 y tiempos más cortos también mostraron resultados prometedores, aunque con mayor variabilidad, como se ve en la prueba 6 con un 69.71% de remoción y una desviación estándar de  $\pm 0.38$  Tabla 13.

Estas observaciones subrayan la importancia de ajustar cuidadosamente el pH y el voltaje para maximizar la eficiencia en la remoción de turbidez y sobre todo energética.

**Tabla 13: Cuadro de resultados del proceso de electrocoagulación.**

N°	Factores			Respuesta							
	Voltaje (V)	pH	Tiempo (H)	Tb <sub>1</sub>	Tb <sub>2</sub>	Tb <sub>3</sub>	Turbidez final	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	% Remoción de Turbidez
1	4	3.5	0.5	88.90	89.00	87.80	88.57 ± 0.67	0.11%	0.00%	1.35%	0.49 ± 0.75
2	4	7.5	1	14.00	13.90	14.10	14.00 ± 0.10	84.27%	84.38%	84.16%	84.27 ± 0.11
3	4	10.5	1.5	14.40	14.60	14.50	14.50 ± 0.10	83.82%	83.60%	83.71%	83.71 ± 0.11
4	8	3.5	1	88.89	88.89	88.89	88.89 ± 0.00	0.12%	0.12%	0.12%	0.12 ± 0.00
5	8	7.5	1.5	4.50	4.46	4.45	4.47 ± 0.03	94.94%	94.99%	95.00%	94.98 ± 0.03
6	8	10.5	0.5	26.59	27.03	27.25	26.96 ± 0.34	70.12%	69.63%	69.38%	69.71 ± 0.38
7	12	3.5	1.5	88.78	88.78	88.78	88.78 ± 0.00	0.25%	0.25%	0.25%	0.25 ± 0.00
8	12	7.5	0.5	9.26	8.96	9.09	9.10 ± 0.15	89.60%	89.93%	89.79%	89.77 ± 0.16
9	12	10.5	1	16.00	16.40	16.34	16.25 ± 0.22	82.02%	81.57%	81.64%	81.74 ± 0.25

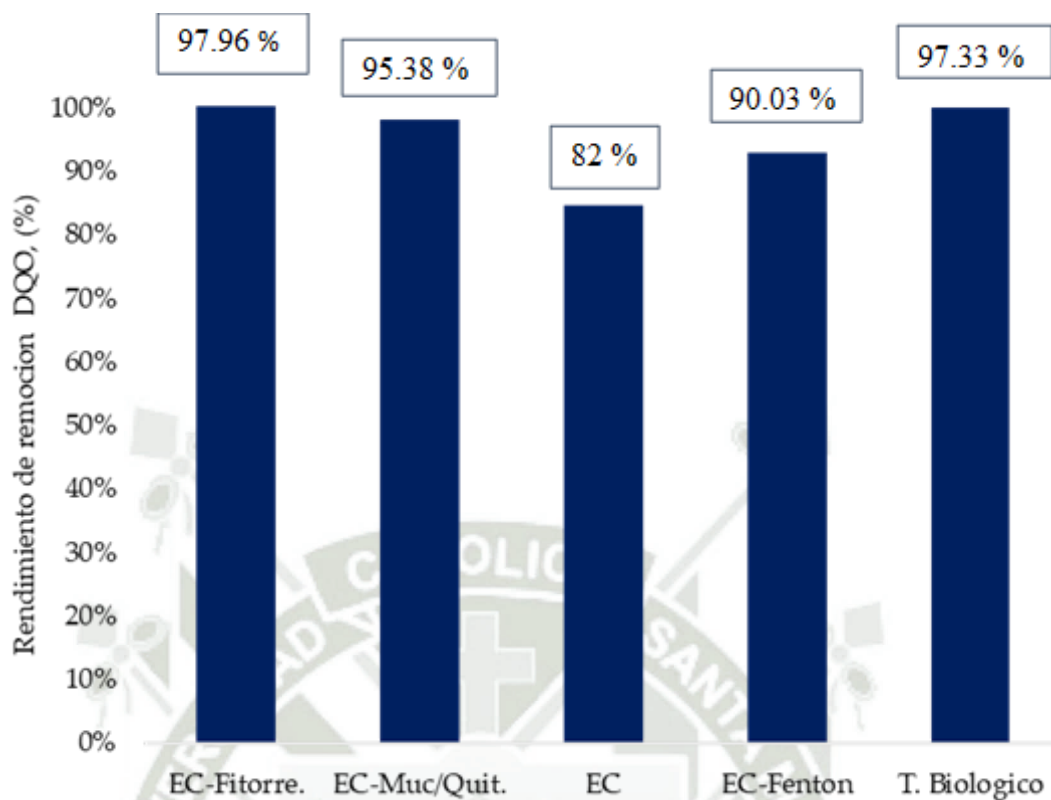
Nota: Elaboración propia. (Tb: turbidez en NTU, R: porcentaje de remoción)

#### 4. Evaluación comparativa de remoción de Turbidez y DQO

La remoción de la turbidez fue representada en porcentaje de remoción, resultando el 94.98%, para hallar el valor de la DQO se tomó en cuenta el criterio reportado en la bibliografía<sup>148</sup> donde se indica la correlación lineal que existe entre la turbidez y la DQO sugiriendo que a medida que aumenta la turbidez incrementa la DQO, ya que ello es debido a la presencia de contenido celular, sólidos volátiles, sólidos totales, sólidos suspendidos y que la luz se absorbe o se dispersa y da como resultado un valor de turbidez más alto y que el caso de la DQO se halló los valores remoción para aquel valor óptimo de turbidez, resultando con un 95.38% de remoción en la demanda química de oxígeno al usar coagulantes naturales mixtos de quitosano – mucilago liquido en combinación con electrocoagulación, porcentajes similares al usar diseños de RSM de 80% DQO y 96% turbidez al aplicar solamente películas solidas compuestas de quitosano mucilago en relación 1:1<sup>84,85</sup>. Por otro lado, los resultados hallados en la investigación permite aportar que el voltaje, el pH y tiempo de 5 V, pH inicial de 7 (neutro) y 120 minutos respectivamente son valores aproximados a los resultados obtenidos en la presente investigación y que son variables que influyen en los procesos combinados para el tratamiento de efluentes lácteos como los reportados en el tratamiento combinado de electrocoagulación aireada con

fitorremediación donde la remoción de la DQO fue del 97.96% con electrodos de aluminio y hierro<sup>149</sup>, para el tratamiento de efluentes residuales lácteos con niveles bajo de contaminantes. Por otro lado, de acuerdo al reporte generado en las investigaciones<sup>54</sup> un proceso de electrocoagulación convencional sin la carga de coadyuvantes puede reducir la turbidez y la DQO solamente entre un 51 a 82% y 39% respectivamente empleando electrodos de aluminio por el tiempo de 1 hora<sup>150</sup>, estos bajos rendimientos generaron mayor énfasis e interés por optimizar los tratamientos, generando propuestas de tratamientos químicos de coagulación química – electro fenton como proceso combinado superior para el tratamiento de aguas residuales lácteas, obtenido resultados de remoción de DQO del 90.3%<sup>151</sup>. Estos estudios discutidos en comparación a los rendimientos obtenidos al aplicar el quitosano-mucilago como coadyuvantes naturales en la electrocoagulación también son similares a los resultados por tratamiento convencionales por reactores biológicos con tecnología microbiana con reducciones de DQO del 97.33%, sin embargo, los tiempos de retención hidráulica son mayores alcanzando las reacciones de degradación hasta el promedio de 24 horas<sup>152</sup>. La Figura 7 explica el comportamiento comparativo de los métodos de electrocoagulación con coadyuvantes químicos, orgánicos y tratamientos biológicos convencionales.

***Figura 7: Gráfico comparativo entre métodos de electrocoagulación con coadyuvantes químicos, orgánicos y tratamientos biológicos convencionales***



Fuente: Elaboración propia.

Donde: EC-Fitorre. (Electrocoagulación combinada con fitorremediación)<sup>149</sup>; EC-Muc/Qui. (Electrocoagulación combinada con coagulantes de quitosano y mucilago); EC. (Electrocoagulación convencional)<sup>150</sup>; EC-Fenton. (Electrocoagulación por oxidación química Fenton)<sup>151</sup> y T. Biológico. (Tratamiento biológico y microbiano)<sup>152</sup>.

## CONCLUSIONES

### PRIMERA:

La investigación realizada reporta que el proceso combinado de electrocoagulación y el biocoagulante elaborado a partir de quitosano y mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) demostró ser altamente efectivo en la eliminación de contaminantes del agua residual láctea. Este enfoque alcanzó remociones de turbidez de hasta 94.98% y de DQO de 95.38%, validando su eficacia y sostenibilidad como alternativa biotecnológica para el tratamiento de efluentes lácteos. La utilización de materiales biodegradables refuerza su viabilidad ambiental y económica, posicionándolo como una solución sostenible, efectiva y prometedora para la gestión de aguas residuales en la industria láctea de la localidad de Majes, Arequipa.

### SEGUNDA:

Los resultados experimentales y el análisis estadístico basado en la matriz de Taguchi L9 permitieron identificar que las condiciones óptimas para el proceso son un pH de 7.5, un voltaje de 8V y un tiempo de tratamiento de 90 minutos. Estas condiciones mostraron una alta precisión predictiva ( $R^2 = 99.95\%$ ) y destacaron al pH como el factor más influyente en la eficiencia del tratamiento, seguido por el tiempo y el voltaje. La metodología de Taguchi fue eficaz al minimizar la cantidad de experimentos necesarios y simplificar la selección de variables operativas críticas.

### TERCERA:

Se concluyó que el pH juega un papel determinante en el proceso de formación de flóculos densos y efectivos. Estas variables permitieron maximizar la eficiencia del proceso, favoreciendo la formación de flóculos grandes, densos y estables gracias a la interacción entre los hidróxidos generados en el electrodo de aluminio y los hidroxilos liberados por la protonación del quitosano. En contraste, valores de pH bajos (3.5) mostraron remociones mínimas de turbidez, demostrando que estas condiciones no son adecuadas para el tratamiento, lo que refuerza el pH como variable significativa en el proceso y la importancia de ajustar cuidadosamente esta variable.

### CUARTA:

El tratamiento propuesto muestra que la remoción de turbidez en el lactosuero alcanzó un 94.98%, correlacionándose directamente con la remoción de la DQO, que fue de 95.38% al usar coagulantes naturales líquidos (quitosano y mucílago de nopal) en conjunto con la electrocoagulación; remociones comparables e incluso superiores a otros métodos tradicionales, como los tratamientos biológicos convencionales y avanzados, así como técnicas de electrocoagulación combinada con fitorremediación o con coadyuvantes químicos. Esto confirma que el uso de biocoagulantes líquidos combinados con electrocoagulación es una alternativa biotecnológica efectiva para abordar los retos asociados al tratamiento de efluentes lácteos, con remociones de turbidez y DQO similares o superiores a las reportadas en la literatura.



## RECOMENDACIONES

**PRIMERA:** Considerando la alta efectividad demostrada por el proceso combinado de electrocoagulación y biocoagulante en la eliminación de contaminantes del agua residual láctea, se recomienda su implementación a escala industrial en la localidad de Majes. Se sugiere realizar estudios adicionales para optimizar aún más el proceso y adaptarlo a las necesidades específicas de la industria láctea local, asegurando así un tratamiento eficiente y sostenible de los efluentes.

**SEGUNDA:** Aunque no se identificó una fuerza electromotriz óptima específica para el proceso de electrocoagulación, se recomienda mantener la fuerza electromotriz dentro del rango estudiado para garantizar la consistencia en los resultados y evitar posibles efectos adversos. Además, se sugiere realizar investigaciones adicionales para explorar otros parámetros operativos que puedan influir en la eficacia del tratamiento.

**TERCERA:** Dado que el tiempo de electrocoagulación no parece ser un factor determinante en la eficacia del tratamiento del agua residual láctea, se recomienda mantener un tiempo de tratamiento consistente y ajustado a las necesidades operativas, evitando tiempos excesivamente prolongados que puedan aumentar los costos operativos sin mejorar la calidad del tratamiento.

**CUARTA:** Con base en la importancia del pH en la eficacia del tratamiento, se recomienda mantener el pH del agua residual láctea lo más cercano posible a 7.5 durante el proceso de electrocoagulación. Esto puede lograrse mediante la adición controlada de agentes neutralizantes o ajustadores de pH al sistema, asegurando así un rendimiento óptimo y consistente del tratamiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Villena LJ. Contaminación en la industria láctea. Anales de la Real Academia de Ciencias Veterinarias de Andalucía Oriental. 1995;8:11–38.
2. Santanarúa E, Álvarez F. Caracterización de los parámetros de calidad del agua para disminuir la contaminación durante el procesamiento de lácteos. Agroindustrial Science. 2015;5(1):13–26.
3. Matute SA. Tratamiento de residuos Lácteos. CONSEJO NACIONAL DE PRODUCCIÓN. 2000;1–19.
4. Poveda Ávila JD, Vela Camacho OG. “Eficiencia de un electro coagulador como alternativa para el tratamiento de aguas residuales de una industria alimentaria”. Universidad Santo Tomas.; 2021.
5. Arango Ruíz Á, Fernando Garcés Giraldo L. Wastewater treatment from milk industries Artículo Original. Vol. 2. 2007.
6. Herrera O, Corpas E. Treatment of dairy industry wastewater using beneficial microorganisms. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. 2013;11(1):57–67.
7. López P, Harnisth A. Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea ( Dairy industry wastewater electrocoagulation ). Enfoque UTE. 2016;7(1):13–21.
8. Banchón C, Baquerizo R, Muñoz D, Zambrano L. Coagulación natural para la descontaminación de efluentes industriales. Enfoque UTE. 2016;7(4):111–26.
9. Sotheeswaran S, Nand V, Matakite M, Kanayathu K. Moringa oleifera and other local seeds in water purification in developing countries. Res J Chem Environ. 2011;15(2):135–8.
10. Veisseyre R. Lactología Técnica . 3a ed. ACRIBIA; 1988.
11. Gonzales Santivañez HR. Evaluación de la eficiencia de la disminución de carga orgánica con un sistema fotovoltaico en un proceso de electrocoagulación del lactosuero residual Distrito de Apata-Junin. [Huancayo-Perú]: Universidad Alas Peruanas; 2015.
12. Sharma P, Segat A, Kelly AL, Sheehan JJ. Colorants in cheese manufacture: Production, chemistry, interactions, and regulation. Compr Rev Food Sci Food Saf. el 23 de julio de 2020;19(4):1220–42.
13. Zheng X, Shi X, Wang B. A Review on the General Cheese Processing Technology, Flavor Biochemical Pathways and the Influence of Yeasts in Cheese. Front Microbiol. el 29 de julio de 2021;12.
14. Fox PF, Guinee TP, Cogan TM, McSweeney PLH. Fundamentals of Cheese Science. Boston, MA: Springer US; 2017.

15. Lawrence RC, Gilles J, Creamer LK, Crow VL, Heap HA, Honoré CG, et al. Cheddar cheese and related dry-salted cheese varieties. En 2004. p. 71–102.
16. Wang LK, Hung YT, Lo HH, Yapijakis C, editores. Handbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment. 2a ed. CRC Press; 2004.
17. Farizoglu B, Keskinler B, Yildiz E, Nuhoglu A. Simultaneous removal of C, N, P from cheese whey by jet loop membrane bioreactor (JLMBR). J Hazard Mater. julio de 2007;146(1–2):399–407.
18. Karadag D, Köroğlu OE, Ozkaya B, Cakmakci M. A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater. Process Biochemistry. febrero de 2015;50(2):262–71.
19. Venkata Mohan S, Lalit Babu V, Sarma PN. Effect of various pretreatment methods on anaerobic mixed microflora to enhance biohydrogen production utilizing dairy wastewater as substrate. Bioresour Technol. enero de 2008;99(1):59–67.
20. Valencia Denicia E, Ramírez Castillo M. La industria de la leche y la contaminación del agua. Redalyc [Internet]. 2009;16(73):27–31. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=29411996004>
21. Ramírez Navas JS. Aprovechamiento Industrial de Lactosuero Mediante Procesos Fermentativos. Publicaciones e Investigación. 2012;6:69.
22. Qasim W, Mane AV. Characterization and treatment of selected food industrial effluents by coagulation and adsorption techniques. Water Resour Ind. diciembre de 2013;4:1–12.
23. Gopinatha Kurup G, Adhikari B, Zisu B. Recovery of proteins and lipids from dairy wastewater using food grade sodium lignosulphonate. Water Resour Ind. el 1 de diciembre de 2019;22:100114.
24. Carvalho F, Prazeres AR, Rivas J. Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. Science of The Total Environment. el 15 de febrero de 2013;445–446:385–96.
25. Sánchez G, Gil M, Gil M, Giraldo F, Millán L, Villada M. Aprovechamiento del suero lácteo de una empresa del norte antioqueño mediante microorganismos eficientes. Produccion y limpia. 2009;4(2):65–74.
26. LÓPEZ RÍOS CA, ZULUAGA MENESES A, HERRERA PENAGOS SN, RUIZ COLORADO AA, MEDINA DE PÉREZ VI. PRODUCTION OF CITRIC ACID WITH *Aspergillus niger* NRRL 2270 FROM MILK WHEY. Dyna (Medellin). 2006;73(150):39–57.
27. Callejas J, Prieto F, Reyes V, Marmolejo Y, Méndez M. Caracterización fisicoquímica de un lactosuero: potencialidad de recuperación de fósforo. Acta Univ. 2012;22(1):11–8.
28. Ramírez Navas JS. Aprovechamiento Industrial de Lactosuero Mediante Procesos Fermentativos. Publicaciones e Investigación. 2012;6:69.
29. Schaafsma G. Lactose and lactose derivatives as bioactive ingredients in human nutrition. Int Dairy J. 2008;18(5):458–65.

30. Riofrío Grijalva R. Caracterización de lactosuero proveniente de cuatro producciones de diferentes tipos de queso (tesis de grado). 2014.
31. Parzanese M. Tecnologías para la Industria Alimentaria. Procesamiento de lactosuero. Alimentos Argentinos – MinAgri. 2008;1–9.
32. Arenas Jarro RY. TRATAMIENTO DE LACTOSUERO POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA POSTERIOR PRECIPITACIÓN QUÍMICA Y SUBSECUENTE USO PARA CULTIVO DE MICROALGAS (*Chlorella vulgaris*) EN UN BIORREACTOR TIPO RACEWAY. [Arequipa]: Universidad Católica de Santa María; 2023.
33. Parra R. Lactosuero: Importancia En La Industria De Alimentos. Rev Fac Nac Agron Medellin. 2009;62(1):4967–82.
34. Aider M, de Halleux D, Melnikova I. Skim acidic milk whey cryoconcentration and assessment of its functional properties: Impact of processing conditions. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2009;10(3):334–41.
35. López-Barreto RE, Becerra-Jiménez ML, Borrás-Sandoval LM. Caracterización físico-química y microbiológica del lactosuero del queso Paipa. Ciencia y Agricultura. 2018;15(2):99–106.
36. Lazo A, Vilca Y. Tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria láctea mediante el proceso de electrocoagulación. 2020;97.
37. Volcke EIP, Solon K, Comeau Y, Henze M. Wastewater characteristics. En: Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design. IWA Publishing; 2020. p. 77–110.
38. Moreno-Casillas HA, Cocke DL, Gomes JAG, Morkovsky P, Parga JR, Peterson E. Electrocoagulation mechanism for COD removal. Sep Purif Technol. agosto de 2007;56(2):204–11.
39. Von Sperling M. Introdução à Qualidade das águas e ao Tratamento de Esgotos. 2a ed. Vol. 1. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; 1996.
40. Al-Tayawi AN, Sisay EJ, Beszédes S, Kertész S. Wastewater Treatment in the Dairy Industry from Classical Treatment to Promising Technologies: An Overview. Processes. el 17 de julio de 2023;11(7):2133.
41. Lory JA, Massey RE, Zulovich JM. An Evaluation of the USEPA Calculations of Greenhouse Gas Emissions from Anaerobic Lagoons. J Environ Qual. mayo de 2010;39(3):776–83.
42. Licença de Operação Corretiva para a atividade de Preparação do leite e fabricação de produtos de laticínios [Internet]. Rio São Francisco; 2018 [citado el 22 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://sistemas.meioambiente.mg.gov.br/reunioes/uploads/FikFcGvcEBIhNZ4twpb6OTPPeOv7ELWx.pdf>
43. Andrade LH, Motta GE, Amaral MCS. Treatment of dairy wastewater with a membrane bioreactor. Brazilian Journal of Chemical Engineering. diciembre de 2013;30(4):759–70.

44. Andrade LH de, Mendes FD dos S, Espindola JC, Amaral MCS. Internal versus external submerged membrane bioreactor configurations for dairy wastewater treatment. *Desalination Water Treat.* el 12 de mayo de 2014;52(16–18):2920–32.
45. Alves AM, de Moura RB, Carvalho AKF, de Castro HF, Andrade GSS. *Penicillium citrinum* whole-cells catalyst for the treatment of lipid-rich wastewater. *Biomass Bioenergy.* enero de 2019;120:433–8.
46. Ramos MDN, Milessi TS, Candido RG, Mendes AA, Aguiar A. Enzymatic catalysis as a tool in biofuels production in Brazil: Current status and perspectives. *Energy for Sustainable Development.* junio de 2022;68:103–19.
47. Manuel D, Valero V. Tratamiento de las aguas residuales de la industria de la almendra mediante técnicas electroquímicas: Estudio de la alimentación de los sistemas mediante energía solar fotovoltaica.
48. Bustillo-Lecompte CF, Ghafoori S, Mehrvar M. Photochemical degradation of an actual slaughterhouse wastewater by continuous UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> photoreactor with recycle. *J Environ Chem Eng.* marzo de 2016;4(1):719–32.
49. Ozturk D, Yilmaz AE. Treatment of slaughterhouse wastewater with the electrochemical oxidation process: Role of operating parameters on treatment efficiency and energy consumption. *Journal of Water Process Engineering.* octubre de 2019;31:100834.
50. Rahmani AR, Mousavi-Tashar A, Masoumi Z, Azarian G. Integrated advanced oxidation process, sono-Fenton treatment, for mineralization and volume reduction of activated sludge. *Ecotoxicol Environ Saf.* enero de 2019;168:120–6.
51. Vidal J, Huiliñir C, Salazar R. Removal of organic matter contained in slaughterhouse wastewater using a combination of anaerobic digestion and solar photoelectro-Fenton processes. *Electrochim Acta.* agosto de 2016;210:163–70.
52. Gomes AJG, Atambo DO, Das KK, Cocke DL, Das KP. Electrochemical remediation of chicken processing plant wastewater. *J Environ Chem Eng.* octubre de 2018;6(5):6028–36.
53. Vidal J, Carvajal A, Huiliñir C, Salazar R. Slaughterhouse wastewater treatment by a combined anaerobic digestion/solar photoelectro-Fenton process performed in semicontinuous operation. *Chemical Engineering Journal.* diciembre de 2019;378:122097.
54. Reilly M, Cooley AP, Tito D, Tassou SA, Theodorou MK. Electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewaters. *Energy Procedia.* marzo de 2019;161:343–51.
55. Tchamango SR, Wandji Ngayo K, Belibi Belibi PD, Nkouam F, Ngassoum MB. Treatment of a dairy effluent by classical electrocoagulation and indirect electrocoagulation with aluminum electrodes. *Sep Sci Technol.* el 13 de abril de 2021;56(6):1128–39.

56. Afsharnia M, Kianmehr M, Biglari H, Dargahi A, Karimi A. Disinfection of dairy wastewater effluent through solar photocatalysis processes. *Water Science and Engineering*. julio de 2018;11(3):214–9.
57. Chezeau B, Boudriche L, Vial C, Boudjemaa A. Treatment of dairy wastewater by electrocoagulation process: Advantages of combined iron/aluminum electrodes. *Sep Sci Technol*. el 21 de septiembre de 2020;55(14):2510–27.
58. Rajaniemi K, Tuomikoski S, Lassi U. Electrocoagulation Sludge Valorization—A Review. *Resources*. el 14 de diciembre de 2021;10(12):127.
59. Sharma P, Joshi H. Utilization of electrocoagulation-treated spent wash sludge in making building blocks. *International Journal of Environmental Science and Technology*. el 28 de enero de 2016;13(1):349–58.
60. Adyel TM, Rahman SH, Zaman MM, Sayem HMd, Khan M, Abdul Gafur Md, et al. Reuse Feasibility of Electrocoagulated Metal Hydroxide Sludge of Textile Industry in the Manufacturing of Building Blocks. *Journal of Waste Management*. el 5 de febrero de 2013;2013:1–9.
61. Mollah MYA, Schennach R, Parga JR, Cocke DL. Electrocoagulation (EC)--science and applications. *J Hazard Mater [Internet]*. el 1 de junio de 2001 [citado el 21 de noviembre de 2023];84(1):29–41. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11376882/>
62. Arango Á. Effects of the pH and the conductivity on the electrocoagulation of waste water from dairy industries. *Producción + Limpia*. 2012;7(1):59–67.
63. Das PP, Sharma M, Purkait MK. Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: A review. *Sep Purif Technol*. 2022;292(March):121058.
64. Aguilar E. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*. 2015;18(35):69–73.
65. Cabrera Bermúdez X, Fleites Ramirez M, Contreras Moya A. ESTUDIO DEL PROCESO DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA TEXTIL “DESEMBARCO DEL GRANMA” A ESCALA DE LABORATORIO. *Tecnología Química [Internet]*. julio de 2009;xxix(3):64–73. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543760009>
66. Lorenzo-Acosta Y. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar [Internet]*. mayo de 2006;XL(2):10–7. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>
67. Cárdenas Andía Y. TRATAMIENTO DE AGUA COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN. Lima-Perú; 2000 mar.
68. Stasinakis AS, Charalambous P, Vyrides I. Dairy wastewater management in EU: Produced amounts, existing legislation, applied treatment processes and future challenges. *J Environ Manage*. febrero de 2022;303:114152.

69. Litu L, Ciobanu G, Cimpeanu SM, Kotova O, Ciocinta R, Bucur D, et al. Comparative study between flocculation - coagulation processes in raw/wastewater treatment. *AgroLife Scientific Journal*. 2019;8(1):139–45.
70. Kurniawan SB, Imron MF, Chik CENCE, Owodunni AA, Ahmad A, Alnawajha MM, et al. What compound inside biocoagulants/biofloculants is contributing the most to the coagulation and flocculation processes? *Science of The Total Environment*. febrero de 2022;806:150902.
71. Shrivastava V, Ali I, Marjub MM, Rene ER, Soto AMF. Wastewater in the food industry: Treatment technologies and reuse potential. *Chemosphere*. abril de 2022;293:133553.
72. Mustafa S, Bhatti HN, Maqbool M, Iqbal M. Microalgae biosorption, bioaccumulation and biodegradation efficiency for the remediation of wastewater and carbon dioxide mitigation: Prospects, challenges and opportunities. *Journal of Water Process Engineering*. junio de 2021;41:102009.
73. Hannah DM, Abbott BW, Khamis K, Kelleher C, Lynch I, Krause S, et al. Illuminating the 'invisible water crisis' to address global water pollution challenges. *Hydrol Process*. el 2 de marzo de 2022;36(3).
74. Barrenechea Martel; Ada. Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS). Lima; 2004. p. 1–54.
75. Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel D. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4a ed.
76. Martínez Nodal P. Alternativas tecnológicas que permitan alcanzar producciones más limpias en el Establecimiento 101, Tenería "Patricio Lumumba" del Municipio Caibarien. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas; 2004.
77. Pastrana Pacho A. COAGULACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES MEDIANTE MEZCLAS COAGULANTES DE CROTALARIA LONGIROSTRATA (CHIPILÍN) Y SULFATO DE ALUMINIO. [Mexico-Tabasco]: UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO; 2021.
78. Díaz Claros JN. COAGULANTES-FLOCULANTES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS ELABORADOS DE PLANTAS Y DEL RECICLAJE DE LA CHATARRA, PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS [Mestría en Educación en las Ciencias Naturales con orientación en la enseñanza Química]. [San Pedro Sula Cortés]: Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazan;
79. Carpio Hernández BM. EVALUACIÓN DEL USO DE SEMILLAS DE Mangifera indica L (MANGO) COMO COAGULANTE NATURAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA PTAR MUNIVES DE VES-LIMA. 2019.
80. López Pérez M. EVALUACIÓN DEL USO DE LA CACTÁCEA Opuntia ficus-indica COMO COAGULANTE NATURAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS. 2018.

81. Guzmán L, Villabona Á, Tejada C, García R. REDUCCIÓN DE LA TURBIDEZ DEL AGUA USANDO COAGULANTES NATURALES: UNA REVISIÓN REDUCTION OF WATER TURBIDITY USING NATURAL COAGULANTS: A REVIEW.
82. Jiménez Antillón J, Vargas Camareno M, Quirós Bustos N. Evaluación de la tuna (*Opuntia cochenillifera*) para la remoción del color en agua potable. *Tecnología en Marcha*. septiembre de 2012;25(4):55–62.
83. García Fayos B. METODOLOGÍA DE EXTRACCIÓN IN SITU DE COAGULANTES NATURALES PARA LA CLARIFICACIÓN DE AGUA SUPERFICIAL. APLICACIÓN EN PAISES EN VIAS DE DESARROLLO. [Valencia]: Universidad Politecnica de Valencia.; 2007.
84. Parada LG, Miranda R, Salvador S. Caracterización de quitosano por viscosimetría capilar y valoración potenciométrica. *Revista iberoamericana de polímeros*. 2004;5(1):1–16.
85. Giraldo J. Propiedades, obtención, caracterización y aplicaciones del quitosano. University of Concepcion. 2015;(MAY).
86. Castro Cordero MA, Gonzalez Saldaña RP. Evaluación en vivo del grado de humectación de dos productos a base de quitina y quitosano. [Cuenca, Ecuador]: Universidad politecnica Salesiana ; 2018.
87. Lárez-V C. Quitina y quitosano: materiales del pasado para el presente y el futuro. *Avances en Química*. 2006;1(2):15–21.
88. Valencia A. Efecto Antimicrobiano Del Quitosano: Una Revisión De La Literatura Antimicrobial Effect of Chitosan: a Review. *Scientia Agroalimentaria*. 2015;2:32–8.
89. Islam S, Bhuiyan MAR, Islam MN. Chitin and Chitosan: Structure, Properties and Applications in Biomedical Engineering. Vol. 25, *Journal of Polymers and the Environment*. Springer New York LLC; 2017. p. 854–66.
90. H Hernández C, E Águila A, O Flores A, E L Viveros N, E Ramos C. Obtención y caracterización de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón. *Superficies y Vacío*. 2009;22(3):57–60.
91. Lárez V C. Algunos usos del quitosano en sistemas acuosos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 2003;4(2):91–109.
92. Guzmán Loayza D, Chávez J. ESTUDIO BROMATOLÓGICO DEL CLADODIO DEL NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) PARA EL CONSUMO HUMANO a b CHEMICAL COMPOSITIONAL STUDY OF NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) CLADOPHYLL FOR HUMAN CONSUMPTION.
93. Dominguez-Martinez BM, Martínez-Flores HE, Berrios JDJ, Otoni CG, Wood DF, Velazquez G. Physical Characterization of Biodegradable Films Based on Chitosan, Polyvinyl Alcohol and *Opuntia* Mucilage. *J Polym Environ*. 2017;25(3):683–91.
94. Santisteban Tineo EN. Aplicación de *Opuntia ficus - indica* (Nopal) como coagulante natural para la biorremediación de aguas residuales: Revisión sistemática. Universidad César Vallejo. 2020. 1–118 p.

95. Sáenz C, Sepulveda E, Matsuhiro B. Opuntia spp mucilage ' s : a functional component with industrial perspectives. Journal of Arid Environments 57. 2004;57:275–90.
96. Sepulveda CA, Graham JB, Bernal D. Aerobic metabolic rates of swimming juvenile mako sharks, Isurus oxyrinchus. Mar Biol. 2007;152(5):1087–94.
97. Almendárez de Quezada N. COMPROBACION DE LA EFECTIVIDAD DEL COAGULANTE (COCHFLOC) EN AGUAS DEL LAGO DE MANAGUA “PIEDRAS AZULES”. Revista Iberoamericana de Polímeros. marzo de 2004;5(1):46–54.
98. Lozano Florián LL. Efecto en la disminución de la turbidez en el agua por floculantes de Opuntia ficus-indica (Tuna) con diferentes procesos de extracción en el río Chonta de Cajamarca, 2018. Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo. 2018;84.
99. Silva M. Extracción del mucílago de la penca de tuna y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de aguas turbias Para optar el Título Profesional de Ingeniera Química. 2017;1–132.
100. Barrientos P. Nopal y agaves como recurso de zonas áridas y semiaridas de México. Chapingo-Mexico: Centro de Genetica. 1983;
101. Lizeth Torres-Ponce R, Morales-Corral D, de Lourdes Ballinas-Casarrubias M, Virginia Nevárez-Moorillón G. Núm.5 30 de junio-13 de agosto. Vol. 6, Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 2015.
102. David Valdez Cepeda R, Blanco Macías F, Alvarado REV, Magallanes Quintanar R. REVISTA SALUD PUBLICA Y NUTRICION PRODUCCIÓN Y USOS DEL NOPAL PARA VERDURA.
103. Gutiérrez Cortez E, Rojas Molina I, Del Real A, Paredes-Martínez E, Enrique M, García R. CONDICIONES DE PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCILAGO DE NOPAL DESHIDRATADO. Revista salud pública y nutrición . 2011;5.
104. Vaca Mier M, López Callejas R, Flores Rodríguez J, Terres Peña H, Lizardi Ramos A, Rojas Valencia Ma. APLICACIÓN DEL NOPAL (Opuntia ficus indica) COMO COAGULANTE PRIMARIO DE AGUAS RESIDUALES. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales Investigación, desarrollo y práctica. 2014;7(3):210–6.
105. Jankovic A, Chaudhary G, Goia F. Designing the design of experiments (DOE) – An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. Energy Build. noviembre de 2021;250:111298.
106. Carlson R, Carlson JE. The Study of Experimental Factors. En: Comprehensive Chemometrics. Elsevier; 2009. p. 301–44.
107. Pigeon JG. Statistics for Experimenters: Design, Innovation and Discovery. Technometrics. mayo de 2006;48(2):303–4.
108. Farooq MA, Nóvoa H, Araújo A, Tavares SMO. An innovative approach for planning and execution of pre-experimental runs for Design of Experiments. European Research on Management and Business Economics. septiembre de 2016;22(3):155–61.

109. Ramachandran KM, Tsokos CP. Design of experiments. En: *Mathematical Statistics with Applications in R*. Elsevier; 2021. p. 343–68.
110. Box GEP, Wilson KB. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. En 1992. p. 270–310.
111. Shen X, Zhang G, Bjerg B. Assessments of experimental designs in response surface modelling process: Estimating ventilation rate in naturally ventilated livestock buildings. *Energy Build.* julio de 2013;62:570–80.
112. Ilzarbe L, Álvarez MJ, Viles E, Tanco M. Practical applications of design of experiments in the field of engineering: a bibliographical review. *Qual Reliab Eng Int.* el 19 de junio de 2008;24(4):417–28.
113. K. PN, Pattnaik BK, Das S. Comparative evaluation between Taguchi method and response surface method for optimization of electrocoagulation process in the context of treatment of dairy industry wastewater. *Environ Monit Assess.* el 26 de julio de 2024;196(7):663.
114. Belkodia K, El mersly L, Edaala M amine, Achtak H, Alaoui Tahiri A, Briche S, et al. Cheese wastewater treatment through combined coagulation-flocculation and photo-Fenton-like advanced oxidation processes for reuse in irrigation: effect of operational parameters and phytotoxicity assessment. *Environmental Science and Pollution Research.* el 15 de enero de 2024;
115. Bayraktar A, Gürsoy C. Production of New Nano-Bacterial Cellulose with *Lactobacillus rhamnosus* by Using Whey Waste as Substrate with Optimization Taguchi Method, which has the potential to be used in many biomedical products. 2024; Disponible en: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3828016/v1>
116. Kozik V, Barbusinski K, Thomas M, Sroda A, Jampilek J, Sochanik A, et al. Taguchi Method and Response Surface Methodology in the Treatment of Highly Contaminated Tannery Wastewater Using Commercial Potassium Ferrate. *Materials.* el 18 de noviembre de 2019;12(22):3784.
117. Ibrahim H, Salman R. Real wastewater Treatment by Electrocoagulation- Electro-oxidation Combined System: Optimization using Taguchi Approach. *Egypt J Chem.* el 14 de septiembre de 2021;0(0):0–0.
118. Mata-Gómez LC, Mapelli-Brahm P, Meléndez-Martínez AJ, Méndez-Zavala A, Morales-Oyervides L, Montañez J. Microbial Carotenoid Synthesis Optimization in Goat Cheese Whey Using the Robust Taguchi Method: A Sustainable Approach to Help Tackle Vitamin A Deficiency. *Foods.* el 3 de febrero de 2023;12(3):658.
119. Vrsalović L, Medvidović NV, Svilović S, Pavlinović A. Taguchi method in the optimization of municipal wastewater treatment by electrocoagulation integrated with zeolite. *Energy Reports.* el 1 de julio de 2023;9:59–76.
120. Pervez Md, Shafiq F, Sarwar Z, Jilani M, Cai Y. Multi-Response Optimization of Resin Finishing by Using a Taguchi-Based Grey Relational Analysis. *Materials.* el 15 de marzo de 2018;11(3):426.

121. Kumar A, Basu D. Economic and performance evaluation of electrocoagulation unit for the treatment of hexavalent chromium using Taguchi method. *International Journal of Environmental Science and Technology*. el 5 de agosto de 2023;20(8):8753–62.
122. Yuce BE, Nielsen PV, Wargocki P. The use of Taguchi, ANOVA, and GRA methods to optimize CFD analyses of ventilation performance in buildings. *Build Environ*. noviembre de 2022;225:109587.
123. Omar BA, Elmasry R, Eita A, Soliman MM, El-Tahan AM, Sitohy M. Upgrading the preparation of high-quality chitosan from *Procambarus clarkii* wastes over the traditional isolation of shrimp chitosan. *Saudi J Biol Sci*. el 1 de febrero de 2022;29(2):911–9.
124. Otálora MC, Wilches-Torres A, Gómez Castaño JA. Extraction and physicochemical characterization of dried powder mucilage from *Opuntia ficus-indica* cladodes and aloe vera leaves: A comparative study. *Polymers (Basel)*. el 1 de junio de 2021;13(11).
125. Djerroud N, Adjeroud N, Felkai-Haddache L, Hammoui Y, Remini H, Dahmoune F, et al. Enhanced electrocoagulation–electroflotation for turbidity removal by *Opuntia ficus indica* cladode mucilage. *Water and Environment Journal*. 2018;32(3):321–32.
126. Koochehi A, Mortazavi SA, Shahidi F, Razavi SMA, Taherian AR. Rheological properties of mucilage extracted from *Alyssum homolocarpum* seed as a new source of thickening agent. *J Food Eng [Internet]*. 2009;91(3):490–6. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.09.028>
127. Pacheco HGJ, Elguera NY, Ancco M, Castro AELF, Meza MEB, Almeida VC. Combined coagulation–electrocoagulation process using biocoagulant from the *Opuntia ficus-indica* for treatment of cheese whey wastewater. *Environ Monit Assess*. el 21 de abril de 2023;195(4):491.
128. Menchik P, Zuber T, Zuber A, Moraru CI. Short communication: Composition of coproduct streams from dairy processing: Acid whey and milk permeate. *J Dairy Sci*. mayo de 2019;102(5):3978–84.
129. Ana Estikomah S, S, Susilowati A, Masykuri M. Cheese Whey Wastewater: Characterization and Value. *KnE Social Sciences*. el 4 de agosto de 2023;
130. Porwal HJ, Mane AV, Velhal SG. Biodegradation of dairy effluent by using microbial isolates obtained from activated sludge. *Water Resour Ind*. marzo de 2015;9:1–15.
131. Foller T, Wen X, Khine YY, Ji D, Gupta T, Muller M, et al. Removal of chlorine and monochloramine from tap water using graphene oxide membranes. *J Memb Sci*. noviembre de 2023;686:122022.
132. Ayeta EG, Yafetto L, Lutterodt G, Ogbonna JF, Miyittah MK. Groundwater in the coastal areas of Ghana: Quality and associated health risks. *Heliyon*. junio de 2024;10(11):e31652.

133. Karadag D, Köroğlu OE, Ozkaya B, Cakmakci M. A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater. *Process Biochemistry*. febrero de 2015;50(2):262–71.
134. GANNOUN H, KHELIFI E, BOUALLAGUI H, TOUHAMI Y, HAMDİ M. Ecological clarification of cheese whey prior to anaerobic digestion in upflow anaerobic filter. *Bioresour Technol*. septiembre de 2008;99(14):6105–11.
135. Traversi D, Bonetta S, Degan R, Villa S, Porfido A, Bellerio M, et al. Environmental Advances Due to the Integration of Food Industries and Anaerobic Digestion for Biogas Production: Perspectives of the Italian Milk and Dairy Product Sector. *Bioenergy Res*. el 6 de septiembre de 2013;6(3):851–63.
136. González Siso M. The biotechnological utilization of cheese whey: A review. *Bioresour Technol*. julio de 1996;57(1):1–11.
137. Altıparmak G, Kourletakis P, Moustakas K, Vakalis S. Assessing the effect of hydrothermal treatment (HT) severity on the fate of nitrates and phosphates in dairy wastewater. *Fuel*. marzo de 2022;312:122866.
138. Crittenden JC, Trussell RR, Hand DW, Howe KJ, Tchobanoglous G. *MWH's Water Treatment*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2012.
139. Bratby J. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. *Water Intelligence Online*. el 2 de marzo de 2016;15(0):9781780407500–9781780407500.
140. Shabanizadeh H, Taghavijeloudar M. A sustainable approach for industrial wastewater treatment using pomegranate seeds in flocculation-coagulation process: Optimization of COD and turbidity removal by response surface methodology (RSM). *Journal of Water Process Engineering*. julio de 2023;53:103651.
141. Nelson DL, Cox MM. *Lehninger Principles of Biochemistry*. 4a ed. Freeman WH, editor. 2017.
142. Ghosh SK. *Waste Water Recycling and Management*. Ghosh SK, editor. Singapore: Springer Singapore; 2019.
143. Gok Z, Kucukcongar S, Turkyilmaz M, Tutar Oksuz S. Treatment of strained yoghurt wastewater by electrochemical oxidation method using Taguchi experimental design. *J Appl Electrochem*. el 1 de agosto de 2023;53(8):1595–607.
144. Juang RS, Shao HJ. Effect of pH on Competitive Adsorption of Cu(II), Ni(II), and Zn(II) from Water onto Chitosan Beads. *Adsorption*. 2002;8(1):71–8.
145. Dionisi D, Bruce SS, Barraclough MJ. Effect of pH adjustment, solid–liquid separation and chitosan adsorption on pollutants' removal from pot ale wastewaters. *J Environ Chem Eng*. diciembre de 2014;2(4):1929–36.
146. Dayarathne HNP, Angove MJ, Aryal R, Abuel-Naga H, Mainali B. Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms. *Journal of Water Process Engineering*. abril de 2021;40:101820.

147. Zhao C, Zhou J, Yan Y, Yang L, Xing G, Li H, et al. Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review. *Science of The Total Environment*. abril de 2021;765:142795.
148. Nguyen LAT, Ward AJ, Lewis D. Utilisation of turbidity as an indicator for biochemical and chemical oxygen demand. *Journal of Water Process Engineering*. diciembre de 2014;4:137–42.
149. Akansha J, Nidheesh PV, Gopinath A, Anupama KV, Suresh Kumar M. Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process. *Chemosphere*. agosto de 2020;253:126652.
150. Ghahremani H, Bagheri S, Hassani SM, Khoshchehreh MR. Treatment of Dairy Industry Wastewater using an Electrocoagulation Process. *Adv Environ Biol*. 2012;6(7):1897–901.
151. Zakeri HR, Yousefi M, Mohammadi AA, Baziar M, Mojiri SA, Salehnia S, et al. Chemical coagulation-electro fenton as a superior combination process for treatment of dairy wastewater: performance and modelling. *International Journal of Environmental Science and Technology*. el 29 de diciembre de 2021;18(12):3929–42.
152. Chen L, Qin J, Zhao Q, Ye Z. Treatment of dairy wastewater by immobilized microbial technology using polyurethane foam as carrier. *Bioresour Technol*. marzo de 2022;347:126430.

## ANEXOS

### Anexo 1: Figuras de procedimiento experimental

*Figura 8: Quitosano, producto final*



*Figura 9: Pencas de nopal limpias, peladas y cortadas en cubo.*



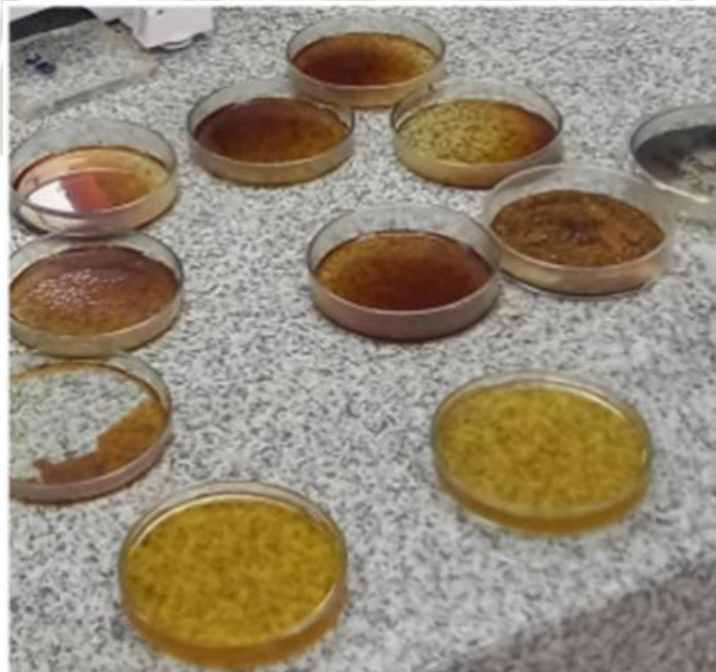
*Figura 10: Agua destilada después del lavado del mucílago.*



*Figura 11: Mucílago sedimentado y dispuesto en placas de Petri para facilitar su secado.*



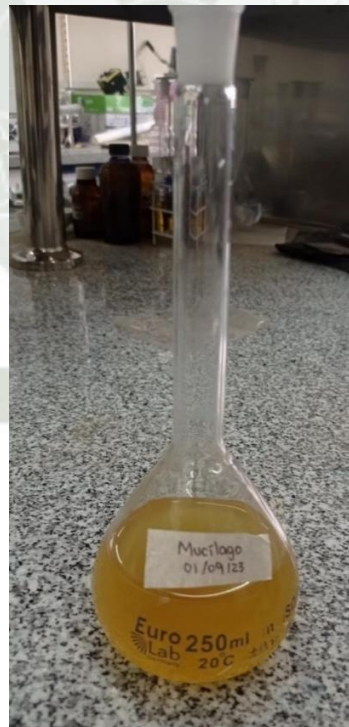
*Figura 12: Mucílago secado a 50°C en la estufa*



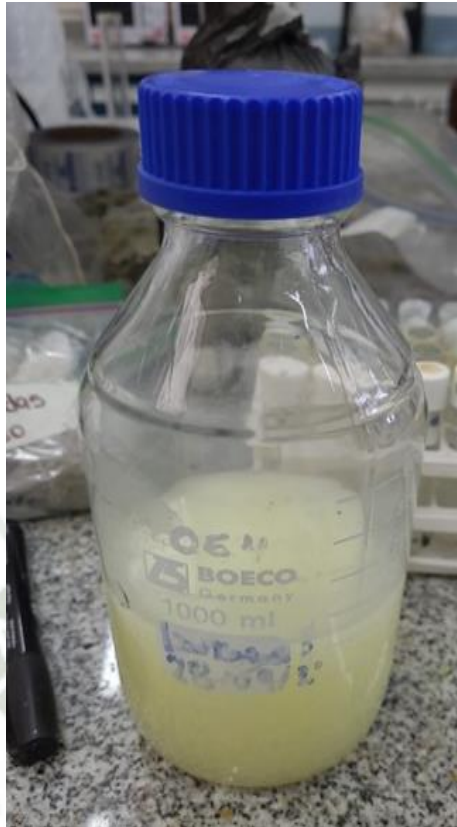
*Figura 13: Mucílago después del lavado con etanol y agua destilado, previo a entrar al proceso de secado en la estufa.*



*Figura 14: Solución final de Mucílago diluido en agua destilada*



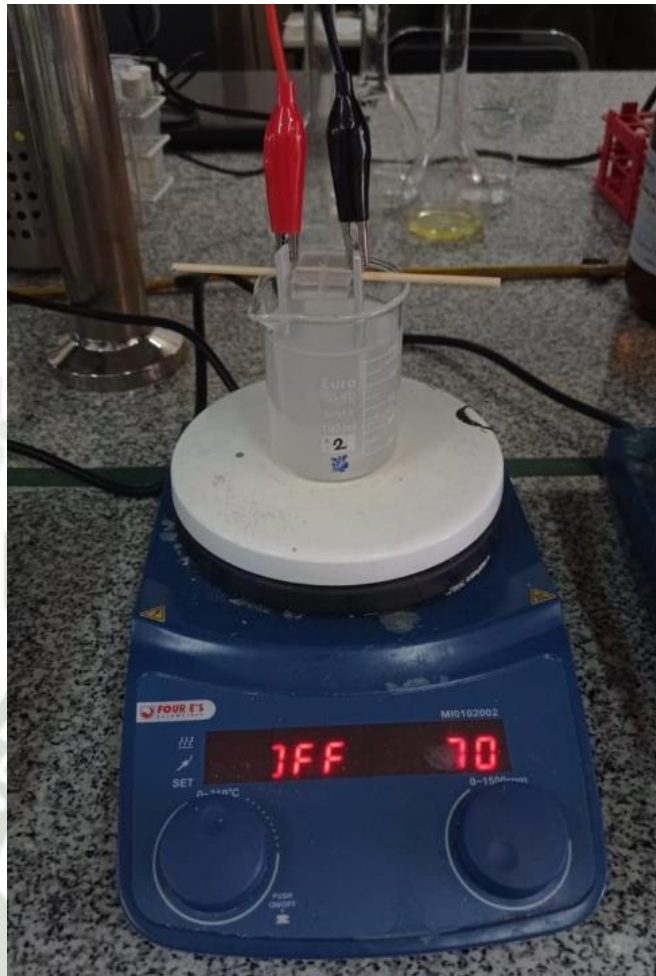
*Figura 15: Lactosuero desgrasado y acondicionado en el laboratorio.*



*Figura 16: Electrodo de aluminio después del tratamiento inicial con ácido.*



*Figura 17: Reactor monopolar de vidrio.*

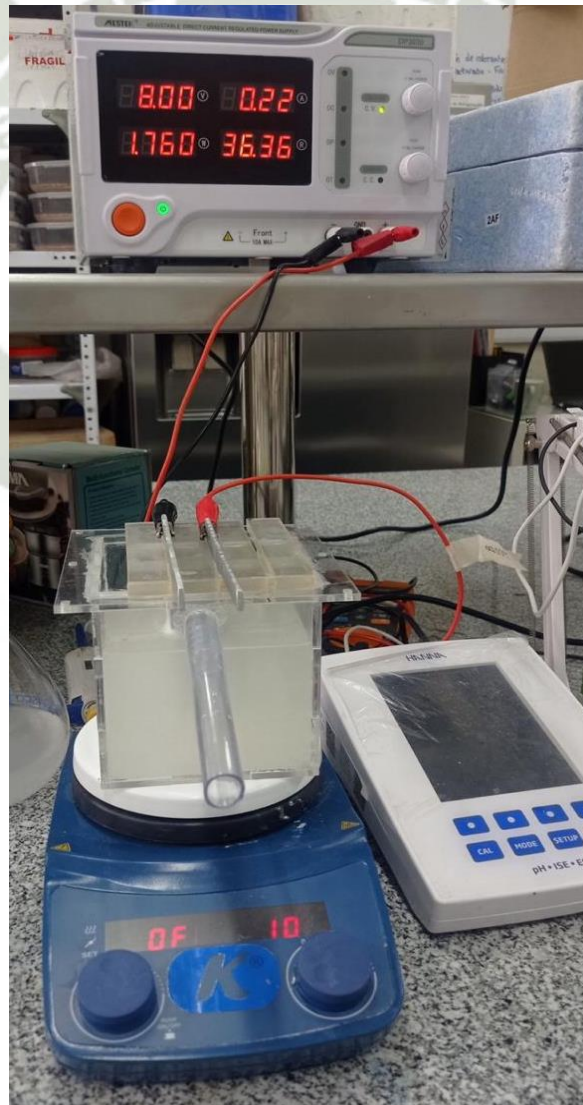


*Figura 18: Soporte deacrílico para electrodos de aluminio.*

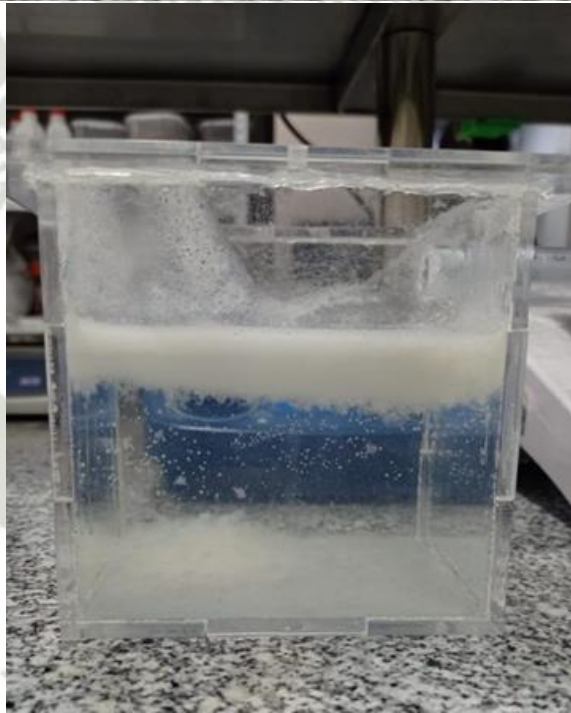
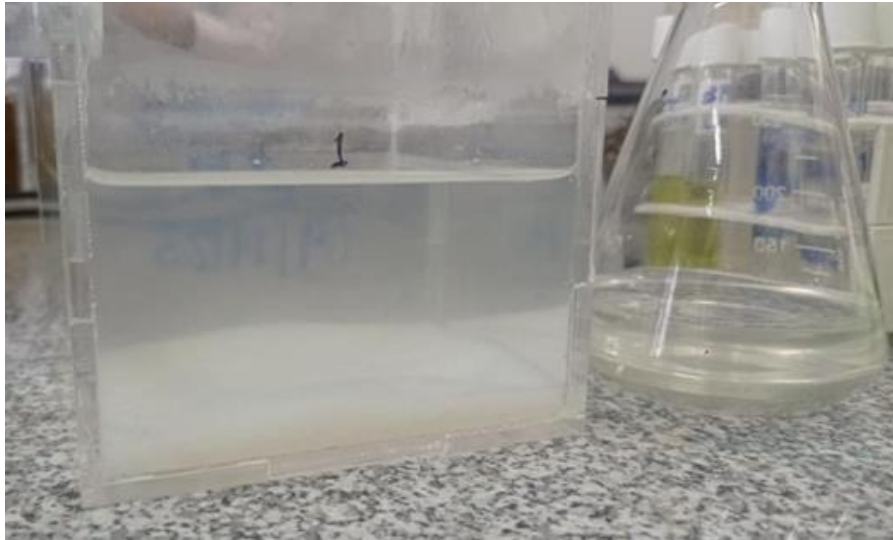




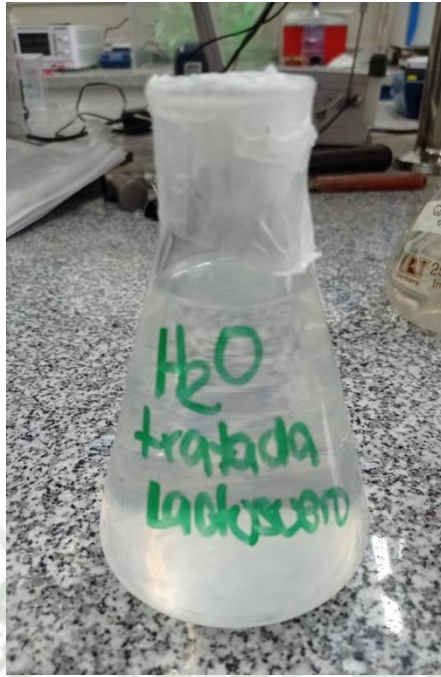
*Figura 19: Sistema de electrocoagulación.*



*Figura 20: Efluente lácteo después del tratamiento y el periodo de decantación.*



*Figura 21: Efluente tratado*



*Figura 22: Efluente tratado diluido depositado en el digestor HACH DR200 y colorímetro DR900 (especificación técnica) para la lectura de DQO*



# COLORÍMETRO PORTÁTIL DR 900

## Aplicaciones

- Agua Potable
- Aguas Residuales
- Aguas de uso Industrial



## Análisis de agua sencillo y rápido para las condiciones ambientales más exigentes.

El DR 900™ portátil permite el acceso fácil y rápido a sus métodos de prueba más utilizados. Este colorímetro es a prueba de agua, a prueba de polvo y muy resistente, para uso en campo. Con una interfaz de usuario intuitiva, capacidad de transmisión fácil de datos, y capacidad de medir hasta 90 de los métodos de análisis de agua más solicitados, el DR 900 hace que el análisis de aguas en condiciones ambientales difíciles sea menos problemático.

### Sus programas de análisis favoritos al alcance de la mano

Ahorre tiempo almacenando sus métodos más habituales, tendrá acceso rápido en menos de 4 clics.

### Diseñado para trabajo en campo en todas las formas posibles

Este colorímetro portátil es a prueba de agua y a prueba de polvo. Es de uso rudo ya que es a prueba de caídas y golpes para una mayor garantía de calidad.

### Interfaz de usuario intuitiva

La interfaz de usuario mejorada permite realizar rápidas selecciones y facilita los análisis.

### Sencilla transmisión de datos

Almacena hasta 500 análisis, y viene con un puerto USB para una fácil descarga o transmisión de información.

### Satisface sus principales necesidades de análisis

Un único instrumento portátil proporciona acceso a 90 de los parámetros más habituales.



Be Right™

## Especificaciones\*

<b>Fuente de luz</b>	Diodo de emisor de luz (LED)
<b>Rango de longitud de onda</b>	420 nm, 520 nm, 560 nm, 610 nm
<b>Selección de longitud de onda</b>	Automático
<b>Modo de operación</b>	Transmitancia (%), Absorbancia y Concentración
<b>Compatibilidad de la celda de muestra</b>	1 pulgada de diámetro o 16 mm de diámetro (con adaptador)
<b>Almacenamiento de datos</b>	500 valores medidos (Resultado, Fecha, Hora, ID de muestra, ID de usuario)
<b>Protección de la carcasa (IP)</b>	IP67 (tapa de protección cerrada)
<b>Pilas/baterías requeridas</b>	4 pilas alcalinas tamaño AA
<b>Vida útil de la batería</b>	6 meses (típico) @ 5 lecturas por día / 5 días de la semana sin retroiluminación** ** El uso de retroiluminación disminuirá la vida útil de la batería.
<b>Pantalla</b>	Pantalla gráfica 240 x 160 píxeles (Retroiluminación)

### Idiomas interfaz de usuario

English, French, German, Italian, Spanish, Portuguese, Bulgarian, Chinese, Czech, Danish, Dutch, Finnish, Greek, Hungarian, Japanese, Korean, Polish, Romanian, Russian, Slovenian, Swedish, Turkish

### Interfaz

USB tipo Mini IP67

### Dimensiones (A x A x P)

9.1 in x 3.8 in x 1.9 in  
(231 mm x 96 mm x 48 mm)

### Peso

1.32 lbs. (0.6 kg) con batería

### Velocidad de escaneado

Colorímetro DR 900, dos celdas de muestra de vidrio de 2 pulgadas marcadas en 10, 20 y 25 mL, dos celdas de muestra de plástico de 1 cm, un adaptador DQO/TEST'N'TUBE de 1 x 16-mm, 4 baterías AA alcalinas, manual del instrumento en varios idiomas, impreso y manuales de procedimientos en CD; Mini USB hacia cable USB

\*Sujeto a cambios sin aviso previo.

## Información para Pedidos

9385100 Colorímetro portátil DR 900

### Accesorios

- 2722000 Maletín de transporte para instrumento, con correa ajustable
- 4942500 Maletín de transporte rígido para instrumentos, estilo G
- 4943000 Maletín de transporte CEL para laboratorio portátil
- 2763900 Juego de estándares de absorbancia de verificación / DR (juego de 4 unidades)
- 2635300 Juego de estándares Secundarios de gel SpecCheck, cloro DPD
- 2980500 Cloro, Rango Medio, 0-4.00 mg/L como Cl<sub>2</sub>
- 2893300 Juego de estándares Secundarios de gel SpecCheck, cloro DPD - alto rango
- 2712500 Juego de estándar secundario de gel SpecCheck, fluoruro
- 2708000 Juego de estándares secundarios en gel SpecCheck, ozono, rango medio
- 2507500 Juego de estándares Secundarios de gel SpecCheck para monoclóramina y amonio libre.



## Oficina central de HACH COMPANY: Loveland, Colorado USA

Estados Unidos: 800-227-4224 tel 970-669-2932 fax orders@hach.com  
Fuera de Estados Unidos: 970-669-3050 tel 970-461-3939 fax int@hach.com  
hach.mx

LIT2810SP

E13 Impreso en EE.UU.

©Hach Company, 2013. Reservados todos los derechos.

Con el fin de mejorar y actualizar su equipo, Hach Company se reserva el derecho de modificar las especificaciones del equipo en cualquier momento.



## Anexo 2: Resultados finales del proceso de electrocoagulación

Nº corrida	Condiciones Iniciales				Condiciones Finales					
	Voltaje (V)	pH Inicial	Tiempo, h	Turbidez final, NTU	pH Final	T, °C	CND, uS/cm	TDS, mg/L	% Salinidad	%R, Tb
1	4	3.5	0.5	88.90	4.00	23.70		453.20		0.1%
2	4	3.5	0.5	89.00	4.13	23.60	914.00	457.10	1.80%	0.0%
3	4	3.5	0.5	87.80	4.07	23.60		431.90		1.3%
4	4	7.5	1	14.00	8.79	23.80		675.70		84.3%
5	4	7.5	1	13.90	8.94	23.60	1349.00	673.50	2.60%	84.4%
6	4	7.5	1	14.10	8.73	23.70		681.50		84.2%
7	4	10.5	1.5	14.40	8.50	23.80		721.60		83.8%
8	4	10.5	1.5	14.60	8.70	23.90	1433.00	716.10	2.10%	83.6%
9	4	10.5	1.5	14.50	8.41	24.10		756.20		83.7%
10	8	3.5	1	80.90	4.98	23.80		419.20		0.1%
11	8	3.5	1	80.90	5.08	23.70	825.10	412.30	1.60%	0.1%
12	8	3.5	1	80.90	4.90	23.60		415.40		0.1%
13	8	7.5	1.5	4.10	8.90	23.70		501.20		94.9%
14	8	7.5	1.5	4.06	8.85	23.60	990.10	494.90	2.10%	95.0%
15	8	7.5	1.5	4.05	8.96	23.60		499.80		95.0%
16	8	10.5	0.5	24.20	9.55	23.60		673.90		70.1%
17	8	10.5	0.5	24.60	9.39	23.70	1352.00	673.10	2.60%	69.6%
18	8	10.5	0.5	24.80	9.67	23.70		674.10		69.4%
19	12	3.5	1.5	80.80	5.15	23.90		278.30		0.2%
20	12	3.5	1.5	80.80	5.20	23.80	554.70	277.30	1.10%	0.2%
21	12	3.5	1.5	80.80	5.03	23.90		271.90		0.2%
22	12	7.5	0.5	8.42	8.97	23.90		641.20		89.6%
23	12	7.5	0.5	8.16	8.96	23.90	1290.00	645.20	2.50%	89.9%
24	12	7.5	0.5	8.27	9.26	23.90		649.30		89.8%
25	12	10.5	1	14.56	9.69	23.50		545.10		82.0%
26	12	10.5	1	14.93	9.70	23.20	1079.00	540.20	2.10%	81.6%
27	12	10.5	1	14.87	9.53	23.60		547.40		81.6%