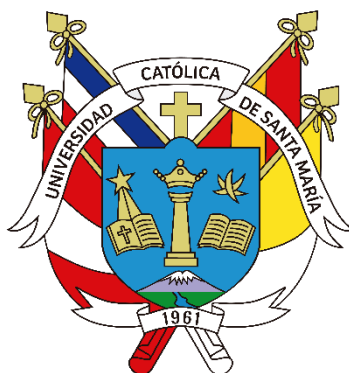


Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y
Biotechnológicas
Escuela profesional de Ingeniería Biotechnológica



**“REVISIÓN DE COAGULANTES/FLOCULANTES NATURALES
OBTENIDOS A PARTIR DE SEMILLAS DE *Moringa oleífera* Lam
(MORINGA) Y DEL MUCÍLAGO DE LA PENCA DE *Opuntia ficus-indica*
(TUNA) USADOS EN LA REMOCIÓN DE CROMO EN AGUAS
RESIDUALES DE CURTIEMBRE”**

Tesis presentada por el Bachiller:

Manrique Alarcón, Fernando Alfonso

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Biotechnólogo

Asesor:

Ing. Alvarado Quiroz, Keny Davi

Arequipa – Perú

2024

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA BIOTECNOLOGICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 30 de Agosto del 2023

Dictamen: 004187-C-EPIB-2023

Visto el borrador del expediente 004187, presentado por:

2005700121 - MANRIQUE ALARCON FERNANDO ALFONSO

Titulado:

REVISIÓN DE COAGULANTES/FLOCULANTES NATURALES OBTENIDOS A PARTIR DE SEMILLAS DE MORINGA OLEÍFERA LAM (MORINGA) Y DEL MUCÍLAGO DE LA PENCA DE OPUNTIA FICUS-INDICA (TUNA) USADOS EN LA REMOCIÓN DE CROMO EN AGUAS RESIDUALES DE CURTIEMBRE

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**29201360 - VILLANUEVA SALAS JOSE ANTONIO
DICTAMINADOR**



**29440909 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS
DICTAMINADOR**



**41404327 - BARREDA DEL CARPIO JAIME ERNESTO
DICTAMINADOR**



REVISIÓN DE COAGULANTES/FLOCULANTES NATURALES OBTENIDOS A PARTIR DE SEMILLAS DE Moringa oleífera Lam (MORINGA) Y DEL MUCÍLAGO DE LA PENCA DE Opuntia ficus- indica (TUNA) USADOS EN LA REMOCIÓN DE CROMO

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%	7%	2%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	ri.ues.edu.sv Fuente de Internet	2%
2	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	docplayer.es Fuente de Internet	1%
5	idoc.pub Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unasam.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
8	Submitted to Universidad Católica de Santa María	1%

DEDICATORIA

A Dios y a mi familia



RESUMEN

La presente tesis tuvo por finalidad realizar una revisión bibliográfica a partir de fuentes de datos multidisciplinarias, especializadas y acreditadas que proporcionen información teórica relevante, científica, fidedigna y que de manera resumida nos sirva para realizar una revisión de los coagulantes/floculantes naturales obtenidos a partir de semillas de *Moringa oleífera* Lam (Moringa) y del mucílago de la penca de *Opuntia ficus-indica* (Tuna/Nopal) usados en la remoción de cromo total, cromo (III) y cromo (VI) en aguas residuales de curtiembre.

Con el propósito de generar relevancia a la presente tesis, para que pueda ser una fuente confiable de búsqueda en futuras investigaciones se abordaron temas específicos concernientes a los mecanismos de coagulación - floculación que poseen tanto las semillas de *Moringa oleífera* Lam como el mucílago de *Opuntia ficus-indica*; asimismo, las características y generalidades que posee *Moringa oleífera* Lam y *Opuntia ficus-indica*, las experiencias nacionales e internacionales sobre el uso de los coagulantes y floculantes naturales, clasificación de los coagulantes y floculantes, los factores que influyen en la coagulación y floculación; características fisicoquímicas que poseen las aguas residuales de curtiembre, el efecto del cromo en aguas de curtiembre; por citar algunos contenidos desarrollados.

En definitiva, la presente tesis recopiló información de los coagulantes y floculantes naturales usados en la remoción de cromo en aguas residuales de curtiembre, así como también las ventajas y desventajas que poseen dichos coagulantes y floculantes naturales en comparación con los productos químicos frecuentemente usados en la industria de tratamiento de aguas como son las sales de aluminio y las sales férricas.

Palabras clave: *Moringa oleífera* Lam (Moringa), *Opuntia ficus-indica* (Tuna/Nopal), cromo.

ABSTRACT

The present thesis was to carry out a bibliographic review based on multidisciplinary, specialized data sources that provide relevant, scientific and reliable theoretical information and that, in the summarized way, will serve us to carry out a review of the natural coagulants/flocculants obtained from sedes of *Moringa oleífera Lam* (Moringa) seeds and *Opuntia ficus-indica* (Prickly Pear) mucilage used in the removal of total chromium, chromium (III) and chromium (VI) in tannery wastewater.

With the purpose of generating relevance to the present thesis, so that it can be a reliable source of search in future investigations, specific topics concerning the coagulation - flocculation mechanisms that both *Moringa oleífera Lam* seeds and *Opuntia ficus-indica* mucilage have; likewise, the characteristics and generalities that *Moringa oleífera Lam* and *Opuntia ficus-indica* have national and international experiences on the use of natural coagulants and flocculants, classification of coagulants and flocculants, factors that influence coagulation and flocculation; physical-chemical characteristics of tannery wastewater, the effect of chromium in tannery water; to cite some content developed.

Ultimately, the present thesis compiled information on the natural coagulants and flocculants used in the removal of chrome in tannery wastewater, as well as the advantages and disadvantages that these natural coagulants and flocculants have in comparison with the chemical products frequently used in the wastewater treatment industry waters such as aluminum salts and iron salts.

Keywords: *Moringa oleífera Lam* (Moringa), *Opuntia ficus-indica* (Tuna/Nopal), chromium.

ÍNDICE GENERAL

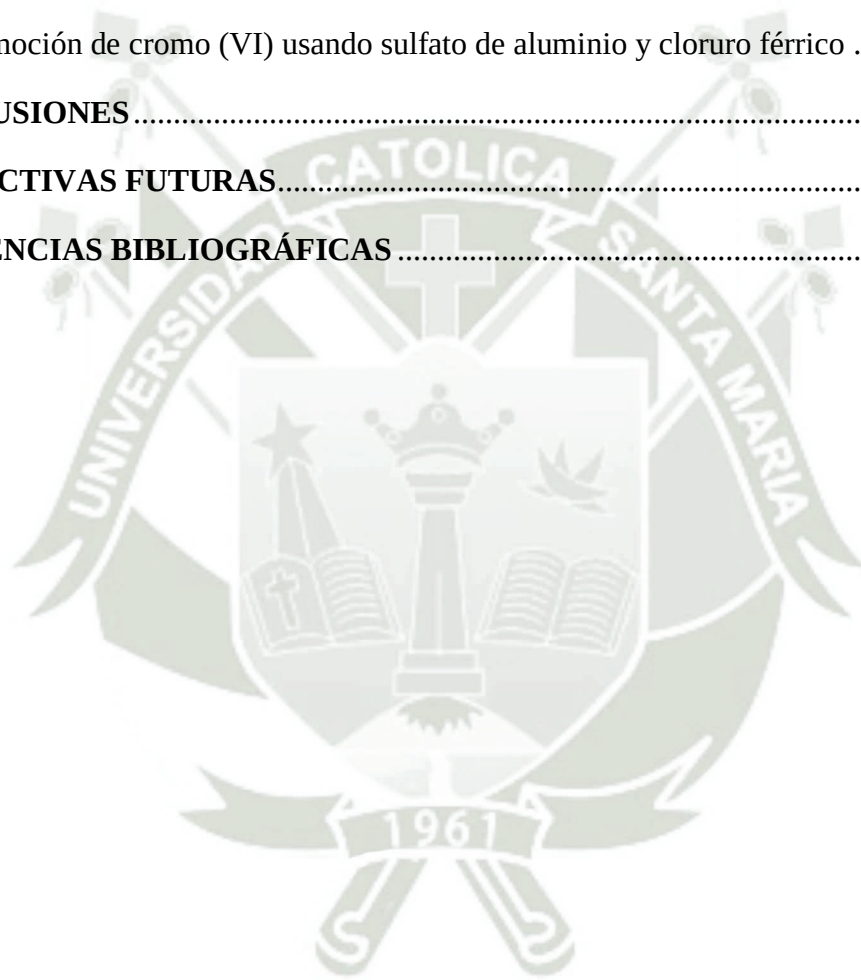
DEDICATORIA	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICO	3
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO TEÓRICO	4
1.1 Definición del problema	4
1.2 Justificación	5
1.2.1 Justificación tecnológica.....	5
1.2.2 Justificación ambiental	5
1.2.3 Justificación social.....	6
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1 Curtido de pieles.....	7
2.1.1 Definición	7
2.1.2 Procesos del curtido	7
2.1.2.1 Ribera.....	7
2.1.2.2 Curtido	10
2.1.2.3 Poscurtido	12
2.1.2.4 Acabado	14
2.1.3 Descargas líquidas generadas	16
2.1.4 Contaminantes químicos y orgánicos	18
2.1.5 Análisis de aguas residuales de curtiembre	20
2.1.5.1 Parámetros orgánicos.....	20

2.1.5.2 Parámetros físicos	20
2.1.5.3 Parámetros químicos.....	21
2.1.5.4 Parámetros biológicos.....	23
2.2 Legislación vigente para el sector curtiembre	25
2.3 Cromo	26
2.3.1 Definición	26
2.3.2 Características fisicoquímicas.....	26
2.3.3 Importancia del cromo	29
2.4 Cromo (III).....	29
2.4.1 Propiedades fisicoquímicas.....	30
2.4.2 Cromo (III) en el medioambiente	30
2.4.3 Cromo (III) y sus efectos en la salud	30
2.5 Cromo (VI)	31
2.5.1 Propiedades fisicoquímicas.....	31
2.5.2 Cromo (VI) en el medioambiente	32
2.5.3 Cromo (VI) y sus efectos en la salud.....	33
2.6 Moringa (<i>Moringa oleífera</i> Lam)	35
2.6.1 Origen	35
2.6.2 Descripción botánica.....	35
2.6.3 Taxonomía	36
2.6.4 Usos de <i>Moringa oleífera</i> Lam	37
2.6.5 <i>Moringa oleífera</i> Lam en el tratamiento de aguas	38
2.6.5.1 Experiencias internacionales del uso de semillas de <i>Moringa oleífera</i> Lam.	38
2.6.5.2 Experiencias nacionales del uso de semillas de <i>Moringa oleífera</i> Lam	39
2.6.6 Características coagulantes/floculantes de las semillas de <i>Moringa oleífera</i> Lam .	40
2.7 Tuna/Nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>).....	42
2.7.1 Origen	42

2.7.2 Descripción botánica.....	43
2.7.3 Taxonomía	44
2.7.4 Usos de <i>Opuntia ficus-indica</i>	45
2.7.5 <i>Opuntia ficus-indica</i> en el tratamiento de aguas	46
2.7.5.1 Experiencias internacionales del uso de mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i>	46
2.7.5.2 Experiencias nacionales del uso de mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i>	47
2.7.6 Características coagulantes/floculantes del mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i>	48
2.8 Coagulación	49
2.8.1 Definición	49
2.8.2 Características del proceso de coagulación	51
2.8.3 Mecanismos de coagulación	52
2.8.3.1 Compresión de la doble capa eléctrica.....	52
2.8.3.2 Adsorción y neutralización de cargas	53
2.8.3.3 Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado	54
2.8.3.4 Adsorción y puente	54
2.8.4 Tipos de coagulación	56
2.8.4.1 Coagulación por adsorción	56
2.8.4.2 Coagulación por barrido	56
2.8.5 Fases de la coagulación.....	57
2.8.6 Factores influyentes en la coagulación	58
2.8.6.1 pH.....	58
2.8.6.2 Temperatura	59
2.8.6.3 Dosis óptima de coagulante	59
2.8.6.4 Condiciones de mezclado	60
2.8.7 Tipos de coagulantes.....	61
2.8.7.1 Coagulantes naturales	61
2.8.7.2 Coagulantes químicos	64

2.9 Floculación	68
2.9.1 Definición	68
2.9.2 Características del proceso de floculación.....	69
2.9.3 Etapas de la floculación	69
2.9.4 Mecanismos de floculación	70
2.9.4.1 Floculación pericinética.....	71
2.9.4.2 Floculación ortocinética.....	71
2.9.4.3 Sedimentación diferencial.....	72
2.9.5 Factores que influyen en la floculación	72
2.9.5.1 Naturaleza del agua.....	72
2.9.5.2 Tiempo de floculación	72
2.9.5.3 Gradiente de velocidad	73
2.9.5.4 Variación del caudal	73
2.9.6 Tipos de floculantes.....	73
2.9.6.1 Floculantes inorgánicos	73
2.9.6.2 Floculantes orgánicos	73
2.9.6.2.1 Floculantes orgánicos naturales.....	73
2.9.6.2.2 Floculantes orgánicos sintéticos	75
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	76
3.1 Identificación del problema en estudio.....	76
3.2 Elección de base de datos	76
3.3 Selección de descriptores – Cadena de búsqueda.....	77
3.4 Criterios de búsqueda	77
3.4.1 Criterios de inclusión.....	77
3.4.2 Criterios de exclusión	77
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	78
4.1 Remoción de cromo total usando semillas de <i>Moringa oleífera</i> Lam	78

4.2 Remoción de cromo (VI) usando semillas de <i>Moringa oleífera</i> Lam	81
4.3 Remoción de cromo total usando mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i>	84
4.4 Remoción de cromo (III) usando mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i>	87
4.5 Remoción de cromo (VI) usando mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i>	88
4.6 Remoción de cromo total usando sulfato de aluminio	90
4.7 Remoción de cromo total usando cloruro férrico	93
4.8 Remoción de cromo (VI) usando sulfato de aluminio y cloruro férrico	96
CONCLUSIONES	98
PERSPECTIVAS FUTURAS	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación de contaminantes presentes en el proceso de ribera	16
Tabla 2. Relación de contaminantes presentes en el proceso de curtido	17
Tabla 3. Relación de contaminantes presentes en el proceso de poscurtido.....	17
Tabla 4. Relación de contaminantes presentes en el proceso de acabado	18
Tabla 5. Comparativa entre los LMP de efluentes de curtiembre y los VMA de aguas residuales no domésticas.....	23
Tabla 6. Propiedades y características fisicoquímicas del cromo.....	27
Tabla 7. Características de los diferentes estados de oxidación del cromo	28
Tabla 8. Comparativa entre cromo (III) y cromo (VI).....	34
Tabla 9. Clasificación taxonómica de <i>Moringa oleífera Lam</i>	36
Tabla 10. Clasificación taxonómica de <i>Opuntia ficus-indica</i>	45
Tabla 11. Eficacia de la semilla de <i>Moringa oleífera Lam</i> usada como coagulante/floculante en la remoción de cromo total en aguas de curtiembre a partir de tres casos de estudio	78
Tabla 12. Eficacia de la semilla de <i>Moringa oleífera Lam</i> usada como coagulante/floculante en la remoción de cromo (VI) en aguas de curtiembre a partir de dos casos de estudio.....	81
Tabla 13. Eficacia del mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> usado como coagulante/floculante en la remoción de cromo total en aguas de curtiembre a partir de tres casos de estudio	84
Tabla 14. Eficacia del mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> usado como coagulante/floculante en la remoción de cromo (III) en aguas de curtiembre a partir de un caso de estudio	87
Tabla 15. Eficacia del mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> usado como coagulante/floculante en la remoción de cromo (VI) en aguas de curtiembre a partir de un caso de estudio	88
Tabla 16. Eficacia del sulfato de aluminio usado como coagulante/floculante en la remoción de cromo total en aguas de curtiembre a partir de tres casos de estudio..	90
Tabla 17. Eficacia del cloruro férrico usado como coagulante/floculante en la remoción de cromo total en aguas de curtiembre a partir de cuatro casos de estudio.....	93

Tabla 18. Eficacia del sulfato de aluminio y cloruro férrico usados como coagulantes/floculantes en la remoción de cromo (VI) en aguas de curtiembre a partir de un caso de estudio..... 96



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de ribera	9
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de curtido	11
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de poscurtido.....	13
Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de acabado	15
Figura 5. Usos de <i>Moringa oleífera Lam</i>	38
Figura 6. Estructura química del ácido poligalacturónico	49
Figura 7. Proceso de coagulación	50
Figura 8. Esquematación del proceso de coagulación/floculación en aguas residuales...52	
Figura 9. Fuerzas de atracción y repulsión	53
Figura 10. Reestabilización de partículas	53
Figura 11. Mecanismo de atrapamiento de las partículas dentro de un floc	54
Figura 12. Representación esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de coloides mediante polímeros	55
Figura 13. Coagulación por adsorción.....	56
Figura 14. Coagulación por barrido.....	57
Figura 15. Fases de la coagulación.....	58
Figura 16. Zonas de coagulación.....	60
Figura 17. Representación del proceso de coagulación natural.....	62
Figura 18. Aglomeración de partículas coloides usando un floculante	70
Figura 19. Mecanismo de floculación	74
Figura 20. Comparativa de tres casos de estudio en la determinación de la eficacia de remoción de cromo total usando semillas de <i>Moringa oleífera Lam</i>	80
Figura 21. Comparativa de dos casos de estudio en la determinación de la eficacia de remoción de cromo (VI) usando semillas de <i>Moringa oleífera Lam</i>	82
Figura 22. Comparativa de tres casos de estudio en la determinación de la eficacia de remoción de cromo total usando mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i>	86

Figura 23. Comparativa de tres casos de estudio en la determinación de la eficacia de remoción de cromo total usando sulfato de aluminio	92
Figura 24. Comparativa de cuatro casos de estudio en la determinación de la eficacia de remoción de cromo total usando cloruro férrico.....	95
Figura 25. Comparativa de un caso de estudio en la determinación de la eficacia de remoción de cromo (VI) usando sulfato de aluminio y cloruro férrico	97



LISTA DE ABREVIATURAS

DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO₅	Demanda Biológica de Oxígeno
LMP	Límites Máximos Permisibles
MINAM	Ministerio del Ambiente
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego
PRODUCE	Ministerio de Producción
D.S	Decreto Supremo
R.M	Resolución Ministerial
D.L	Decreto Legislativo
ECA	Estándares de Calidad
VMA	Valores Máximos Permisibles
DAA	Declaración de Adecuación Ambiental
PAMA	Programa de Adecuación y Manejo Ambiental
OMS	Organización Mundial de la Salud
RPM	Revoluciones por Minuto

INTRODUCCIÓN

La industria de la curtiembre durante todo el proceso para obtener cuero genera impactos negativos al medioambiente, dentro ellos se encuentran los efluentes líquidos producidos, los cuales se caracterizan por contener grandes cantidades de partículas en suspensión, una fuerte coloración, además de estar compuestos por restos de cromo, materia orgánica (pelos, excretas, piel, restos de carne, etc.), detergentes, soda cáustica, entre otros; que en su mayoría son descargados sin previo tratamiento a ríos y/o alcantarillado público, lo que convierte a dicha industria en una de las más contaminantes del mundo ^{1,3}.

Todo el proceso requiere de mano de obra capacitada que trabaje para dicha transformación de las pieles, por lo cual se generan varios puestos de empleo como un aspecto positivo de la citada industria; en contraparte, se produce una alta contaminación ambiental, generando un impacto negativo sobre el suelo, aire y agua de la localidad en donde se instalan las mencionadas industrias, debido a que es una importante fuente de contaminación por metales pesados en el medioambiente, los cuales pueden llegar a ser no biodegradables, acumulables y persistentes ^{2,5}.

Además, una parte importante de los productos químicos que son usados en el procesamiento del cuero no se absorben, por el contrario, son descargados al medioambiente, razón por la cual la industria de la curtiembre se ha convertido en una seria amenaza para el ecosistema y la salud pública ⁴.

El proceso de curtido por lo general comprende cuatro etapas: *ribera*, *curtido*, *poscurtido* y *acabado* ¹⁶.

- En la etapa de ribera la piel es sometida a sucesivos procesos de remojo y lavado que permiten la remoción de impurezas propias de la piel del ganado, como tierra, sangre y estiércol; además de rehidratar las pieles, que en su gran mayoría son conservadas con sal ¹⁶.
- En la etapa de curtido las pieles son convertidas en cuero; para ello previamente deben ser liberadas de pelos, grasas y carnes; dichas pieles son tratadas con reactivos que enlazan las fibras de colágeno para formar un material estable y duradero ^{6,17}.
- En la etapa de poscurtido el cuero es nuevamente tratado con agentes de curtido para dar al producto la calidad deseada ¹⁶.

- Finalmente, en la etapa de acabado se realizan las operaciones necesarias para otorgar al cuero las propiedades de tersura y color, así como otras características deseadas en el producto final ^{7,18}.

El uso de sales de cromo (III) en el curtido de pieles es el procedimiento más común en dicha industria, dado que se obtienen productos de mejor calidad, mayor resistencia al calor, productos más uniformes y reducción del tiempo de curtido ^{8,19}.

El cromo (III), el cual es usado en las etapas de curtido y poscurtido, permite convertir la piel en cuero, impidiendo su degradación; generalmente es vertido de forma soluble hacia efluentes líquidos, dicho vertido incluso a bajas concentraciones tiene efectos negativos en la cadena alimenticia de los peces (inhibiendo la fotosíntesis); además, cuando se libera en la naturaleza bajo ciertas condiciones se puede oxidar a cromo (VI), el cual es la forma del elemento cromo más dañina para el ser humano, incluso en bajas concentraciones ^{5,9,18}.

Las aguas residuales generadas por esta industria pueden contener concentraciones de cromo (VI) y si son vertidos directamente al agua pueden afectar significativamente al medioambiente, en especial al ecosistema acuático; pero dicho compuesto no solamente va a afectar al agua, sino que también es altamente nocivo a la salud humana, dado que es un agente potencialmente cancerígeno ¹⁰⁻¹³.

De lo expuesto anteriormente se deduce que la industria de la curtiembre implica grandes problemas de contaminación; actualmente se está tomando conciencia del daño que se genera al medioambiente y se está en la búsqueda de nuevas tecnologías que tengan la finalidad de proteger el entorno de dicha industria para revertir los daños. Los impactos medioambientales de la industria del curtido son tan considerables como los de las industrias mineras y petroleras. La variedad de contaminantes como se mencionó en un principio es muy amplia, van desde metales pesados (como el cromo, y en algunos casos aluminio y titanio), sólidos en suspensión, sales inorgánicas, sulfuros, hasta gran cantidad de materia putrescible. Esto hace que los efluentes de la industria curtiembre sean difíciles de purificar y por lo general arrastren un volumen considerable de lodos ¹⁴.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proporcionar información relevante, científica y de manera resumida sobre investigaciones realizadas en torno a una “Revisión de coagulantes/floculantes naturales obtenidos a partir de semillas de *Moringa oleífera* Lam (Moringa) y del mucílago de la penca de *Opuntia ficus-indica* (Tuna) usados en la remoción de cromo en aguas residuales de curtiembre ” para que sirva como una guía teórica a tener en cuenta para futuros proyectos académicos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dar a conocer mediante la revisión de literatura aspectos teóricos relevantes sobre los mecanismos de remoción de cromo entre dos de los coagulantes de origen vegetal más conocidos por la comunidad científica (Moringa y Tuna).
- Determinar y comparar la eficacia de remoción de cromo total, cromo (III) y cromo (VI) que presentan tanto las semillas de *Moringa oleífera* Lam y el mucílago de *Opuntia ficus-indica*, así como también el sulfato de aluminio y cloruro férrico usados para el tratamiento de aguas residuales de curtiembre, mediante el análisis de resultados obtenidos a partir de casos de estudio experimentales conseguidos a través de la revisión de la literatura realizada.
- Describir aspectos comunes que poseen *Moringa oleífera* Lam (Moringa) y *Opuntia ficus-indica* (Tuna) en el tratamiento de aguas residuales.
- Darle valor agregado e importancia, a través de la información obtenida, a dos subproductos agrícolas, tales como las semillas de Moringa y pencas de Tuna.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO TEÓRICO

1.1 Definición del problema

La industria del curtido de pieles se caracteriza por la producción de aguas residuales que por lo general son vertidas sin previo tratamiento hacia el alcantarillado público o alrededores, dichas aguas ciertas veces pueden contener cromo (VI), el cual se caracteriza por ser tóxico, acumulable y no biodegradable, razón por la cual se convierte en un peligro a la salud y medioambiente ^{10,13}.

En el mercado de tratamiento de aguas residuales existen muchos coagulantes químicos o inorgánicos convencionales, pero los más usados y conocidos son sin duda las sales de aluminio y las sales férricas. En general, las sales de aluminio y las sales férricas permiten remover sustancias inorgánicas disueltas en aguas residuales. Además, en muchos casos, estos elementos producen un incremento de sulfatos o cloruros y un descenso del pH, lo cual resulta de fundamental importancia no solo porque controlan la eficiencia de la coagulación, sino también por la necesidad de disposición adecuada de los residuos o lodos como producto de la floculación ^{102,120}.

Diversos estudios e investigaciones sugieren que algunos coagulantes químicos poseen algunos efectos secundarios ambientales tales como: formación excesiva de lodos y modificación de las cargas iónicas de las aguas tratadas ^{100,101}.

Como alternativa a estos agentes químicos, al inicio de los años setenta, en varios países latinoamericanos se propuso utilizar coagulantes naturales extraídos de especies vegetales, dentro de dichas especies se encuentran dos que poseen características similares a los coagulantes químicos en cuanto a efectividad, los cuales son las semillas de *Moringa oleífera* Lam y el mucílago de penca de *Opuntia ficus-indica* ^{79,98,149}.

Por lo anteriormente enunciado, se concluye que los coagulantes químicos más usados en los tratamientos de aguas residuales pueden presentar inconvenientes al medioambiente; razón por la cual se recomienda generar alternativas que no sean invasivas al ambiente o a la salud, ni que altere el producto final; dentro de estas alternativas tenemos a los coagulantes naturales ^{79,98}.

1.2 Justificación

La presente tesis pretende crear un marco de referencia mediante la recolección de información para realizar un análisis comparativo sobre la capacidad coagulante /floculante en la remoción de cromo total, cromo III y cromo VI, que poseen dos prometedores subproductos agrícolas como son las semillas de *Moringa oleífera Lam* y el mucílago de *Opuntia ficus-indica* en la búsqueda de una alternativa amigable para el tratamiento de aguas de curtiembre en el marco de una biotecnología ambiental.

Las justificaciones propuestas son las siguientes:

1.2.1 Justificación tecnológica

Se propone implementar una investigación que abarque el estudio de técnicas que sean eficientes (comparables con los coagulantes químicos usados), seguras (que no alteren las propiedades del agua tratada ni genere problemas en la salud) y relativamente económicas (que sean accesibles en materia económica). El empleo de materiales naturales puede minimizar o evitar la importación de los coagulantes químicos, lo que busca esta tesis es crear una alternativa para potenciar y darle un valor agregado a subproductos que en su mayoría son desechados o no aprovechados ^{79,98}.

1.2.2 Justificación ambiental

Es conocido que la industria del curtido de pieles genera grandes impactos negativos al medioambiente, esto aunado a que muchos de los insumos usados en dicha práctica son arrojados directamente al alcantarillado público, provocando cambios en la naturaleza del agua; esta tesis propone la implementación de una tecnología amigable con el medioambiente, usando materia prima de fácil accesibilidad y bajo costo; teniendo el objetivo de reducir, mitigar o minimizar dichos impactos ambientales negativos que genera la mencionada industria; además de darle un valor agregado a productos naturales como la penca de Tuna o las semillas de Moringa, usados por lo general como cercos perimétricos de invasiones y comida para el ganado en general respectivamente ^{10,79}.

1.2.3 Justificación social

Las industrias curtidoras en su mayoría se encuentran alejadas de las ciudades, razón por la cual sus impactos ambientales no son muy tomados en cuenta por la mayoría de la población, dado que no los afecta de manera directa; pero que en contraposición sí afecta directamente la salud de la población cercana. Lo que se busca con esta tesis es encontrar una alternativa viable que permita reducir el impacto medioambiental negativo que producen dichas industrias y que se ve reflejado en la salud de la población afectada, además de dar la posibilidad de generar empresa y empleo a nivel local a partir de una tecnología segura, de bajo costo y de fácil accesibilidad a la población directamente involucrada ^{2,5}.



CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Curtido de pieles

2.1.1 Definición

El curtido de pieles es el proceso de transformación de la piel de un animal en cuero; el cual subsecuentemente será usado como ropa, accesorios de vestir o zapatos, por citar algunos ejemplos, y que tendrá características únicas tales como brillo, resistencia, color, dureza, suavidad u otras especificaciones para las cuales hayan sido fabricados. El curtido varía de acuerdo al producto final deseado y a la planta que ejecuta el proceso; para obtener un producto de calidad influye la piel, específicamente su origen, el tipo de especie, la estación del año, la edad, el sexo, el tipo de crianza y a qué tipo de faenado ha sido expuesto el animal ^{15,18}.

Por lo general, el curtido de pieles consta de cuatro procesos:

- Ribera ¹⁸.
- Curtido ¹⁸.
- Poscurtido ¹⁸.
- Acabado ¹⁸.

En los dos primeros procesos se van a generar volumen y carga del contaminante hacia los efluentes, mientras que en los dos posteriores procesos se va a producir residuos sólidos y emisiones de solventes ¹⁶.

2.1.2 Procesos del curtido

2.1.2.1 Ribera.

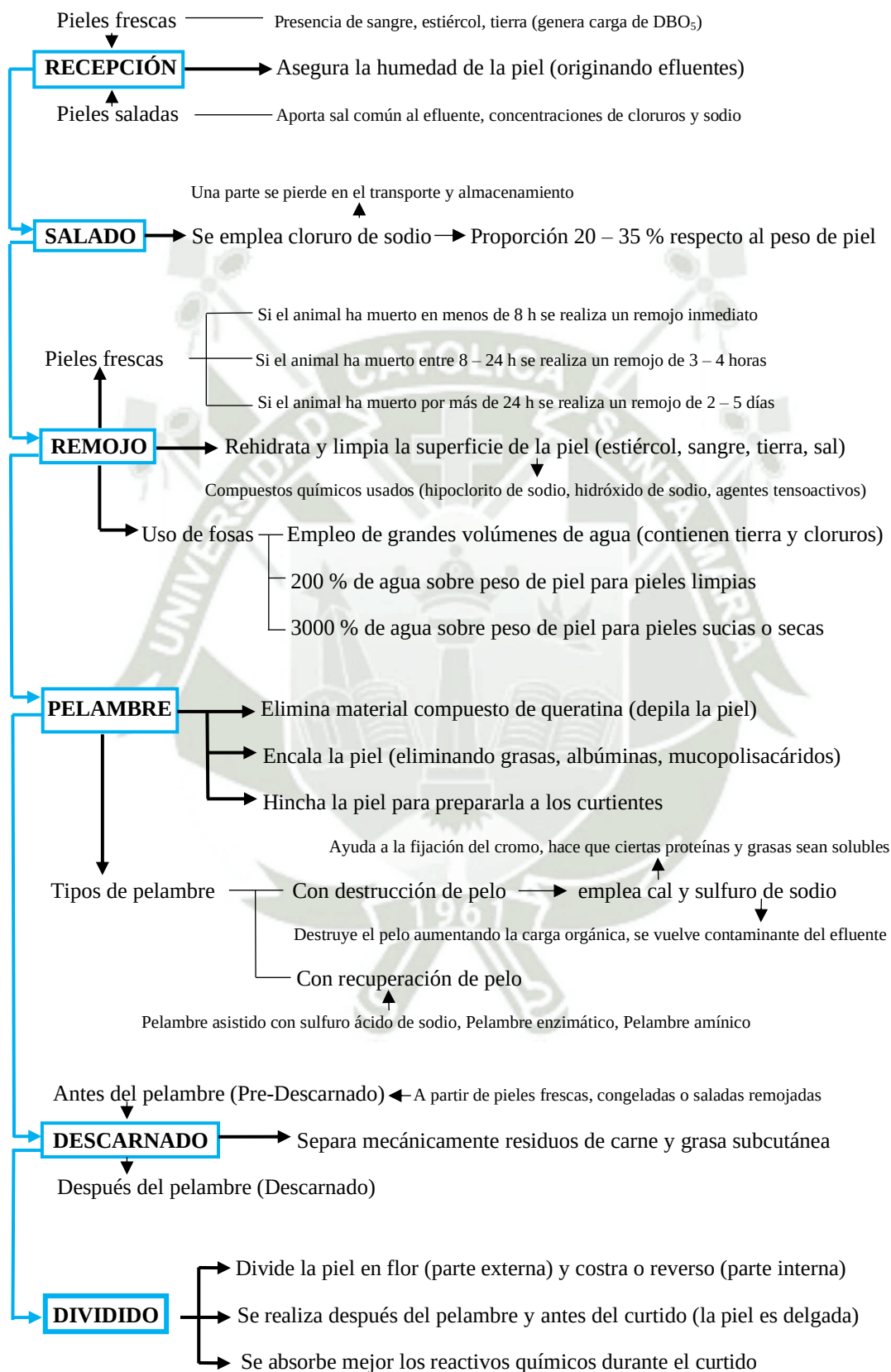
Este proceso tiene como objetivo principal acondicionar la piel para el subsiguiente proceso de curtido, asegurando su humedad (etapa en donde hay mayor cantidad de consumo de agua, se calcula que aproximadamente el 50 % del total de agua será usada en este proceso) y limpieza (se elimina impurezas de la piel como el pelo) ^{16,17}.

El proceso de ribera comprende las siguientes etapas:

- a) **Recepción y almacenamiento de pieles.** Dependiendo del estado de llegada de las pieles, estas pueden ser: *pieles frescas*, las cuales contienen restos de sangre, estiércol, tierra; *pieles frescas saladas*, pieles que fueron saladas en fresco y *pieles secas saladas*, las cuales llegan a esta condición por el cloruro de sodio que se le agrega ^{16,17}.

- b) Salado de pieles.** Esta etapa aplica solamente para las pieles frescas que aún no han sido tratadas y que están en estado de espera; para ello se agrega sal común, parte de dicha sal se pierde en el transporte de la piel o en su almacenamiento, mientras que la otra parte penetra dicha piel; el aproximado total de cantidad usada de sal varía entre 20 – 35 % respecto al peso de la piel a salar ¹⁶.
- c) Remojo de pieles.** Etapa que tiene por objetivo el remojo y lavado de las pieles que previamente fueron saladas, para ello se emplean grandes volúmenes de agua que son aprovechadas para rehidratar dichas pieles y lograr la disolución de las sales anteriormente añadidas, además de quitarles impurezas tales como tierra, sangre y estiércol ^{16,17}.
- d) Pelambre.** Etapa por la cual se elimina todo material que posea queratina (pelo, raíces de pelo y epidermis), para lograrlo se usa por lo general sulfuro de sodio y un álcali (comúnmente se utiliza cal apagada); además se genera el hinchamiento de la piel, lo que va a provocar el desdoblamiento de las fibras de la piel en fibrillas lo que facilitará a futuro la unión de los curtientes a usar. El pelambre depende de la temperatura, dado que a una temperatura que no exceda los 30 °C se van a obtener mejores resultados, si se sobrepasa dicho límite se puede dañar la parte externa de la piel ^{16,17}.
- e) Descarnado.** Es una etapa realizada de manera mecánica mediante el uso de maquinarias especializadas, las cuales tienen por objetivo retirar y separar los residuos de carne y grasa subcutánea de la piel para obtener un producto liso; esta operación se puede realizar antes o después del pelambre ^{16,17}.
- f) Dividido.** Última etapa del proceso de ribera, es en donde se van a obtener la división de la piel en parte externa (también llamada “Flor”) y parte interna (también denominada “Costra”). No todas las pieles van a ser divididas, esto varía según el uso que se les dé ^{16,17}.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de ribera ¹⁵⁻¹⁹.



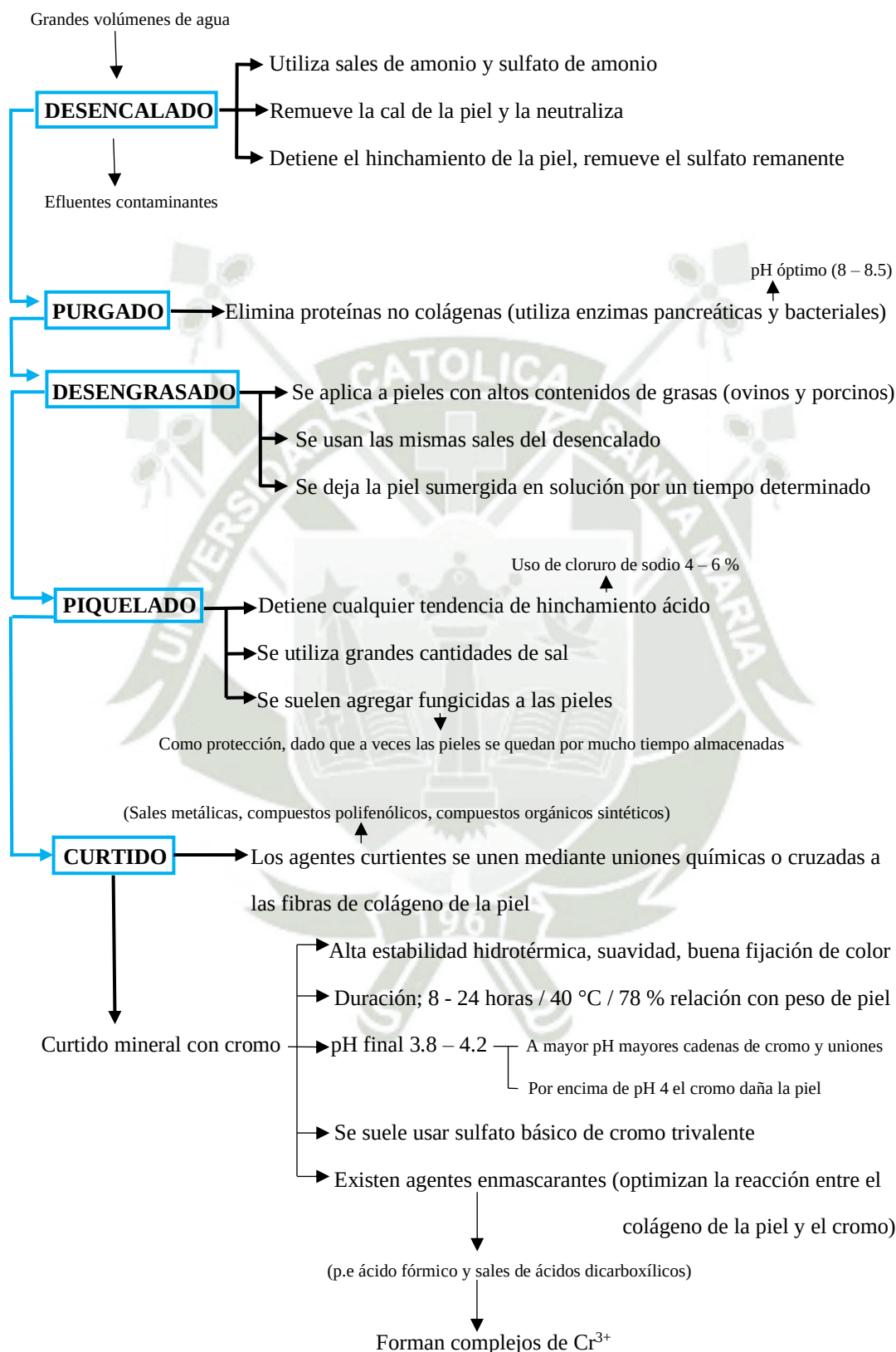
2.1.2.2 Curtido.

Proceso por el cual se estabiliza el colágeno de la piel para que agentes curtientes minerales (en su mayoría sales de cromo) o vegetales conviertan dicha piel en cuero, la cual además debe ser previamente escurrida para eliminar la humedad sobrante que posea ^{17,18}.

El proceso de curtido consta de las etapas siguientes:

- a) **Desencalado.** Etapa en donde se remueve la cal y el sulfuro de la piel (para no afectar el proceso de curtido) usando reactivos químicos como sales de amonio (compuesto más usado), bisulfito de sodio, azúcares y melazas ¹⁶⁻¹⁸.
- b) **Purgado.** Etapa complementaria de eliminación de restos de proteínas no colágenas (raíces de pelo y remanentes de la piel) mediante el uso de enzimas pancreáticas o bacteriales para lograr que la piel solamente contenga proteínas colágenas ^{16,17}.
- c) **Desengrasado.** Etapa que tiene como finalidad remover las grasas remanentes que quedan en la piel, dado que estas reaccionan con el cromo y se forman jabones insolubles; para lograr dicho objetivo se utilizan grandes volúmenes de agua (generando efluentes con materia orgánica y detergentes) y solventes como clorobenceno y percloroetileno ¹⁶⁻¹⁸.
- d) **Piquelado.** Etapa que tiene como meta llevar la piel a un pH adecuado para que se encuentre lista para el curtido (pH final entre 2.8 – 3.5) usando por lo general cloruro de sodio y ácido sulfúrico, los cuales permiten la difusión del curtiente en el interior de la piel mediante el aporte de protones que se unen al grupo carboxílico ^{16,18}.
- e) **Curtido.** Etapa mediante la cual la piel se convierte en un material no putrescible usando agentes curtientes que permiten estabilizar el colágeno de la piel convirtiéndola en cuero, por lo general se usan sales de cromo (muy contaminantes) siendo la duración de dicha operación entre 8 – 24 horas. Mientras que para basificar la reacción se utilizan sales como óxido de magnesio ^{16,18}.

Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de curtido ¹⁵⁻¹⁹.

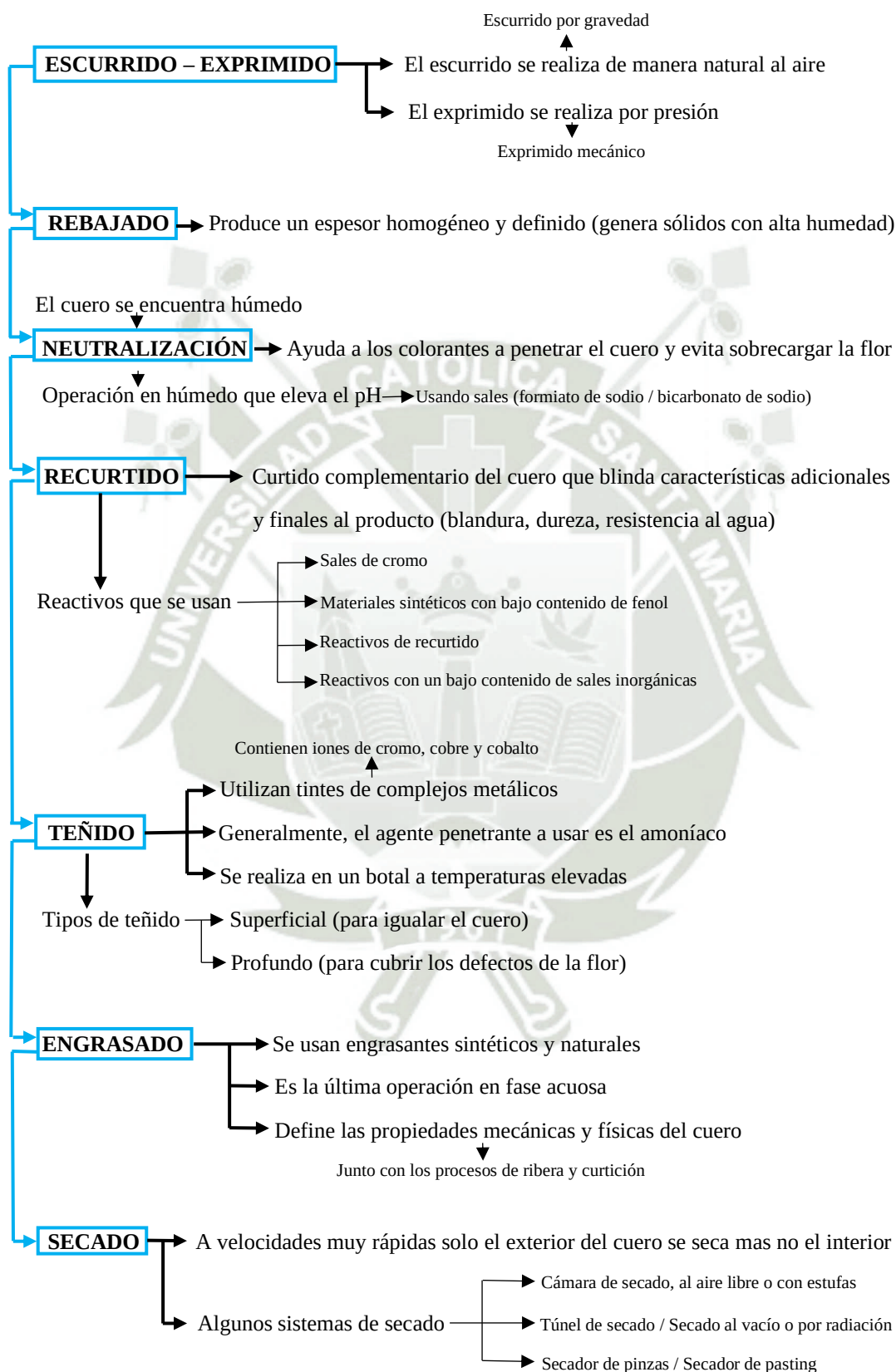


2.1.2.3 Poscurtido.

Proceso posterior del curtido, en donde se van a implementar etapas adicionales al cuero saliente como las siguientes:

- a) **Escurrido y exprimido.** Etapas que tienen como finalidad quitar la humedad del cuero de manera mecánica, se genera un efluente altamente contaminante con presencia de cromo en solución ácida ^{16,17}.
- b) **Raspado.** Se realiza la regulación mecánica del cuero obtenido, a causa de ello se generan virutas con alto contenido de cromo (III), etapa en donde se produce la mayor cantidad de residuos sólidos con elevado contenido de humedad ^{16,17}.
- c) **Neutralización.** Se va a elevar el pH ácido del cuero mediante la adición de sales; para facilitar la penetración continua de los colorantes en el cuero y además uniformizar el pH de las diferentes pieles que provienen de distintas curticiones ^{16,17}.
- d) **Recurtido.** Etapa en donde se va a tratar el cuero curtido con productos químicos adicionales para darles características extras o eliminar imperfecciones que pudiera haber ^{16,17}.
- e) **Teñido.** En esta etapa se va a proporcionar al cuero una coloración propia, además se va a generar un valor agregado a dicho producto, dado que se incrementará su valimiento. El teñido del cuero se realiza usando agentes químicos como la anilina a una temperatura elevada; por lo general se realiza en el mismo baño del recurtido ^{16,17}.
- f) **Engrasado.** Tiene como propósito evitar que el cuero se cuartee y tenga una mayor suavidad, incorporando sustancias grasas (aceites emulsionados) en los espacios entre las fibras. En esta etapa se puede distinguir tres tipos de engrasados: engrasado sencillo, engrasado a mano y engrasado en tinas ¹⁶⁻¹⁸.
- g) **Secado.** Se puede realizar el secado de cuero al aire libre o de manera forzada aplicando calor, cada una va a variar en su procedimiento, mientras que en el secado al aire no se va a utilizar energía y el cuero no tendrá un secado uniforme, para el caso del secado forzado se requerirá de energía para dicho proceso y el cuero tendrá un secado más parejo ¹⁶⁻¹⁸.

Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de poscurtido ¹⁵⁻¹⁹.



2.1.2.4 Acabado.

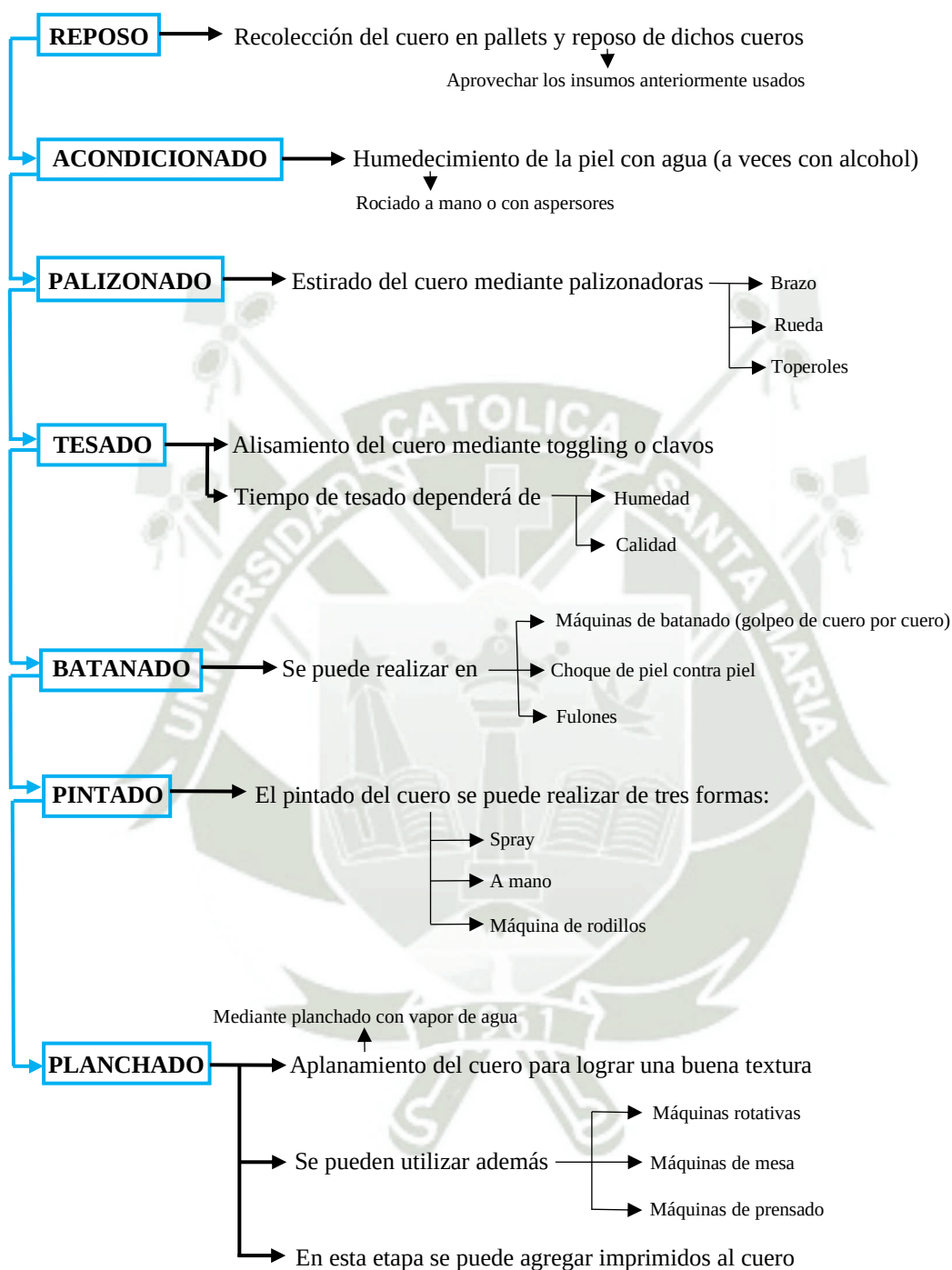
En el proceso de acabado se confiere al cuero características específicas que ha de poseer, tales como brillo, color y resistencia, por citar algunas de ellas; además es crucial que la piel descansa algunas horas o todo el día para que el cromo sea bien fijado al cuero, una vez pasado dicho tiempo se debe secar el cuero para eliminar el exceso de agua, dado que se pueden formar algunas características indeseables como arrugas ¹⁹.

En general, la etapa de acabado frecuentemente varía según los requerimientos del mercado, por lo que dependerán de cada curtiembre en específico ¹⁷.

Entre las etapas que posee dicho proceso tenemos las siguientes:

- a) **Reposo.** Una vez retirado el cuero del botal se queda en reposo para que los insumos anteriormente utilizados sean aprovechados al máximo ¹⁷.
- b) **Acondicionado.** Etapa que consiste en rehidratar la piel para que se encuentre lista a sucesivas operaciones mecánicas que pudiese tener ¹⁶.
- c) **Palizonado.** Estirado mecánico de la piel por un lapso corto de tiempo de alrededor 2 - 3 segundos ¹⁶.
- d) **Tesado.** Consiste en alisar la piel mediante su estiramiento usando por lo general clavos ¹⁶.
- e) **Batanado.** También llamado mollizado, es el sucesivo golpeo a la piel para que tenga soltura o mejor caída, generalmente son para cueros que serán usados como vestimenta ¹⁶.
- f) **Pintado.** Etapa por la cual el cuero va a tomar un color definitivo según el gusto del cliente, para ello se utiliza lacas, resinas o pinturas; dichos productos químicos alteran los efluentes generados, pero no en mayor comparación con los procesos de pelambre o curtido ^{16,17}.
- g) **Planchado.** Aplicación de calor sobre una superficie metálica para alisar el cuero y uniformizarlo, dándole una apariencia más agradable al producto ¹⁷.

Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de acabado ¹⁵⁻¹⁹.



2.1.3 Descargas líquidas generadas

Como se ha explicado anteriormente, todo el proceso de curtido produce efluentes líquidos contaminantes, los cuales por lo general no son tratados previamente antes de su descarga y son arrojados al alcantarillado o ambiente, provocando su respectiva contaminación ¹⁶⁻¹⁹.

La mayoría de los procesos de curtiembre se realizan en medio acuoso, el volumen de agua que se consume durante todo el proceso desde ribera hasta el acabado oscila entre 15 – 40 m³/tonelada de piel fresca, la composición de las descargas líquidas generadas varían de acuerdo a la curtiembre en donde se realice, sin embargo, hay elementos comunes tales como materia en suspensión, productos químicos, sustancias tóxicas, además del color oscuro y olor desagradable (Tabla 1, 2, 3 y 4) ^{19,33}.

Tabla 1. Relación de contaminantes presentes en el proceso de ribera ¹⁶⁻¹⁹.

Proceso	Etapas	Contaminante químico	Contaminante orgánico
Ribera	Recepción	Cloruro de sodio	Materia orgánica (sangre, pelos, heces, tierra)
	Salado	Cloruro de sodio	No genera
	Remojo	Detergentes, desinfectantes, bactericidas, cloruro de sodio	Materia orgánica (sangre, pelos, heces, grasas, tierra)
	Pelambre	Sulfuro, cal	Sólidos suspendidos, sebo, lodo, pelos
	Descarnado	No genera	Retazos de piel, carnazas
	Dividido	No genera	Carnazas

Tabla 2. Relación de contaminantes presentes en el proceso de curtido ¹⁶⁻¹⁹.

Proceso	Etapas	Contaminante químico	Contaminante orgánico
Curtido	Desencalado	Cal, sulfuro, cloruros, aguas amoniacales	Materia orgánica (pelos)
	Purgado	Sulfuro, cloruros	Materia orgánica (pelos)
	Desengrasado	Solventes, detergentes, agentes tensoactivos	Materia orgánica
	Piquelado	Cloruros, fungicidas	No genera
	Curtido	Sales de cromo	Materia orgánica (pelos, lodos)

Tabla 3. Relación de contaminantes presentes en el proceso de poscurtido ¹⁶⁻¹⁹.

Proceso	Etapas	Contaminante químico	Contaminante orgánico
Poscurtido	Escurrecido y exprimido	Cromo en solución ácida	No genera
	Raspado	Cromo	Virutas
	Neutralizado	Sales disueltas	No genera
	Recurtido	Sales de cromo, cloruros	No genera
	Teñido	Tintes, anilina	No genera
	Engrasado	Engrasantes emulsionados	Sebo

Tabla 4. Relación de contaminantes presentes en el proceso de acabado ¹⁶⁻¹⁹.

Proceso	Etapas	Contaminante químico	Contaminante orgánico
Acabado	Reposo		
	Acondicionado		
	Palizonado	No genera	No genera
	Tesado		
	Batanado		
		Colorantes	
	Pintado	Colorantes sintéticos (lacas, pintura, resina)	No genera
	Planchado	No genera	No genera

2.1.4 Contaminantes químicos y orgánicos

Los contaminantes químicos más comunes y en mayor proporción que se encuentran en los efluentes líquidos generados son sulfuro, cal, cloruros, agentes tensoactivos, nitrógeno amoniacal y cromo; mientras que la materia orgánica constituida por pelos, grasas, elementos adheridos a la piel y constituyentes naturales de la piel son los contaminantes mayoritarios para el caso de los contaminantes orgánicos ¹⁶⁻¹⁹.

Tanto los contaminantes químicos como orgánicos modifican o alteran las características y propiedades del agua; para el caso de los contaminantes químicos se produce lo siguiente:

- **Sulfuro.** Anión de carácter reductor que provoca la disminución de oxígeno disuelto en el agua; es usado para realizar la destrucción de los pelos de la piel en la etapa de pelambre, su empleo conlleva el aumento de la carga orgánica de los efluentes líquidos generados, convirtiendo a dicho anión en altamente tóxico para la fauna acuática, así como también muy problemático para los materiales en general, dado que se caracteriza por ser corrosivo para tuberías, herramientas y materiales hechos de metal ²⁹.
- **Cal.** Generalmente, se emplea cal apagada (hidróxido de calcio), la cual va a aumentar la carga orgánica de los efluentes, se utilizan grandes cantidades de este compuesto, el cual es poco soluble, lo que va a generar el incremento de sólidos suspendidos; además de alterar el pH del agua generada. Es el único material usado en las mayorías de

curtiembres que produce sólidos en suspensión bajo condiciones en donde la mayoría de las materias en suspensión proceden de las pieles ^{30,31}.

- **Cloruros.** Dentro de los cloruros que son utilizados en el curtido de pieles es el cloruro de sodio el más requerido; es un reactivo empleado como deshidratante y biocida en el salado de las pieles, dado que evita la putrefacción, es muy difícil de separar cuando se encuentra dentro del efluente líquido, debido a su alta solubilidad en el agua lo que lo convierte en un efluente básico inorgánico extremadamente difícil de remover ¹⁶.
- **pH.** Los efluentes líquidos originados en la etapa de pelambre van a tener un alto valor de pH (11 – 12) esto quiere decir que las aguas van a ser altamente alcalinas, razón por la cual deberán de ser neutralizadas antes de ser descargadas ¹⁶.
- **Agentes tensoactivos.** Productos como humectantes y agentes de limpieza que al actuar sobre el cuero se van a convertir en parámetros indicativos del aumento de la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) en el efluente, además de aumentar su toxicidad ^{16,31}.
- **Nitrógeno amoniacal.** Compuesto químico tóxico para el sistema acuático, puesto que provoca el crecimiento desmedido de algas y para el ser humano, dado que daña las mucosas que recubren a los pulmones ¹⁷.
- **Cromo.** Cuando los efluentes poseen altas concentraciones de cromo (III) se van a caracterizar por ser tóxicos al medioambiente, por lo general las aguas subterráneas son las más afectadas por dicha característica, puesto que la autodepuración del cromo (III) es muy lenta ¹⁷.

Por otro lado, si se tiene al cromo (VI) como agente contaminante, se va a generar lo siguiente:

- a) Efectos tóxicos crónicos hacia las aguas en donde se depositen y hacia las especies marinas que las habiten ¹⁷.
- b) Efectos clínicos que van desde asma, bronquitis hasta cáncer para el caso de contacto prolongado con personas ³².
- c) Daño a las cosechas, dado que los vegetales almacenan dicho metal en el interior de sus frutos ³³.

Dentro los contaminantes orgánicos que mayormente poseen los efluentes líquidos tenemos:

- **Pelos.** Compuesto biológico y químicamente estable constituido por queratina, tanto el pelo como sus raíces capilares son destruidos en el proceso de curtido por el sulfuro, acción que va a generar sólidos suspendidos y a su vez, aumentar la carga de DBO₅ del efluente ^{16,31}.

- **Grasas.** Sustancias orgánicas que son inherentes a la piel del ganado, las cuales se encuentran en forma de tejido adiposo pegado a la carne del cuero. En el proceso de pelambre se saponifican parcialmente en medio alcalino ^{30,31}.
- **Elementos adheridos a la piel.** La piel del ganado trae consigo algunos componentes unidos a ella en su cara exterior, en su mayoría se trata de tierra, sangre y guano, los cuales van a generar DBO₅ y sólidos suspendidos ³¹.
- **Constituyentes naturales de la piel.** Componentes diferentes al colágeno que van a aumentar la carga orgánica del efluente, podemos citar a las proteínas y grasas como ejemplos. En el caso de las proteínas reaccionan con el cromo, volviéndose compuestos insolubles, los cuales son eliminados del proceso mediante su solubilización en medio acuoso, lo que va a generar el aumento de DBO₅ ^{16,31}.

2.1.5 Análisis de aguas residuales de curtiembre

Las aguas residuales provenientes de la industria del curtido deben ser sometidas a un riguroso análisis y control de parámetros orgánicos, físicos, químicos y biológicos que sean medibles para determinar las características de sus efluentes, dentro de dichos parámetros tenemos:

2.1.5.1 Parámetros orgánicos.

- Aceites y grasas.** Vienen a ser cualquier material recuperado en la forma de una sustancia soluble en el solvente, los cuales además son de difícil metabolización por bacterias. Por lo general, sus efectos negativos son la falta de estética que van a generar, dado que son visibles fácilmente, además de permanecer por mucho tiempo en el agua debido a su insolubilidad elevada ³⁴. El LMP para dicho parámetro es de 20 mg/L ²⁷.

2.1.5.2 Parámetros físicos.

- Temperatura.** Parámetro de la calidad del agua, además de ser un factor importante para las reacciones químicas, velocidades de reacción y vida acuática que se desarrollan dentro de ella; siendo el LMP de 35 °C en efluentes provenientes de curtiembre para alcantarillado ^{27,34}.
- Olor.** En su forma pura, el agua no posee olor, más bien se puede caracterizar de manera subjetiva para describir su procedencia, calidad o estado ³⁴.
- Color.** El agua no posee color, lo adquiere debido al contacto con materiales en diversos estados de descomposición o por materia en suspensión, es por ello que hay que diferenciar entre el color real y el aparente ³⁴.

- d) **Turbidez.** Indicativo de la calidad del agua y de la eficiencia de la filtración para determinar presencia de organismos que pudieran causar enfermedades; la turbidez se debe a que materia suspendida en el agua absorbe la luz y hace que el agua tome un aspecto opaco ³⁴.
- e) **Sólidos suspendidos totales (SST).** Los sólidos suspendidos en su mayoría son los responsables de las impurezas visibles, la materia en suspensión son partículas diminutas que no se pueden quitar por deposición. Para el caso de los SST, su límite máximo permisible es de 500 mg/L ^{27,34}.
- f) **Conductividad eléctrica.** Expresión numérica de la capacidad para transportar corriente eléctrica, dicha característica depende de la presencia de iones, concentración total, movilidad, valencia, concentraciones relativas, así como de la temperatura ³⁴.

2.1.5.3 Parámetros químicos.

- Parámetros químicos con carga orgánica:
 - a) **DBO₅.** La demanda biológica de oxígeno es un parámetro que mide el consumo de oxígeno en la degradación de la materia orgánica en general, además de ser un indicador de contaminación orgánica, dado que mide la cantidad de oxígeno consumido por un microorganismo (a mayor cantidad de materia orgánica mayor presencia de microorganismos), razón por la cual concentraciones altas de este indicador lo vuelven dañino. El LMP para efluentes de curtiembre viene a ser de 500 mg/L ^{27,34}.
 - b) **DQO.** La demanda química de oxígeno viene a ser la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de la materia orgánica e inorgánica en el agua. DQO habitualmente va a tener un valor superior a DBO₅ debido a que varias sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente pero no biológicamente, siendo su contenido materia orgánica como carbohidratos, proteínas y grasas. Para el caso de los efluentes residuales generados por la industria de la curtiembre, el LMP es de 1500 mg/L ^{27,34}.
- Parámetros químicos inorgánicos:
 - a) **pH.** Variable que mide la calidad del agua en general, el cual va a determinar si el agua es ácida, básica o neutra, su escala está comprendida entre 0 - 14; dependiendo del rango en donde se encuentre, cuando se tenga un valor de 7 será neutra, por debajo del citado valor será ácida, mientras que por encima de dicho valor será básica; la mayoría de

tratamientos relacionados con efluentes líquidos dependen del pH. El LMP para este parámetro se va a encontrar entre los rangos de 6.0 - 9.0 ^{27,34}.

- b) Alcalinidad.** Indicador general de la calidad del agua, es la medida de la capacidad que posee el agua para neutralizar ácidos ³⁴.
- c) Dureza.** Concentración y posterior disolución de compuestos minerales en una determinada cantidad de agua, por lo general dichos minerales son magnesio y calcio, mientras mayor cantidad de minerales mayor dureza poseerá el agua ³⁴.
- d) Oxígeno disuelto.** Es un indicador para medir desechos o residuos orgánicos, dado que si el agua se encuentra contaminada o posee materia orgánica, microorganismos o bacterias, la concentración de oxígeno va a disminuir ³⁴.
- e) Nitrógeno amoniacal.** La descarga y subsecuente oxidación del nitrógeno amoniacal reducen altamente los niveles de oxígeno disuelto, la relación entre este compuesto y el pH es directa, puesto que va a determinar la concentración de amoniaco en forma libre (tóxico para la vida acuática). Para el caso de los efluentes de curtiembre, el LMP es de 30 mg/L ^{27,34}.
- f) Nitritos.** Sustancias tóxicas cancerígenas, usadas para aplicaciones industriales, al contacto con el flujo sanguíneo disminuye la capacidad de transportar oxígeno en la sangre ³⁴.
- g) Nitrato.** Agente antimicrobiano, de solubilidad alta en el agua, es la forma más oxidada del nitrógeno que se puede encontrar en aguas residuales; al igual que los nitritos, disminuye el transporte de oxígeno en la sangre ³⁴.
- h) Sulfatos.** Debido a que son constituyentes de la mayoría de detergentes, los sulfatos principalmente son descargados a través de desechos industriales. En grandes concentraciones producen alteraciones a la salud como deshidratación y cuadros diarreicos ³⁴.
- i) Sulfuros.** Factor que determina la acción bacteriológica anaerobia, se tratan de compuestos de diversos minerales combinados con azufre, siendo corrosivos hacia los metales (mayormente para aleaciones de cobre). El LMP para los efluentes de curtiembres es de 3 mg/L ^{27,34}.
- j) Cloruros.** Parámetro específicamente indicativo de la salinidad del efluente generado, el incremento de cloruros aumenta la corrosividad del agua, haciendo que se vuelva inutilizable para el consumo humano o de ganado ³⁴.
- k) Cromo total.** Los compuestos de cromo son altamente usados en las industrias, posee propiedades mecánicas como dureza y resistencia a la tensión, tiene acción tóxica sobre

la piel, mucosas y además es un agente cancerígeno bronquial. El LMP para este compuesto es de 2 mg/L ^{27,34}.

- l) Cromo (VI).** Forma tóxica del metal cromo que se puede encontrar como trazas procedentes de actividades industriales. Representan una amenaza a la salud por sus efectos genéticos y cancerígenos. Para los efluentes de curtiembre, el LMP de este metal es de 0.4 mg/L ^{27,34}.

2.1.5.4 Parámetros biológicos.

- a) Organismos coliformes.** Grupo de bacterias asociadas a los desechos humanos y animales, la presencia de estos organismos indica que el tratamiento realizado al efluente es ineficiente, posee acción tóxica al contacto ³⁴.

Los límites máximos permisibles y los valores máximos admisibles son instrumentos de gestión ambiental usados para determinar el grado de contaminación de los efluentes generados por las curtiembres y por las aguas residuales no domésticas, respectivamente; dichos instrumentos sirven para generar una comparativa entre ambos efluentes generados tal como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparativa entre los LMP de efluentes de curtiembre y los VMA de aguas residuales no domésticas ^{24,27}.

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes de curtiembres	VMA de aguas residuales no domésticas
Potencial de hidrógeno (pH)	pH	6.0 – 9.0	6.0 – 9.0
Temperatura	°C	35	< 35
Sólidos suspendidos totales	mg/L	500	500
Aceites y grasas	mg/L	50	100
DBO ₅	mg/L	500	500
DQO	mg/L	1500	1000
Sulfuros	mg/L	3	5
Cromo total	mg/L	2	10
Cromo (VI)	mg/L	0.4	0.5
NH ₄	mg/L	30	80

2.2 Legislación vigente para el sector curtiembre

Las curtiembres son una de las industrias más contaminantes del planeta junto con la minera y pesquera, en los procesos de curtido se van a generar efluentes líquidos contaminantes, los cuales van a poseer materia orgánica e inorgánica, sólidos suspendidos, sulfuro y cromo, por nombrar algunos, los cuales en su mayoría son vertidos al ambiente sin un tratamiento previo ^{1,3,4,16}.

El tratamiento de aguas residuales está compuesto de varias etapas, siendo su objetivo principal purificar dichas aguas antes que lleguen a su descarga; en dichos tratamientos los contaminantes no desaparecen, solo son convertidos en formas más aceptables para el medioambiente y para que sean fácilmente desechables ¹¹⁸.

Es por ello que actualmente en el país entidades nacionales como el Ministerio del Ambiente (MINAM) y Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) han elaborado una serie de leyes, principios, límites y normas que tienen como objetivo regular las actividades que alteren o dañen al medioambiente ²².

Dentro de la normativa nacional aplicable a dicha problemática tenemos:

- a) **Ley N.º 28611.** “Ley General del Ambiente”. Establece principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, así como el cumplimiento del deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de su protección ²⁰.
- b) **Ley N.º 29338.** “Ley de los Recursos Hídricos”. Regula el uso y gestión de los recursos hídricos. Comprende el agua superficial, subterránea, continental y los bienes asociados a esta. Se extiende al agua marítima y atmosférica en lo que resulte aplicable ²¹.
- c) **D.S. N.º 004-2017-MINAM.** “Aprueban Estandartes Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen disposiciones complementarias”. Establecen el nivel de concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente ²².
- d) **D.S. 017-2015-PRODUCE.** “Aprueban el Reglamento de Gestión Ambiental para la Industria Manufacturera y Comercio Interno”. Promueve y regula la gestión ambiental, la conservación y aprovechamiento sostenible de recursos naturales en el desarrollo de las actividades de la industria manufacturera y de comercio interno, así como los

instrumentos de gestión ambiental, los procedimientos y medidas de protección ambiental aplicables a estas ²³.

- e) **D.S. 010-2019-VIVIENDA.** “Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario”. Establece parámetros de los VMA y regula el procedimiento para controlar las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario ²⁴.
- f) **D.S. 002-2009-MINAM.** “Aprobación del Reglamento sobre Transparencia, Acceso a la información pública ambiental y participación y consulta en asuntos ambientales”. Regula los mecanismos y procesos de participación y consulta ciudadana en los temas de contenido ambiental ²⁵.
- g) **R.M. 466-2019-PRODUCE.** “Aprueban Términos de Referencia para la elaboración de los instrumentos de gestión ambiental correctivos de la industria manufacturera y de comercio interno”. Se agregan, elaboran, promueven y establecen instrumentos de gestión ambiental tales como la Declaración de Adecuación Ambiental (DAA) y el Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) ²⁶.
- h) **D.S. 003-2002-PRODUCE.** “Aprueban Límites Máximos Permisibles y Valores Referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel”. Se delimitan los límites y valores para actividades contaminantes en pro de garantizar el cuidado del medioambiente ²⁷.
- i) **D.L. N.º 1278.** “Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos”. Tiene como finalidad el manejo integral y sostenible mediante la articulación e integración de las políticas, planes, programas y acciones en lo que refiere a los residuos sólidos ²⁸.
- j) **Resolución N.º 023-2016-OEFA/TFA-SEM (MINAM).** Resolución referida a los metales pesados como contaminantes ambientales peligrosos por su no biodegradabilidad y riesgo de acumulación ¹⁵³.

2.3 Cromo

2.3.1 Definición

El cromo es un elemento químico de símbolo Cr, fue descubierto en las minas de oro de Beresof, ubicadas en Siberia, por el químico farmacéutico francés Louis Nicolás Vauquelin, en el año 1797; es un metal duro, brillante, frágil y de coloración blanca; resistente a la corrosión, oxidación y calor, por lo que se vuelve un elemento muy atrayente para las industrias en general ³⁵.

El cromo se encuentra presente en una variedad de alimentos que se consumen frecuentemente como el brócoli, levadura de cerveza, hígado, queso, panes integrales y cereales; por citar algunos ejemplos. Además, lo podemos encontrar en la atmósfera en forma de partículas, en donde se libera al aire no solamente a partir de fuentes antropogénicas, sino también por procesos de combustión; se dice que el cromo presenta un ciclo completo que inicia desde el suelo como óxido insoluble, pasando por plantas, animales y personas hasta volver a su lugar inicial ^{35,36}.

2.3.2 Características fisicoquímicas

El cromo es el vigésimo cuarto elemento más abundante de la corteza terrestre, posee seis isótopos, de los cuales cuatro existen en la naturaleza en forma estable: ^{50}Cr , ^{52}Cr , ^{53}Cr , ^{54}Cr ; de los anteriormente mencionados, el isótopo ^{52}Cr viene a ser el más abundante con un porcentaje de 83.8 %; mientras que el ^{54}Cr es el isótopo radiactivo mayormente utilizado en biomedicina ^{35,40}.

El cromo es un metal pesado que se utiliza en industrias tales como galvanoplastia, aleación, curtido de pieles, pigmentos y tintes, por mencionar algunas; la principal fuente de liberación del cromo al ambiente es a través de los desechos producidos por las industrias previamente citadas. Bajo ciertos estados de oxidación se vuelve un elemento tóxico que posee la característica de no degradarse, por lo tanto, se acumula en el medioambiente, afectando los ecosistemas ambientales, incluidos los microorganismos, plantas, animales y seres humanos ⁴³⁻⁴⁵.

El cromo forma tres series de compuestos con otros elementos; dichas series se representan en términos de óxidos de cromo; cromo con valencia dos: óxido de Cr (II) u óxido cromoso; cromo con valencia tres: óxidos de Cr (III) u óxido crómico, y cromo con valencia seis: anhídrido de

Cr (VI) o anhídrido de ácido crómico. El cromo además es capaz de formar compuestos con otros elementos en estados de oxidación (II), (III) y (VI) ¹⁵⁴.

Tabla 6. Propiedades y características fisicoquímicas del cromo ⁴³.

Propiedades	Características
Estado a temperatura ambiente	Sólido
Color	Blanco plateado
Número atómico	24
Número de masa	51.996 g/mol
Configuración electrónica	[Ar] 4s ¹ 3d ⁵
Electronegatividad	1.66
Densidad	7.19 g/cm ³ a 20°C
Dureza	9 Mohs
Punto de fusión	1.875°C
Punto de ebullición	2.672°C
Radio de Van der Walls	0.127 nm
Radio iónico	0.061 nm (+3); 0.044 nm (+6)
Isótopos	6
Energía de ionización	651.1 kJ/mol
Entalpia de fusión	15.3 kJ/mol
Entalpia de vaporización	347 kJ/mol
Entalpia de atomización	397 kJ/mol
Conductividad térmica	93.9 J/m.s.K
Conductividad eléctrica (1 mohm/cm)	77.519
Afinidad electrónica	64.3 kJ/mol
Radio atómico	128 pm
Números comunes de oxidación	+3, +6, -2, -1
Otros números de oxidación	+1, +2, +4, +5
Potencial estándar	-0.71 V (Cr ³⁺ /Cr)

El cromo posee seis estados de oxidación: cromo metálico [Cr (0)], cromo bivalente [Cr (II)], cromo trivalente [Cr (III)], cromo tetravalente [Cr (IV)], cromo pentavalente [Cr (V)], cromo

hexavalente [Cr (VI)]; la Tabla 7 nos muestra las características químicas propias de cada estado de oxidación de dicho elemento ³⁷.

Tabla 7. Características de los diferentes estados de oxidación del cromo ⁴⁷.

Valencia	Comportamiento en el ambiente	Característica
[Cr (0)]	Inestable	
[Cr (II)]	Fácilmente oxidable a Cr (III) Solo estable en ausencia de cualquier oxidante	Activo cuando se encuentra en condiciones anaeróbicas
[Cr (III)]	Altamente estable	Requiere de mucha energía para poder convertirse a estados más bajos o altos de oxidación
[Cr (IV)]	Puede formar reacciones intermedias a Cr (III), las cuales van a ser muy inestables	Esta fase se puede ver exhibida durante la reducción u oxidación del elemento
[Cr (V)]	Inestabilidad intermedia	Se puede observar durante la reducción y oxidación del elemento
[Cr (VI)]	Bajo condiciones ácidas posee alto potencial redox e inestable bajo presencia de donadores de electrones	Muy oxidante

De los seis estados de oxidación del cromo citados anteriormente, el trivalente y hexavalente son los más estudiados, ya sea por las propiedades que poseen para la industria y la salud o por los efectos que generan; el cromo trivalente es ampliamente utilizado en industrias tales como pintura, curtiembre, galvanizado, acero y soldadura, por citar algunas; mientras que en el sector salud es empleado como suplemento nutricional para pacientes diabéticos, dado que tiene propiedades de micronutriente; para el caso del cromo hexavalente se ha reportado que posee características negativas a la salud, siendo la más peligrosa sus efectos cancerígenos en los pulmones ³⁷.

2.3.3 Importancia del cromo

El cromo es un elemento metálico que viene siendo utilizado desde el siglo XVIII, en su mayoría para aplicaciones industriales debido a lo siguiente:

- Es un material altamente requerido en las industrias, dado que brindan a los productos fabricados características únicas como: brillo, durabilidad, color, dureza y resistencia contra la corrosión, calor y descomposición ³⁹.
- En la industria química, el cromo (VI) es requerido como agente oxidante para lograr la generación de otros compuestos de cromo ⁵⁰.
- En la industria del curtido, los pigmentos a base de cromo son bien valorados por la resistencia que poseen hacia condiciones climáticas de intemperie, además de los colores vivos que producen ³⁹.
- En su forma hexavalente, el cromo es utilizado en la industria metalúrgica para producir aleaciones de cromo, cromado y producción del metal propiamente dicho ⁵⁰.
- Para el caso de la industria automotriz, dicho metal adiciona características de resistencia hacia corrosiones a los motores vehiculares, evitando que sus piezas tengan un mayor desgaste producto de la temperatura y calor ³⁹.
- El cromo es un mineral indispensable para las personas que padecen de diabetes o arterioesclerosis, así también para personas que poseen elevado colesterol o triglicéridos ¹⁵⁴.
- La industria maderera requiere de cromo por sus propiedades biocidas para la conservación de las maderas; mientras que el poder anticorrosivo de dicho metal le brindan funcionalidad para aplicaciones marinas, en especial para que sus componentes sean anticorrosivos ³⁹.
- El cromo puede reemplazar en parte al aluminio o hierro en muchos minerales a los cuales les brinda exclusivos colores ¹⁵⁴.

2.4 Cromo (III)

El cromo (III) o cromo trivalente es la forma más común del elemento, el cual se encuentra en la naturaleza y se caracteriza por ser inmóvil en el medioambiente salvo cuando se encuentre en pequeñas trazas y a un pH extremadamente bajo ^{36,44}.

Asimismo, el cromo (III) es la forma más estable termodinámicamente hablando, porque en solución se requeriría de una considerable energía para convertirlo en estados de oxidación más altos o bajos ⁴⁵.

2.4.1 Propiedades fisicoquímicas

- a) El cromo (III) posee un estado de oxidación estable y reacciona lentamente para formar complejos. Además, tiene un bajo potencial de energía cinética, por lo que no es un oxidante fuerte ^{35,45}.
- b) El cromo (III) en sus formas de óxido de cromo III (Cr_2O_3) y sulfato de cromo básico [$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$] vienen a ser las variedades comerciales mayormente usadas ³⁶.
- c) Cromo (III) puede clasificarse como un ácido duro, además puede formar complejos relativamente fuertes con el oxígeno y con ligandos donantes ⁴⁹.
- d) El cromo (III) es insoluble, razón por la cual es inmóvil cuando se encuentra a temperatura ambiente ⁴⁹.
- e) Cromo (III) suele ser adsorbido en la superficie del suelo o puede precipitar como hidróxido de cromo en ambientes ligeramente ácidos o alcalinos ⁵⁰.
- f) La solubilidad del cromo (III) depende del pH, disminuye drásticamente cuando se encuentra en un rango superior a 4.5 ¹³⁰.
- g) Bajo algunas condiciones, el cromo (III) puede convertirse en cromo (VI) ¹³⁰.

2.4.2 Cromo (III) en el medioambiente

- El cromo (III) posee un alto potencial de ser un contaminante en el medioambiente, especialmente en sistemas acuíferos y en sus superficies ⁵⁰.
- El cromo (III) presente en el aire, agua y suelo resulta de procesos industriales y de actividades humanas, las emisiones por chimeneas, sólidos y aguas industriales, incrementan su contenido en el medioambiente. Las cantidades halladas de cromo en la hidrósfera, atmósfera y biósfera se atribuyen generalmente a emisiones industriales ¹⁵⁴.

2.4.3 Cromo (III) y sus efectos en la salud

- El cromo en su forma trivalente (en su mayoría como sales de cromo) es un micronutriente capaz de mantener el adecuado metabolismo de carbohidratos y lípidos a nivel molecular; ingresa al cuerpo a través de los pulmones, tracto gastrointestinal y por la piel en menor medida ³⁵.

- Cromo (III) posee efectos positivos en la salud humana, dado se han realizado estudios que demuestran su acción benéfica en pacientes diabéticos, reduciendo los niveles de glucosa en la sangre y promoviendo la unión de la insulina con células receptoras, produciendo una mayor sensibilidad a dicho compuesto, haciendo más fácil la ingesta de grasas, azúcares y proteínas por el cuerpo ^{35,37,38}.
- La ingesta de alimentos tales como verduras, frutas, carnes, levaduras y granos que contienen cromo (III) es la vía de entrada más común al interior de organismo, las personas pueden estar expuestas al cromo (III) al respirarlo, comerlo, beberlo o en contacto por la piel, el nivel del cromo (III) en el agua y aire generalmente es bajo ¹⁵⁴.
- A nivel celular el cromo (III) se vuelve tóxico para los organismos, dado que tiene predisposición a formar complejos con los ácidos nucleicos y proteínas interfiriendo con procesos metabólicos ⁴⁴.
- Cuando se llega a tener una prolongada exposición al cromo (III), en su mayoría por motivos de trabajo, se pueden generar tos, amigdalitis, faringitis y disminución de la respiración ⁴⁴.
- Cromo (III) reduce los niveles de colesterol en la sangre al disminuir la concentración de lipoproteínas de baja densidad (LDL), las cuales son dañinas en la sangre ⁴⁹.

2.5 Cromo (VI)

Su medio de ingreso al cuerpo principalmente es por vía oral, en donde no es muy dañino; en cambio, cuando entra al organismo por vía respiratoria o dérmica se vuelve muy peligroso, pudiendo provocar desde dermatitis, irritación nasal hasta cáncer pulmonar ³⁸.

2.5.1 Propiedades fisicoquímicas

- El cromo (VI) o hexavalente se reduce fácilmente a cromo (III) cuando se encuentra en presencia de Fe (II) o Mn (III); no posee una estabilidad fuerte como el cromo (III), razón por la cual es un agente oxidante fuerte que va a reaccionar de manera rápida a la formación de complejos ³⁵.
- Cromo (VI) puede convertirse a cromo (III) fácilmente por una variedad de agentes oxidantes presentes en el agua y suelo, pero también puede ocurrir lo contrario, dado que algunos agentes oxidantes presentes en el agua natural pueden oxidar cromo trivalente a cromo hexavalente ¹³⁰.

- Rara vez se encuentra en la naturaleza, al contrario, es usual que se junte con otros elementos para formar cromita férrica (FeCr_2O_4) ⁴⁸.
- Los compuestos de cromo (VI) más comunes son las sales de ácidos crómicos ³⁹.
- Las formas más solubles, movibles y en consecuencia mayormente tóxicas del cromo (VI) son el cromato y el dicromato ⁴⁹.
- El cromato, que viene a ser la forma más frecuente del cromo (VI), está presente en los desechos generados por el cromo hexavalente, tanto en sus formas sólidas como líquidas, se convierte en una sustancia peligrosa por la movilidad que posee a través de sistemas de alcantarillado, aguas subterráneas y sistemas acuáticos ⁵⁰.
- Cromo hexavalente es soluble en el agua bajo cualquier rango de pH ⁵⁰.
- Cromo (VI) uno de los contaminantes metálicos más utilizados en las actividades industriales, siendo considerado dentro de las 20 sustancias usadas más peligrosas en los últimos quince años ⁵⁰.

2.5.2 Cromo (VI) en el medioambiente

- a) Por lo general el cromo (VI) se filtra o derrama al medioambiente desde actividades industriales, en su mayoría son arrojados al alcantarillado, volviéndose en un potencial contaminante de las aguas ^{35,133}.
- b) Para que el cromo hexavalente pueda llegar a formarse se debe tener algunos factores externos como pH, temperatura, niveles de oxígeno, materia orgánica y la presencia de otros compuestos químicos ³⁹.
- c) Cuando se arroja cromo (VI) al agua afecta directamente la fauna acuática, siendo los más perjudicados las algas y peces, los cuales poseen una alta sensibilidad a dicho compuesto ^{39,134}.
- d) En la industria del curtido se sabe que alrededor de un 30 – 40 % de cromo se mantiene en los efluentes líquidos generados ⁴¹.
- e) Cromo (VI) entra al interior de las plantas y raíces (en donde se acumula mayormente) a través del proceso de adsorción; una vez dentro de ellas, genera efectos negativos tales como: acorta la germinación de las semillas, retrasa el desarrollo de la fotosíntesis, produce senescencia, caída retrasada de las hojas y daños a las paredes celulares ^{42,43}.
- f) Distintas partes de la planta difieren considerablemente en el modo de asimilar el cromo (VI) y en el tipo de lesiones que acusan ¹⁵⁴.

- g) Para el caso de los peces, el cromo hexavalente es altamente tóxico, se introduce de forma inmediata por las paredes celulares adsorbiéndose por las branquias y teniendo un efecto acumulativo dentro del pez ¹³⁰.
- h) Los metales pesados en general se encuentran en el suelo de forma natural, actualmente la concentración del cromo (VI) va en aumento debido a las diversas industrias en donde se usa dicho metal, al no ser biodegradable se convierte en un problema a la salud y medioambiente ^{132,134}.

2.5.3 Cromo (VI) y sus efectos en la salud

- Una exposición a corto tiempo puede producir irritaciones nasales - oculares y estornudos; mientras en un tiempo prolongado los efectos se vuelven más dañinos a la salud, provocando úlceras, insuficiencia renal, gastroenteritis y hasta cáncer pulmonar; por citar algunos ejemplos ^{39,133}.
- La ingesta de pequeñas cantidades tanto de cromo (III) y cromo (VI) son inocuas al organismo, si sobrepasan los valores predeterminados se vuelven adversos a la salud, provocando anomalías médicas tales como irritación gastrointestinal, úlceras estomacales, ardor en el corazón, infección en el tracto digestivo ^{127,130}.
- El cromo (VI) se caracteriza por ser cancerígeno, genotóxico, dermatotóxico y neurotóxico, dado que es capaz de entrar al interior celular en bajas concentraciones (< 10M) mediante una combinación de difusión pasiva con transporte saturable activo ^{40,41}.
- Es un agente oxidante fuerte que puede liberar radicales libres, los cuales poseen efectos cancerígenos en las células ⁴⁰.
- El cromo (VI) tiene una fácil accesibilidad hacia el interior del organismo, dado que posee varias vías de ingreso como inhalación, consumo o unión epidérmica; es por ello que se vuelve un compuesto altamente peligroso para humanos ⁴².
- Cromo (VI) ingresa a la célula a través de un transporte activo; una vez dentro se reduce a cromo (III), el cual se une directamente al DNA provocando enlaces cruzados, lo que va a producir mutagénesis celular, proliferación celular y tumoraciones ⁴⁶.
- Dentro del organismo de mujeres embarazadas, el cromo (VI) puede atravesar la placenta, significando un alto riesgo para embriones y fetos ¹⁵⁴.
- Cuando el cromo (VI) tiene contacto con la piel se produce un envenenamiento sistemático, quemaduras graves e interferencia con las cicatrificaciones, dependiendo del tiempo de exposición se puede llegar hasta la aparición de dermatitis y alergias crónicas;

cuando el cromo (VI) ingresa al cuerpo por ingestión puede afectar las funciones renales y hepáticas del organismo; finalmente, si se produce la inhalación de cromo VI se va a generar irritación nasal, sensibilidad respiratoria y ulceración del tabique nasal ⁴⁹.

Tabla 8. Comparativa entre cromo (III) y cromo (VI) ^{35,38,39}.

Cromo (III)	Cromo (VI)
Posee una adsorción celular lenta cuando es expuesto a cualquier organismo	Posee una adsorción celular más fácil cuando es expuesto a organismos
No es activamente transportado hacia el interior celular, pero puede ingresar a través de difusión lenta	Puede ingresar al interior celular a través de transportadores aniónicos, lo que conlleva alteraciones al DNA genómico
Reacciona lentamente al formar complejos por la estabilidad fuerte que posee	Oxidante fuerte que al no poseer una buena estabilidad lleva a que forme complejos de manera inmediata
Suelen ser compuestos naturales o subproductos industriales	Casi siempre son el resultado de los productos subindustriales
Generalmente, poseen baja solubilidad en el agua y baja reactividad	Altamente soluble en medios acuosos
Ambos compuestos poseen una mayor densidad que el agua	
Bajo condiciones de pH alto y en poca presencia de materia orgánica se puede convertir en cromo (VI)	Bajo condiciones de pH bajo y en presencia de materia orgánica se puede reducir a cromo (III)
Posee una relativamente baja toxicidad	Sumamente tóxico a la salud y medioambiente, 100 veces más tóxico que el cromo (III)
Se puede encontrar en la naturaleza	Rara vez existe como elemento en la naturaleza
Las plantas no adsorben el cromo (III) tan rápidamente como el cromo (VI)	Las plantas poseen la característica de adsorber más rápidamente el cromo (VI)

2.6 Moringa (*Moringa oleífera* Lam)

2.6.1 Origen

Moringa oleífera Lam es la especie más conocida del género Moringa. Es un árbol originario del sur del Himalaya, el nordeste de la India, Bangladés, Afganistán y Pakistán. Se encuentra diseminada en una gran parte del planeta, en especial por América Central; se le conoce con diversos nombres comunes como palo jeringa, acacia y jazmín francés; entre otros. *Moringa oleífera* Lam tiene una gran plasticidad ecológica, ya que es capaz de adaptarse a las más diversas condiciones de suelo y clima. Su valor nutricional y los elevados rendimientos de biomasa la hacen un recurso fitogenético de importancia en los sistemas de producción ⁶⁹.

2.6.2 Descripción botánica

Moringa oleífera Lam es un árbol siempre verde de tamaño mediano y crecimiento acelerado que usualmente alcanza de 10 a 12 metros de alto. Tiene una copa abierta y esparcida de ramas inclinadas y frágiles, un follaje plumoso de hojas pinadas en tres, y una corteza gruesa, blanquecina y de aspecto corchoso. Se valora principalmente por sus frutas, hojas, flores, raíces (todas comestibles), y por el aceite obtenido de las semillas, el cual también es comestible. Este cultivo puede ser propagado por medio de semillas o por reproducción asexual (estacas) ⁷⁶.

- *Moringa oleífera* Lam posee un árbol que tiene una raíz pivotante, tuberosa, blanca y de aspecto hinchado, con un olor picante característico y escasas raíces laterales. Los árboles obtenidos de las semillas desarrollan una raíz gruesa y profunda, con un sistema extenso de raíces laterales tuberosas y gruesas. Los árboles obtenidos de estacas no desarrollan raíces pivotantes ⁸².
- *Moringa oleífera* Lam posee flores blanco-amarillentas, fragantes y bisexuales, aparecen en grupos de flores laterales, esparcidas o pendientes, de 10 a 25 cm de largo. Las flores individuales son de aproximadamente de 0.7 a 1 cm de largo y 2 cm de ancho, con cinco pétalos blanco-amarillentos, de tamaño desigual y con venas delgadas. Los polinizadores principales son las abejas, otros insectos y varias aves ⁸².
- Las hojas son compuestas, de unos 20 cm de largo y color verde claro; tienen cualidades nutritivas sobresalientes, que están entre las mejores de todos los vegetales perennes. El contenido de proteína aproximadamente es del 27 %; además tienen cantidades significativas de calcio, hierro y fósforo, así como vitamina A y C ⁷⁸.

- La corteza es blanquecina, el tronco generalmente espeso e irregular en tamaño y forma, la corona es pequeña y densa; rara vez sobrepasa los 10 metros de altura ⁷⁸.
- Las semillas son carnosas, cubiertas por una cáscara fina de color café. Poseen tres alas o semillas aladas de 2.5 a 3 mm de largo. Al quitar la cáscara se obtiene el endospermo que es blanquecino y muy oleaginoso ⁸³.
- El fruto está formado por tres lígulas en forma triangular y lineal que dan la apariencia de vaina, usualmente miden de 20 a 45 cm de largo. Si se corta transversalmente, se observa una sección triangular con varias semillas dispuestas a lo largo ⁸³.

Moringa oleífera Lam vive en climas con una amplia gama de temperaturas, siempre que dicha temperatura anual sea superior a los 18.7 °C; su óptimo crecimiento se encuentra entre los 25 y 35 °C. Es una planta sensible al frío, pierde sus hojas en invierno y no soporta las heladas, en cuanto a la temperatura máxima que puede soportar es de 48 °C. Se caracteriza por no ser exigente en cuanto a la fertilidad, pudiendo soportar suelos con pH de 4.5 a 9; por lo que se vuelve una alternativa viable para ser cultivada y producida en tierras de alta salinidad; además de acoplarse a suelos bien drenados ^{76,78,82,83}.

2.6.3 Taxonomía

Moringa oleífera Lam es una planta que en los últimos años ha ganado interés por sus propiedades nutricionales, su bajo costo de producción y su versatilidad de crecimiento en terrenos agrestes, la Tabla 9 muestra la clasificación taxonómica de dicha planta.

Tabla 9. Clasificación taxonómica de *Moringa oleífera* Lam.⁸¹

Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoleopsida</i>
Orden	<i>Capparales</i>
Familia	<i>Moringaceae</i>
Género	<i>Moringa</i>
Especie	<i>Moringa oleífera</i>

2.6.4 Usos de *Moringa oleífera* Lam

Moringa oleífera Lam posee un alto valor nutricional y gran potencialidad de usos; es por ello que casi todas las partes de la planta pueden ser aprovechadas:

- Las hojas son altamente ricas en vitaminas y en diferentes aminoácidos, por lo que son recomendadas para tratar problemas de malnutrición en niños. Además, tienen cualidades nutritivas sobresalientes, que están entre las mejores de todos los vegetales perennes. Este valor nutricional es particularmente importante en áreas donde la seguridad alimentaria se puede ver amenazada por períodos de sequía, puesto que la *Moringa oleífera* Lam puede cosecharse durante las épocas secas, cuando no haya otros vegetales frescos disponibles ^{70,84}.
- Las semillas se utilizan en la alimentación, medicina y tratamiento de aguas, dado que la planta no es tóxica, no afecta el pH, ni la conductividad del agua, y el lodo producido por la coagulación es inocuo y poco voluminoso, adicionalmente, dichas semillas pueden ser usadas como fertilizantes ^{71,74}.

Asimismo, se ha demostrado que la semilla de *Moringa oleífera* Lam tiene un 40 % de aceite; el perfil de ácido graso del aceite indica un 73 % de ácido oleico. Esto significa que el aceite de *Moringa oleífera* Lam tiene el mismo nivel de calidad y, por lo tanto, podría tener el mismo valor de mercado que el aceite de oliva. Finalmente, dichas semillas vienen siendo usadas para tratamiento de tumores abdominales en el campo de la medicina ^{84,126}.

- La corteza del tronco es útil en la adsorción de metales pesados, adicionalmente, se caracteriza por ser antiescorbútica, la cual exuda una goma rojiza usada para el tratamiento de diarreas ^{72,126}.
- El aceite se usa en la industria de perfumería y de cosméticos, como lubricante, en la alimentación humana y en la producción de biodiésel ⁷³.

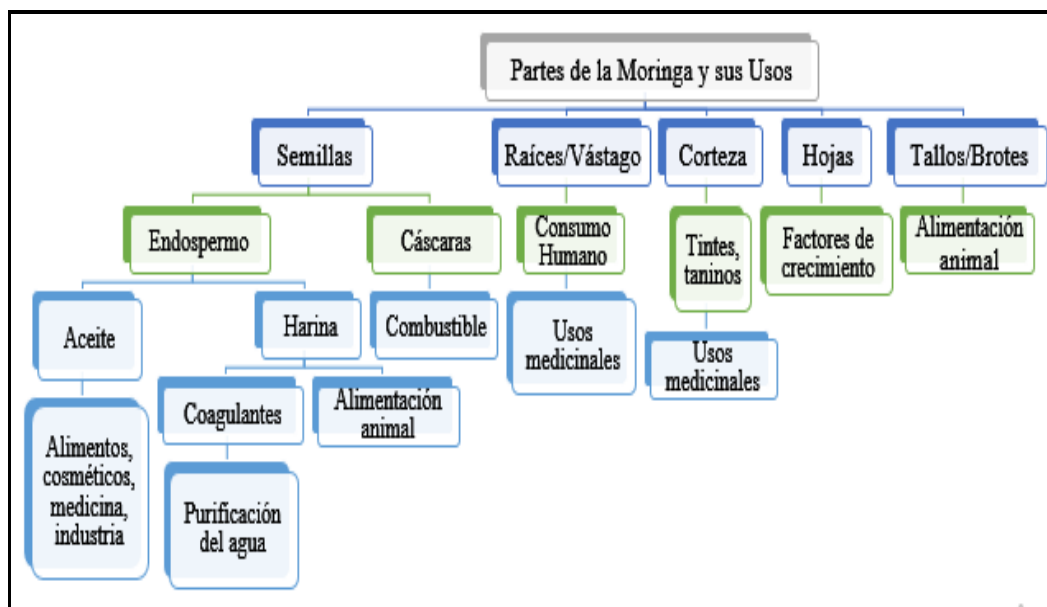


Figura 5. Usos de *Moringa oleífera* Lam ¹⁴⁹.

2.6.5 *Moringa oleífera* Lam en el tratamiento de aguas

2.6.5.1 Experiencias internacionales del uso de semillas de *Moringa oleífera* Lam.

En el año 2019, Ramesh, V. & Kumar, A., estudiaron los efectos de las semillas de *Moringa oleífera* Lam como coagulante primario en muestras de estanques, grifos y lagos de zonas rurales en la India; utilizaron 25 mg/L de coagulante dejándolo reposar por un lapso de 75 minutos. Los parámetros evaluados fueron color, turbidez, olor y pH; se determinó que a mayor volumen de coagulante mayores resultados positivos se obtenían; además, se observó que las semillas guardadas bajo temperatura y envases adecuados no perdían sus propiedades coagulantes por varios años ⁵¹.

En Indonesia (2015); Effendi, H. et al, determinaron el potencial coagulante de semillas de *Moringa oleífera* Lam para el tratamiento de aguas residuales provenientes de zonas industriales, se analizó turbidez y sólidos totales; para el caso del análisis de turbidez se dispuso de 4000 mg/L en un tiempo de 180 minutos logrando tener un 95.5 % de reducción; mientras que para sólidos totales se utilizó una cantidad de 5000 mg/L durante 60 minutos pudiendo obtener un 87.5 % de reducción ⁵².

Asimismo, Ali, E. et al, (2010) realizaron la producción de un coagulante natural a partir de semillas de *Moringa oleífera* Lam para el tratamiento de aguas con baja turbidez en Malasia; este proyecto abordó el procesamiento y concentración de los constituyentes bioactivos de las

semillas para la generación de un coagulante natural, al usarlo para remover la turbidez de las aguas se obtuvo un porcentaje de 96.23 % de remoción cuando se añadían 0.4 mg/L de coagulante, el resultado obtenido a partir de una dosis muy baja hace que se vuelva interesante realizar posteriores estudios ⁵³.

Por otro lado, Tunggolou, J. & Payus, C., presentaron un estudio en Pakistán (2017) sobre las propiedades coagulantes de las semillas de *Moringa oleífera Lam* comparándolas con el sulfato de aluminio para el tratamiento de aguas de consumo humano; se obtuvo un 91.17 % de eliminación de sólidos suspendidos a una dosis de 15 mg/L cuando se usaron las semillas, en contraste con el 78.72 % a una dosis de 55 mg/L cuando se usó el coagulante inorgánico; estos resultados demuestran que es posible tratar aguas a partir de un producto barato y fácil de obtener ⁵⁴.

La investigación realizada por Hadi, M. & Bina, B. en el año 2018 en Irán determinó el poder de coagulación/floculación/sedimentación de la mezcla entre alumbre y semillas de *Moringa oleífera Lam* en la remoción de metales pesados tales como hierro, cobre, zinc y manganeso procedentes de aguas turbias; además se redujo la turbidez en un 99 % usando solamente una dosis de 0.55 mg/L ⁵⁵.

Finalmente, Sulaiman, M. et al. realizaron una investigación científica en Nigeria (2017), sobre las bondades que poseían las semillas de *Moringa oleífera Lam* en el tratamiento de aguas, demostrando que dichas semillas operan por un mecanismo de coagulación basado en la neutralización de cargas, además de ser inocuos a la salud y accesibles económicamente ⁵⁶.

2.6.5.2 Experiencias nacionales del uso de semillas de *Moringa oleífera Lam*.

Según Cabrera Rivas, I. (2019), en su tesis realizada en la Universidad Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque, investigó la mezcla entre sulfato de aluminio y *Moringa oleífera Lam* para determinar la eficiencia del proceso de coagulación/floculación en aguas residuales provenientes de una destilería de cobre; dicha tesis evaluó algunos parámetros como turbidez, DBO₅ y DQO. Se concluyó que la dosis ideal era de 0.6 gr de sulfato de aluminio y 0.4 gr de semilla de *Moringa oleífera Lam*; con dicha dosis se lograron reducir la turbidez de 73 NTU a 6.5 NTU, el DBO₅ de 584 mg/L a 396 mg/L y el DQO de 1213 mg/L a 985 mg/L ⁶³.

Por otro lado, Arenas Díaz, M. (2019), realizó la investigación sobre el efecto del aceite de semillas de *Moringa oleífera Lam* en el tratamiento de aguas por coagulación/floculación, dicha investigación fue realizada en la Universidad Agraria La Molina y para ello se llevó a cabo

usando como muestras aguas sintéticas con tres distintos grados de turbidez (20 NTU, 120NTU y 500 NTU); al finalizar el proyecto se llegó a la conclusión que a mayor turbiedad a tratar mayores serán las dosis a utilizar y en consecuencia aumentará la efectividad en dicha remoción⁶⁴.

Finalmente, Mejía Carrillo, P.W. et al., en el año 2020 con su trabajo de investigación realizado en la Universidad Cesar Vallejo evaluaron el poder coagulante/floculante de semillas de *Moringa oleífera Lam* para tratar aguas con alta turbidez y carga orgánica elevada; obtuvieron dos tipos de coagulantes; uno a base de la semilla pretratada con hidróxido de sodio 1N y el otro a base de la semilla extraída mediante Soxhlet; los resultados obtenidos con una dosis de 0.74 gr/L para la semilla pretratada fueron de 87.3 % (turbiedad), 88.8 % (sólidos suspendidos totales), 25.9 % (DBO₅) y 26.3 % (DQO); mientras que para el caso de las semillas con previa extracción por Soxhlet y con una dosis de 0.5 gr/L los resultados fueron: 97.8 % (turbiedad), 89.99 % (sólidos suspendidos totales), 51.4 % (DQO) y 35.3 % (DBO₅)⁶⁵.

2.6.6 Características coagulantes/floculantes de las semillas de *Moringa oleífera Lam*

Dentro de los coagulantes naturales estudiados últimamente, la *Moringa oleífera Lam* es sin duda la que mayores ventajas presenta en el tratamiento de aguas residuales; esto se debe a las propiedades de sus semillas, las cuales son oleaginosas, se encuentran encapsuladas, tienen forma alada de 2.5 a 3 mm de largo (característica que las diferencia de otras); cuando se saca la cáscara se obtiene una semilla de color blanca y oleaginosa⁷⁵.

Las semillas de *Moringa oleífera Lam* poseen en su interior proteínas con actividad coagulante/floculante comparable al sulfato de aluminio, con la ventaja de no alterar las propiedades del agua a tratar, dicha característica hace que este coagulante natural sea recomendable en poblaciones rurales por su eficacia, accesibilidad económica y no generar riesgos hacia la salud de los consumidores¹⁵⁰.

Se ha verificado que el lodo generado por las semillas de *Moringa oleífera Lam* no es tóxico y presenta un volumen considerablemente menor que el producido por los coagulantes tradicionalmente empleados a nivel mundial, como son las sales de aluminio o sales férricas⁷⁷.

Las semillas de *Moringa oleífera Lam* poseen las siguientes características:

- a) Son consideradas coagulantes/floculantes naturales, puesto que poseen una prometedora actividad biofloculante, dado que remueven metales pesados por el mecanismo de adsorción y neutralización de cargas, dicho mecanismo provoca la

adsorción de metales pesados a través del ion metálico positivo que forma un puente entre el polielectrolito y los grupos funcionales de las proteínas que están presentes en las semillas ^{77,129,163}.

- b) Presentan proteínas que le confieren el poder coagulante/floculante a la planta; cerca del 1 % de tales proteínas se encuentran de forma activa, dichas proteínas están compuestas por aminoácidos polares, los cuales pueden ser catiónicos (lisina, arginina e histidina) y aniónicos (ácido aspártico y ácido glutámico); los citados aminoácidos pueden estar en la superficie teniendo cargas positivas como negativas y a su vez interactuar con los coloides presentes, favoreciendo su neutralización y aglutinación ^{77,161,162}.
- c) Las proteínas presentes en las semillas se caracterizan además por poseer un bajo peso molecular, van a actuar como los polímeros sintéticos utilizados industrialmente para el tratamiento de aguas. Al ser agregadas en aguas residuales, dichas proteínas se van a adherir a las partículas coloidales con cargas negativas en suspensión, las van a neutralizar y luego aglutinar, favoreciendo su posterior remoción mediante sedimentación o filtración ⁷⁹.
- d) Las proteínas que se encuentran en las semillas de *Moringa oleífera Lam* se caracterizan por ser solubles, las citadas proteínas ofrecen algunos beneficios en comparación con los coagulantes químicos, dado que son amigables al medioambiente, no requiere alterar o ajustar el pH, no necesita la reducción de alcalinidad y reduce los volúmenes de los lodos ⁹⁸.
- e) Presenta una alta actividad bactericida, en donde se puede lograr remover hasta el 90 - 99.9 % de bacterias que están adheridas a las partículas sólidas. Sin embargo, algunos microorganismos nocivos para la salud no son removidos en el proceso, todo depende del grado de contaminación que presente el agua, por lo que se recomienda usar algún tipo de purificación complementario ⁸⁰.
- f) La semilla de *Moringa oleífera Lam* ofrece excelentes ventajas en comparación con los coagulantes convencionales:
 - La acción de bioadsorbente de la semilla no tiene ninguna influencia en los niveles de pH del agua a purificar ⁷⁹.
 - La producción del lodo se reduce y se puede convertir en un abono en los suelos al carecer de residuos de metales ⁷⁹.
- g) Los principales inconvenientes que presenta la *Moringa oleífera Lam*, al igual que la mayoría de coagulantes naturales son:

- Cuando se adicionan al agua en forma de semillas pulverizadas, incrementan la carga orgánica de manera significativa, añadiendo hasta un 90 % de sustancias orgánicas que no actúan como agentes floculantes. Este hecho impide almacenar el agua tratada por un tiempo superior a 24 horas ⁷⁸.
 - Aumenta la turbidez del agua cuando se agrega más de lo indicado y en concentraciones de aguas con bajos niveles de turbidez. Esto se explica porque al añadir el coagulante en aguas de baja turbidez (presencia de pocos coloides) no encuentren la suficiente materia para adherirse y sedimentarse, lo que hace que quede suelto y se convierta en un aporte orgánico y material en suspensión en el agua tratada ⁷⁹.
- h)** Muchos estudios han tenido resultados positivos usando las semillas de *Moringa oleífera* Lam como coagulantes primarios para la remoción de turbidez (logrando remociones mayores a 100 NTU) y en la eliminación de cianobacterias en aguas residuales ⁹⁶.

2.7 Tuna/Nopal (*Opuntia ficus-indica*)

2.7.1 Origen

Opuntia ficus-indica, comúnmente llamada Tuna o Nopal, es una planta tropical y subtropical que posee una distribución geográfica que abarca desde Centroamérica, Sudamérica, hasta países mediterráneos ⁸⁹.

El Nopal o Tuna posee antecedentes de haber sido descubierto a principios del siglo XVI, se registra el consumo de brotes de Nopal por la cultura Maya en el sureste de México en el año 1519, aunque también se han ubicado restos de *Opuntia ficus-indica* en la ciudad de Nazca, en Perú ⁹⁰. Los cladodios fueron usados como alimento muy frecuentemente y novedoso en Europa a finales del siglo XV, especialmente en viajes marinos, motivo por el cual la planta fue propagada por el Mediterráneo; aunque debido al parecido que posee con *Opuntia megacantha*, la cual es una planta nativa mexicana se cree que el origen y posterior domesticación del Nopal se encuentra en la parte central de México ⁹⁰.

2.7.2 Descripción botánica

Opuntia ficus-indica pertenece a la familia de las cactáceas, debido a que posee la característica de soportar tiempos prolongados de sequías, se vuelve una alternativa viable para su producción en zonas desérticas ⁸⁸.

Posee las siguientes características botánicas:

- Los cladodios o también llamados pencas juegan un papel importante en el almacenamiento de agua (llegando a almacenar hasta el agua proveniente del rocío); dado que son usados en tiempos de sequía como reservorios. *Opuntia ficus-indica* posee el metabolismo del ácido crasuláceo, el cual está desarrollado para aguantar periodos prolongados sin agua, los cladodios son de forma oblonga, poseen un tamaño por lo general de 30 - 40 cm de largo y 15 - 25 cm de ancho ^{86,87}.
- El sistema radicular es poco profundo, se encuentra a unos 50 cm de profundidad del suelo, en los primeros 20 cm se desarrollan las raíces capilares.

El sistema radicular se caracteriza por ser xeromórfico, esto quiere decir que la planta está adaptada a medios secos ^{86,87}.

La tolerancia a sequías se debe a:

- a) Las raíces están cubiertas por una capa fina impermeable al agua ⁸⁷.
 - b) Poseen raicillas de lluvia, las cuales se abren al contacto con agua proveniente de lluvia y desaparecen cuando esta se acaba, logrando una rápida adsorción de agua ⁸⁷.
 - Posee células epidérmicas planas y alargadas; la epidermis posee una barrera física que previene los daños exteriores, confiriéndoles una integridad mecánica a la planta ⁸⁷.
- Además, se caracterizan por lo siguiente:
- a) Regula la entrada de dióxido de carbono y la salida de oxígeno de la planta, retiene agua dentro de la planta y la protege de hongos, insectos y luz solar intensa ⁸⁷.
 - Las hojas por lo general varían de tamaño; normalmente son de 20 - 40 cm de largo por 15 - 30 cm de ancho, con un grosor de hasta 5 cm; en su mayoría son de forma elipsoidal, estas se caen a las 4 - 5 semanas dejando en su lugar pequeñas espinas (gloquidios) ⁸⁶.
 - El mucílago de *Opuntia ficus-indica* es un compuesto usado para el almacenamiento de agua de dicha planta; las células mucilaginosas pueden existir tanto en la cáscara como en la pulpa ⁸⁵.

- Las yemas de *Opuntia ficus-indica* son de dos tipos: florecientes y vegetativas, esto quiere decir que puede dar origen a nuevas pencas. Se debe distinguir entre los botones florales de los vegetativos, la diferencia radica en que los florales poseen forma esférica, mientras que los vegetativos poseen forma plana ⁸⁶.
- Las flores son hermafroditas, poseen pistilos (órganos femeninos) y estambres (órganos masculinos); su color puede variar desde amarillo, rojo, naranja y verde. En el periodo de fertilización las flores pueden estar abiertas por 15 días, pero solamente basta un par de los mencionados días para que se concrete dicho periodo, generalmente la fertilización es autógama, pero cuando hay presencia de insectos se vuelve heterógama ⁸⁶.
- El fruto de *Opuntia ficus-indica* es una baya carnosa, mucilaginoso y aterciopelada; está compuesto principalmente por agua (84 - 90 %), azúcares (10 - 15 %), proteína (0.21 - 1.6 %), grasa (0.09 - 0.7 %), fibra (0.02 - 3.15 %) y ceniza (0.4 - 1 %); además posee cantidades sustanciales de ácido ascórbico, vitamina E, carotenoides, fibras, aminoácidos y antioxidantes; el color de la pulpa varía desde amarilla, naranja y roja, esta variabilidad de colores se debe a la combinación de dos pigmentos a base de betalaína y a las propiedades nutricionales y antioxidantes que va a tener el fruto, el tamaño del fruto depende del número de óvulos fecundados y del número de semillas que abordan; el peso del fruto se ve afectado por el orden de producción de las yemas florales y el número de frutos en el cladodio, por lo general varía entre 100 - 150 gr ^{86-89,97}.

2.7.3 Taxonomía

En la actualidad, *Opuntia ficus-indica* se convierte en una alternativa a estudiar por sus grandes potencialidades en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, debido a que partes de la planta como la tuna, cladodios, semillas y flores poseen compuestos bioactivos como carotenoides, vitamina C, antioxidantes, flavonoides, vitamina E; entre otros ⁹³.

Adicionalmente, *Opuntia ficus-indica* se puede convertir en un cultivo que puede ayudar al medioambiente, evitando la desertificación y promoviendo la conservación del agua haciendo frente al cambio climático ⁹⁷.

Tabla 10. Clasificación taxonómica de *Opuntia ficus-indica* ⁶⁸.

Reino	<i>Vegetal</i>
División	<i>Angiospermae</i>
Clase	<i>Dicotyledonea</i>
Orden	<i>Opuntiales</i>
Familia	<i>Cactácea</i>
Género	<i>Opuntia</i>
Especie	<i>Opuntia ficus-indica</i>

2.7.4 Usos de *Opuntia ficus-indica*

- El nopal posee compuestos polifenólicos, los cuales tienen propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Se ha demostrado que dichos compuestos polifenólicos encontrados en el nopal son antioxidantes más eficientes que las vitaminas, ya que son capaces de retrasar los efectos prooxidativos en las proteínas, DNA y lípidos por la generación de radicales estables ⁸⁹⁻⁹¹.
- Las flores y frutas son usados como agentes antiulcerogénicos, antidiarreicos y antihemorroidales ⁸⁹.
- De los cladodios se pueden aislar alcaloides y flavonoides, estos compuestos junto con los polisacáridos que naturalmente se encuentran dentro de los cladodios brindan propiedades antidiabéticas ^{89,95}.
- *Opuntia ficus-indica* posee betalaína, el cual es un compuesto que posee altas concentraciones de nitrógeno y que también es soluble en agua; la betalaína se encuentran en forma de ácido betalámico, que viene a ser el compuesto cromóforo responsable del color lo que conllevará que sea usado como colorante natural ⁹¹.
- Las semillas constituyen entre 2 - 3.8 % del peso total del fruto; el aceite extraído de estas es rico en ácidos grasos poliinsaturados, siendo el ácido linoleico el principal aceite, seguido por los ácidos oleico y palmítico ⁹³.

2.7.5 *Opuntia ficus-indica* en el tratamiento de aguas

2.7.5.1 Experiencias internacionales del uso de mucílago de *Opuntia ficus-indica*.

Según Deshmukh, S.O. & Hedao, M.N., los desechos agrícolas de *Opuntia ficus-indica* pueden servir como coagulantes para la reutilización de aguas residuales, dicho estudio se realizó en la India (2019), se investigó el poder biocoagulante de las pencas de *Opuntia ficus-indica* sobre aguas residuales municipales, para ello se determinaron sus efectos sobre el pH, DQO, sólidos en suspensión y turbidez, donde se alcanzó porcentajes de 70 - 90 % de remoción a dosis de 30 - 100 mg/L ⁵⁷.

Para el caso de Nougbo, Y. et al, realizaron un proyecto en la República de Benín (2013), estudiaron las propiedades coagulantes de la especie de cactus *Opuntia dillenii*, para lo cual se determinó la remoción de turbidez en aguas superficiales en donde se tuvo una eficiencia de 89 %, mientras que para el caso de los sólidos suspendidos fue de 93 %, para ambos casos se utilizó una dosis de 4 - 10 mg/L; en cambio, cuando se agregaban mayores dosis del coagulante natural los porcentajes de remoción de turbidez y de sólidos suspendidos llegaban a sobrepasar el 95 % de eficiencia ⁵⁸.

Asimismo, Bouatay, F. & Mhenni, F. (2014), en Túnez, estudiaron el mucílago de la penca de *Opuntia ficus-indica* para determinar sus propiedades coagulantes/floculantes en combinación con el sulfato de aluminio para el tratamiento de aguas residuales textiles, determinaron la reducción de 91.66 %, 99.84 % y 88.76 % para turbidez, decoloración y DQO respectivamente; se debe agregar que las condiciones del estudio fueron a un pH de 7.25; una dosis de coagulante de 40 mg/L; tiempo y velocidad de mezclado de 11 minutos y 30 RPM respectivamente ⁵⁹.

Por otro lado, Taa, N. et al, en el año 2016, estudiaron el efecto de un biofloculante obtenido a partir de *Opuntia ficus-indica* para la remoción de cromo en aguas residuales en Marruecos; para ello usaron dos muestras diferentes, una con solución sintética que contenía una concentración de cromo entre 100 - 500 mg/L y la otra proveniente de una curtiembre a 90 - 900 mg/L; los resultados muestran que el coagulante natural reduce la carga del metal en un 99.9 % ⁶⁰.

En Sudáfrica, Gandiwa, B.I. et al., (2020) realizaron un estudio comparativo sobre mezclas de sulfato de aluminio con dos coagulantes naturales obtenidos a partir de *Moringa oleífera Lam* y *Opuntia ficus-indica* en la reducción de turbidez en aguas crudas; se determinó que las mezclas de sulfato de aluminio (13 %), *Moringa oleífera Lam* (42.6 %) y *Opuntia ficus-indica*

(44.4 %) con una dosis total del coagulante de 45 mg/L reducía la turbidez en 2.7 NTU, dicho resultado se encuentra dentro del rango para agua potable según la OMS ⁶¹.

Finalmente, Amira, A. et al., en el año 2017 (Argelia) investigaron nuevas alternativas para el tratamiento de aguas, las cuales deberían ser amigables con el medioambiente, la investigación se realizó a partir de la penca de *Opuntia ficus-indica*; se obtuvo una remoción de turbidez de 4 NTU, debido a este resultado la idea de obtener un floculante natural a partir de *Opuntia ficus-indica* se vuelve un tema interesante para seguir investigando ⁶².

2.7.5.2 Experiencias nacionales del uso de mucílago de *Opuntia ficus-indica*.

Según López Pérez, M. (2018), realizó la evaluación del uso de *Opuntia ficus-indica* como coagulante natural en el tratamiento de aguas; dicha investigación se hizo en la Universidad Agraria La Molina y contó con muestras de aguas sintéticas a diferentes medidas de turbiedad (20, 50, 100, 300 y 500 NTU); el coagulante natural obtenido se comparó con sulfato de aluminio. Se determinó que al aplicar el coagulante mediante la prueba de jarras se logró un porcentaje de remoción de turbidez entre 58 - 86 %, el pH utilizado para la evaluación de todas las muestras fue de 9; al comparar ambos coagulantes se observó que el sulfato de aluminio poseía una mejor remoción de color e incrementaba la conductividad y disminuía el pH de las muestras; mientras que el coagulante natural no alteraba ninguno de los citados parámetros ⁶⁶.

Por otro lado, Inga Díaz, G. (2019), en la Universidad Nacional del Centro del Perú realizó el estudio de la disminución de coliformes totales y turbidez usando coagulantes naturales obtenidos de la penca de *Opuntia ficus-indica* para el tratamiento de las aguas del río Cunas; se realizaron tres distintas experiencias, de las cuales la última tuvo un indicativo positivo en cuanto a la reducción tanto de coliformes como turbidez obteniendo los siguientes resultados: 89 % de reducción de coliformes totales (con una dosis de coagulante de 5 mg/L) y 89.69 % de disminución de turbidez (con una dosis de 60 mg/L) ⁶⁷.

Por último, en la tesis desarrollada por Pinto Guzmán, A.L. (2017) en la Universidad Católica de Santa María, se evaluó y comparó la efectividad de dos coagulantes naturales obtenidos a partir de *Aloe Vera* y *Opuntia ficus-indica* frente a la mezcla de ambas para evaluar aguas de la industria de teñido de ropa; se trabajó con cinco distintas concentraciones (100 gr/200 mL, 200 gr/200 mL, 300 mg/200 mL, 400 mg/200 mL y 500 mg/200 mL); además se determinaron algunos parámetros como conductividad, pH, sólidos totales, sólidos sedimentables y turbidez. Al finalizar dicha tesis se determinó que el coagulante obtenido a partir de mucílago de penca de tuna poseía resultados positivos a la concentración de 500 mg/200 mL ⁶⁸.

2.7.6 Características coagulantes/floculantes del mucílago de *Opuntia ficus-indica*

- *Opuntia ficus-indica* dentro de su composición posee al ácido galacturónico, el cual es un monosacárido y además es el ingrediente activo que proporciona la propiedad coagulante/floculante a la planta, dicho ácido cuando actúa de manera independiente puede reducir más del 50 % de turbidez en el agua ^{67,85}.
- El ácido galacturónico se encuentra dentro del mucílago como un polímero, tomando el nombre de ácido poligalacturónico, se almacena en la parte interna de la especie como una sustancia viscosa ⁶⁷.
- *Opuntia ficus-indica* produce una sustancia parecida a la goma denominada mucílago, el cual es un polisacárido que cuenta con una estructura de hasta 30 000 moléculas de monosacáridos ⁹².
- La principal función del mucílago es la retención y acumulación de agua, esto es debido a que tiene la propiedad de formar redes moleculares que van a retener el agua, pero además se ha encontrado que posee propiedades floculantes para la remoción de turbidez en aguas residuales ⁹².
- Se ha reportado que el mecanismo de coagulación que posee el mucílago de *Opuntia ficus-indica* se da por adsorción y puente, es decir, el coagulante proporciona polímeros aniónicos que van a presentar grupos activos que interactuarán con las partículas coloides, dejando que el resto de la molécula se extienda y pueda a su vez entrar en contacto con nuevas partículas coloides formando puentes ^{66,67,157}.
- Además, se sabe actualmente que todas las plantas que tengan constituyentes mucilaginosos van a tener propiedades coagulantes/floculantes, esto es debido a la presencia del ácido poligalacturónico, el cual es el ingrediente activo que se encuentra en el mucílago y que será el responsable de dicha propiedad coagulante/floculante; dicho ácido posee una estructura aniónica y contiene grupos carboxílicos a lo largo de su cadena, lo cual va a involucrar la adsorción entre los mencionados grupos funcionales y las partículas coloides ^{98,164}.
- Los cladodios poseen la capacidad de flocular las partículas suspendidas en el agua, además tienen la propiedad de bajar la capacidad microbiana de aguas contaminadas, dado que las partículas finas en suspensión atraen y retienen bacterias y virus en su superficie ⁹⁴.
- Los cladodios son utilizados como coagulantes naturales en la clarificación de aguas, eliminando los sólidos en suspensión y las floraciones de cianobacterias; también se han

realizado estudios en donde se ha determinado que *Opuntia ficus-indica* posee un similar poder de coagulación que *Moringa oleífera* Lam, la cual es una planta altamente utilizada por sus propiedades coagulantes en el tratamiento de aguas residuales ⁹⁶.

- *Opuntia ficus-indica* está compuesto por celulosa (21 %), mucílago (18.8 %), pectina (14.84 %) y proteína (2.9 - 6 %); dicha composición ha despertado el interés en varias investigaciones científicas, dado que se ha encontrado que poseen propiedades adsorbentes para metales pesados tales como cadmio, arsénico, cobre y plomo ⁹⁵.
- Para el tratamiento de aguas residuales, el uso del mucílago de *Opuntia ficus-indica* como coagulante/floculante natural, es una alternativa con una efectividad elevada, pero en menor proporción que los coagulantes químicos tales como las sales de aluminio o sales férricas ⁶⁸.

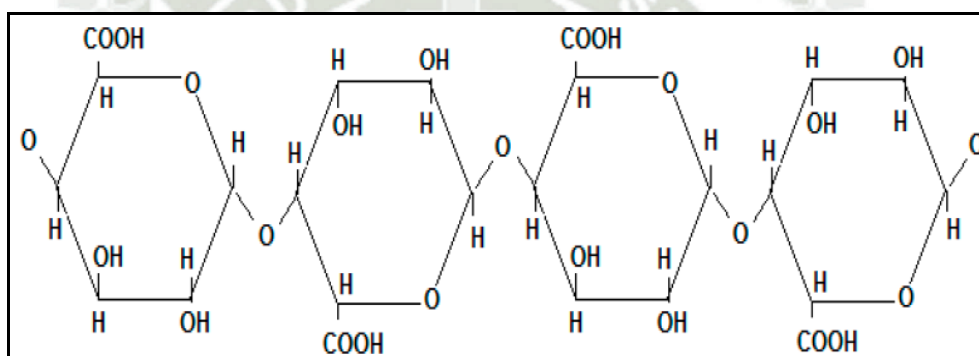


Figura 6. Estructura química del ácido poligalacturónico (ingrediente activo del mucílago de *Opuntia ficus-indica*) ⁶⁷.

2.8 Coagulación

2.8.1 Definición

Proceso fisicoquímico usado para eliminar microorganismos, turbidez, materia orgánica coloidal, sólidos en suspensión y reducir el contenido de iones metálicos del agua mediante la desestabilización y posterior neutralización de cargas usando un agente coagulante, el cual tiene la función de remover los factores que promuevan la estabilidad de dichas partículas para poder mejorar la calidad de la muestra tratada, además de promover la aglomeración de las partículas coloides que van desde un rango entre $0.001 - 1 \mu\text{m}$ ^{100,101,103}.

Las partículas suspendidas, o también denominadas partículas coloidales, van a tener características propias como carga, tamaño, densidad y forma; también hay que tener en cuenta que dichas partículas en el agua van a presentar carga negativa en su superficie, razón por la

cual se van a repeler cuando estén en contacto entre ellas; debido a todo lo anteriormente descrito se torna importante la elección del tipo de coagulante y floculante a escoger. Los coloides son partículas de muy bajo diámetro, son responsables de la turbidez o color del agua superficial debido a su baja sedimentación, es por ello que se utilizan procesos como la coagulación y floculación para poder eliminarlas; por lo general las partículas coloides poseen un comportamiento que depende de su origen y naturaleza ^{63, 99, 117, 150}.

Dependiendo de las características del agua a tratar, tales como pH, temperatura, cantidad de partículas, alcalinidad, color, turbiedad, sólidos totales, sólidos disueltos, por mencionar algunas; el proceso de coagulación funcionará rápidamente, tomando desde décimas de segundo, dicho proceso se llevará a cabo en una unidad de tratamiento de agua denominada mezcla rápida ⁶³.

La adición de un coagulante neutraliza las cargas, generando un colapso de la “nube de iones” que rodean a las partículas coloides de modo que se puedan aglomerar. La figura 7 muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo la aglomeración de las partículas coloidales formando flóculos ¹⁵².

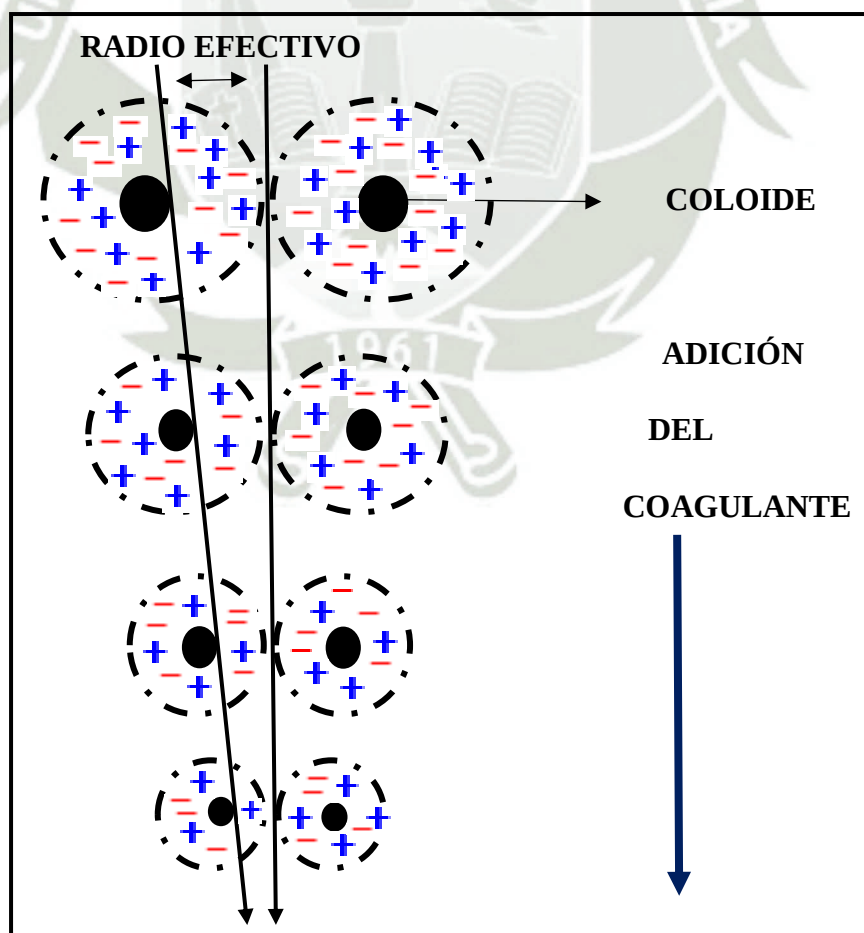


Figura 7. Proceso de coagulación ¹⁵².

2.8.2 Características del proceso de coagulación

- Un coagulante es una sustancia química que se agrega al agua para generar la desestabilización de partículas coloides y hacer que se unan entre sí, formando una partícula más grande, la cual se asentará debido a la gravedad ¹¹¹.
- La coagulación posee ventajas como accesibilidad de costo, facilidad de manejo y disponibilidad, pero a veces tiene el inconveniente de ser lenta, razón por la cual se agregan sustancias químicas llamadas floculantes, las cuales aceleran el proceso y aumentan el tamaño de los flóculos generados ¹¹¹.
- Un mal proceso de coagulación puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua representando gastos no justificados de operación ¹⁵⁰.
- Es un método universal, dado que elimina una cantidad grande de sustancias de diversas naturalezas y distintos pesos, a un menor costo en comparación a otros métodos ¹⁵⁰.
- Los distintos contaminantes presentes en las aguas residuales pueden disminuir la eficacia de los coagulantes, por dicha razón es importante caracterizar el agua a tratar para determinar las condiciones óptimas de coagulación ¹¹³.
- La coagulación viene a ser el resultado de dos fenómenos:
 - a) *Químico*; reacción del coagulante con el agua a tratar y formación de especies hidrolizadas de carga positiva ¹⁵⁶.
 - b) *Físico*; transporte de dichas especies hidrolizadas ¹⁵⁶.
- La coagulación se basa fundamentalmente en los siguientes pasos:
 - a) En el primer paso, el coagulante elegido se agrega a las aguas residuales a tratar; se debe recordar que el agua cuando se encuentra en un rango de pH entre 5 - 9 va a poseer una carga superficial negativa debido a la estabilidad de los coloides, para romper dicha estabilidad se requiere de un mecanismo desestabilizador que permita neutralizar las cargas mediante una adsorción de contraiones. La adsorción física y química de los compuestos orgánicos ocurre en la superficie del coagulante ^{102,106,110}.
 - b) El paso número dos se basa en la mezcla rápida entre el coagulante y el agua residual para lograr que los coagulantes sean distribuidos de forma uniforme, los iones metálicos y las moléculas solubles forman complejos insolubles y precipitados ^{102,110}.
 - c) El tercer paso viene a ser una nueva mezcla entre el coagulante y el agua, pero esta vez de manera lenta para poder lograr la formación de precipitados sólidos insolubles; los coagulantes catiónicos proporcionan su carga positiva para contrarrestar la carga negativa que poseen los coloides, por lo cual se va a producir una neutralización de

cargas; además, como resultado de esto se van a iniciar impactos entre las partículas suspendidas, lo que generará la formación de partículas de mayor tamaño ^{105,110,111}.

- d) Finalmente, el coagulante va a precipitar atrapando impurezas; una vez que se tenga las partículas coaguladas, estas deberán ser eliminadas por un subsecuente proceso que pudiera ser filtración o sedimentación ^{105,110,111}.

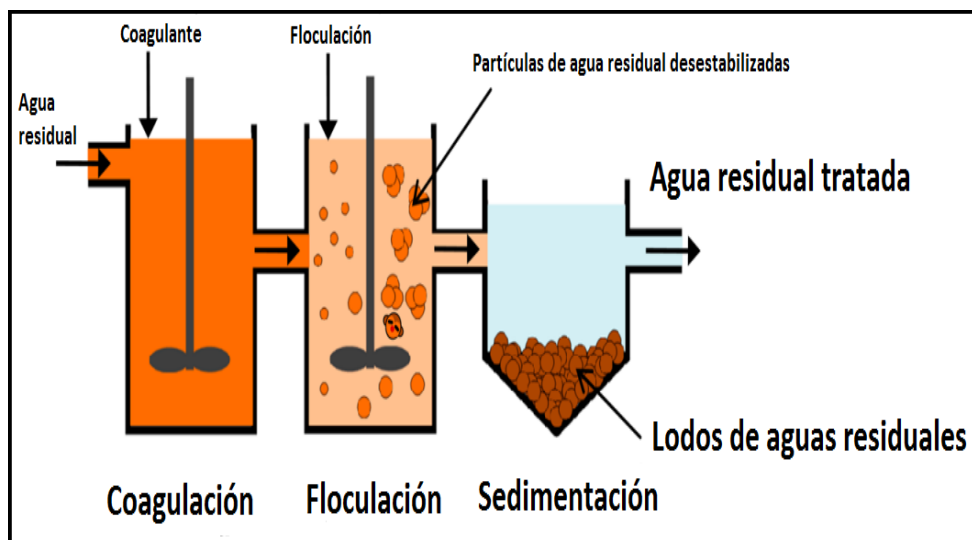


Figura 8. Esquemización del proceso de coagulación/floculación en aguas residuales ¹²³.

2.8.3 Mecanismos de coagulación

2.8.3.1 Compresión de la doble capa eléctrica.

Cuando se acercan dos partículas similares, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, el potencial de difusión de dicha fuerza está en función a la distancia que los separa y cae rápidamente cuando se incrementan iones de cargas opuestas, lo cual solo se consigue con los iones del coagulante agregado ^{14,63,150}. La superficie de las partículas contaminantes por lo general está cargada negativamente, cuando se produce la interfaz sólida - líquido los iones positivos presentes en el agua se van a adherir a la partícula formando la doble capa eléctrica. Los iones negativos de los coloides se acercan a los iones positivos y a su vez van a repeler a los iones que posean la misma carga que la partícula eliminando la barrera de energía ^{64,149}. Por otro lado, existe entre las partículas un potencial de atracción o fuerzas de atracción denominado fuerzas de Van der Waals que dependen de los átomos que constituyen las partículas y de la densidad de ellos. Contrariamente a las fuerzas de repulsión, las fuerzas de Van der Waals no se verán afectadas por las características de la solución. Si la distancia que separa a las partículas es superior a la distancia máxima a la cual empieza la floculación, entonces no habrá atracción entre las partículas ^{14,63,152}.

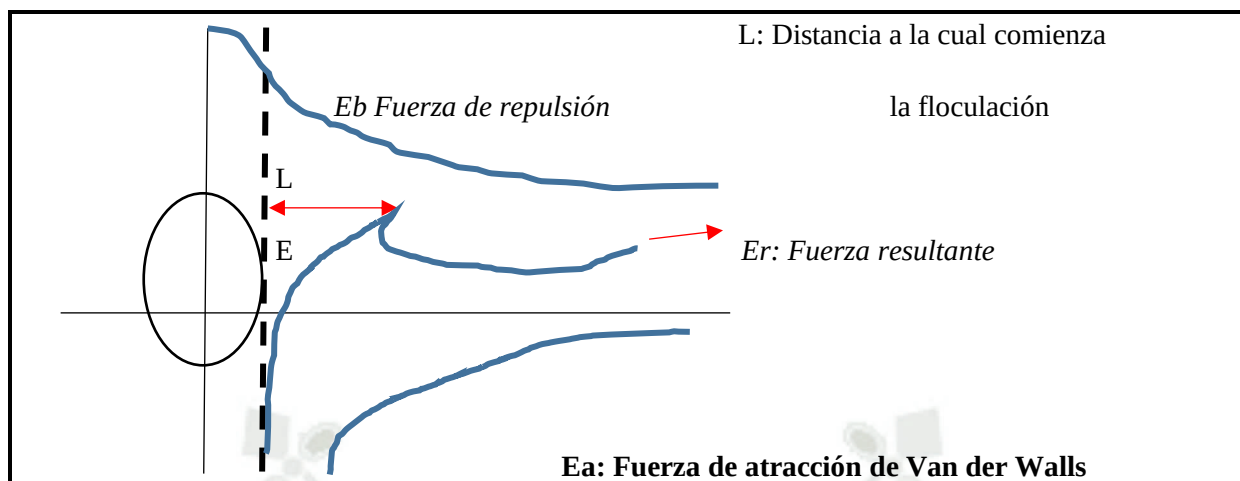


Figura 9. Fuerzas de atracción y repulsión ¹⁵².

2.8.3.2 Adsorción y neutralización de cargas.

Se fundamenta en la anulación del potencial obtenido por la adición de coagulantes; las partículas coloides poseen carga negativa en su superficie (cargas primarias), dichas cargas atraen a los iones positivos que se encuentran en solución dentro del agua, formándose la primera capa adherida al coloide; para romper la estabilidad de los coloides deben ser neutralizados por la adición de iones de cargas opuestas que tienen la capacidad de ser directamente adsorbidas en la superficie del coloide ^{63,64,150}. Cuando se adiciona un exceso de coagulante, se produce la reestabilización de la carga de la partícula, esto se debe a que el exceso del coagulante es adsorbido en la superficie de la partícula, generando una carga invertida a la carga original ¹⁵².

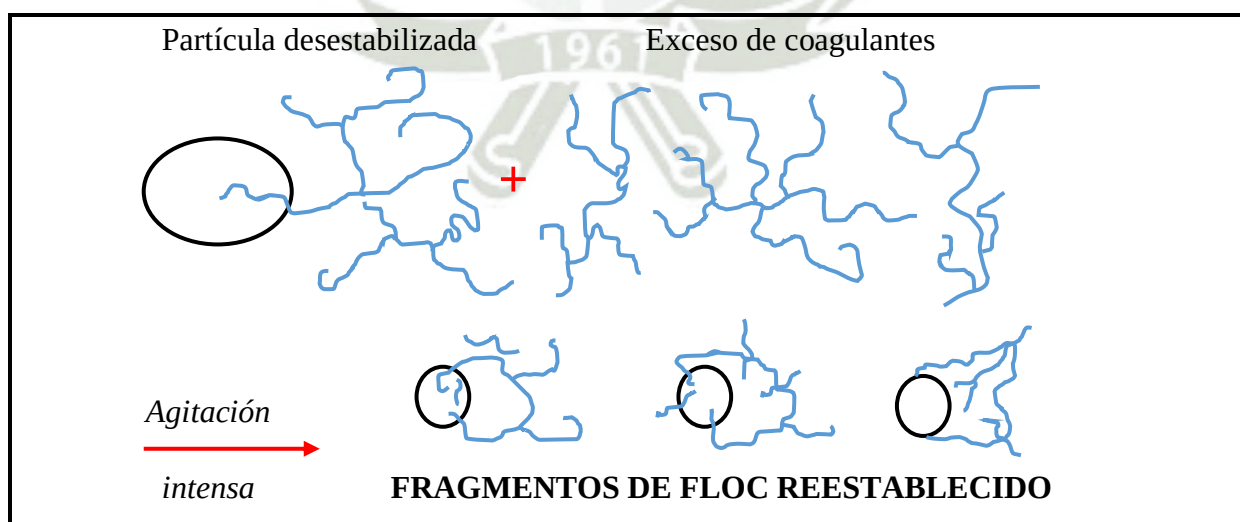


Figura 10. Reestabilización de partículas ¹⁵².

2.8.3.3 Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado.

Las partículas coloides cuando se encuentran desestabilizadas pueden ser atrapadas dentro de un flóculo, siempre y cuando se adicione la suficiente cantidad de coagulante, por lo general se utilizan coagulantes tales como sulfato de aluminio y cloruro férrico, los cuales poseen iones Al^{3+} y Fe^{3+} , dichos iones forman precipitados cuando están en contacto con el agua, el flóculo generado se encontrará formado por hidróxidos de los coagulantes $[\text{Al}(\text{OH})_3 - \text{Fe}(\text{OH})_3]$ ^{63,64,151}. La presencia de ciertos aniones y de las partículas coloidales aceleran la formación del precipitado, la partícula coloidal actúa como un sitio nuclear para que dicho precipitado se forme quedando atrapado el coloide dentro de él ^{64,151}. Las partículas tienen el rol de anillo durante la formación del flóculo, este fenómeno tiene una relación inversa entre la turbidez y la concentración de coagulante a utilizar, dado que una concentración importante de partículas en suspensión puede requerir menos cantidad de coagulante ¹⁵⁰.

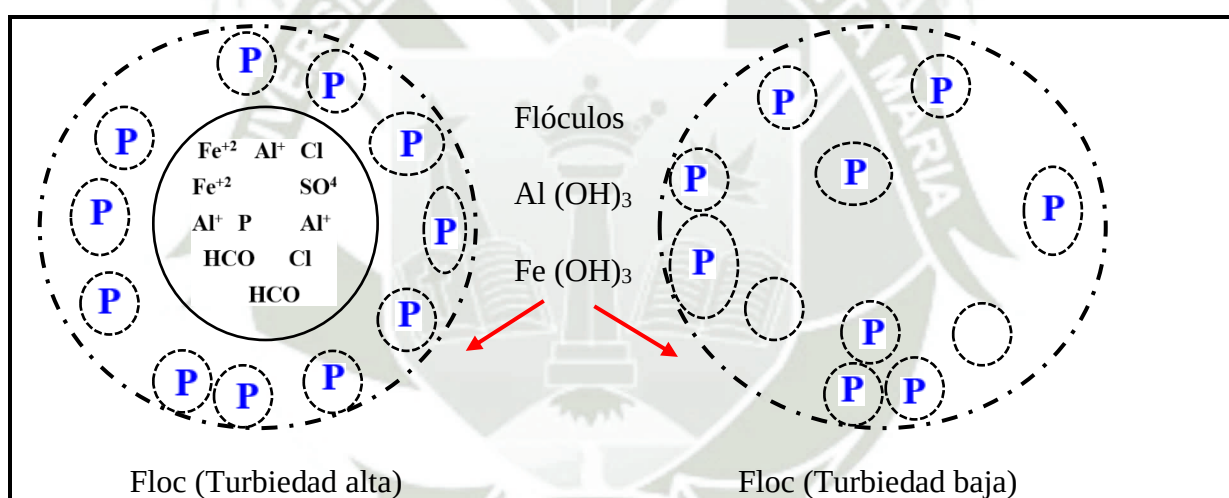


Figura 11. Mecanismo de atrapamiento de las partículas dentro de un floc ¹⁵⁷.

2.8.3.4 Adsorción y puente.

Es un tratamiento económico que utiliza polímeros cuando las partículas están cargadas negativamente; las moléculas muy largas de dichos polímeros contienen grupos químicos que pueden adsorber las partículas coloides, las partículas coloides pueden ser adsorbidas en las extremidades de los polímeros, quedando libres los otros sitios de dicho polímero ^{63,64}. Una molécula “puente” puede atraer partículas coloides a sus sitios activos, los cuales son lugares dentro de la molécula que atrae una partícula coloide mediante enlaces químicos o por atracción física. Si los sitios activos se encuentran juntos puede ocurrir la coagulación de los coloides y también puede ocurrir un movimiento cinético en donde distintos sitios del puente se enlacen entre sí haciendo que los coloides se junten unos a otros ⁶⁴.

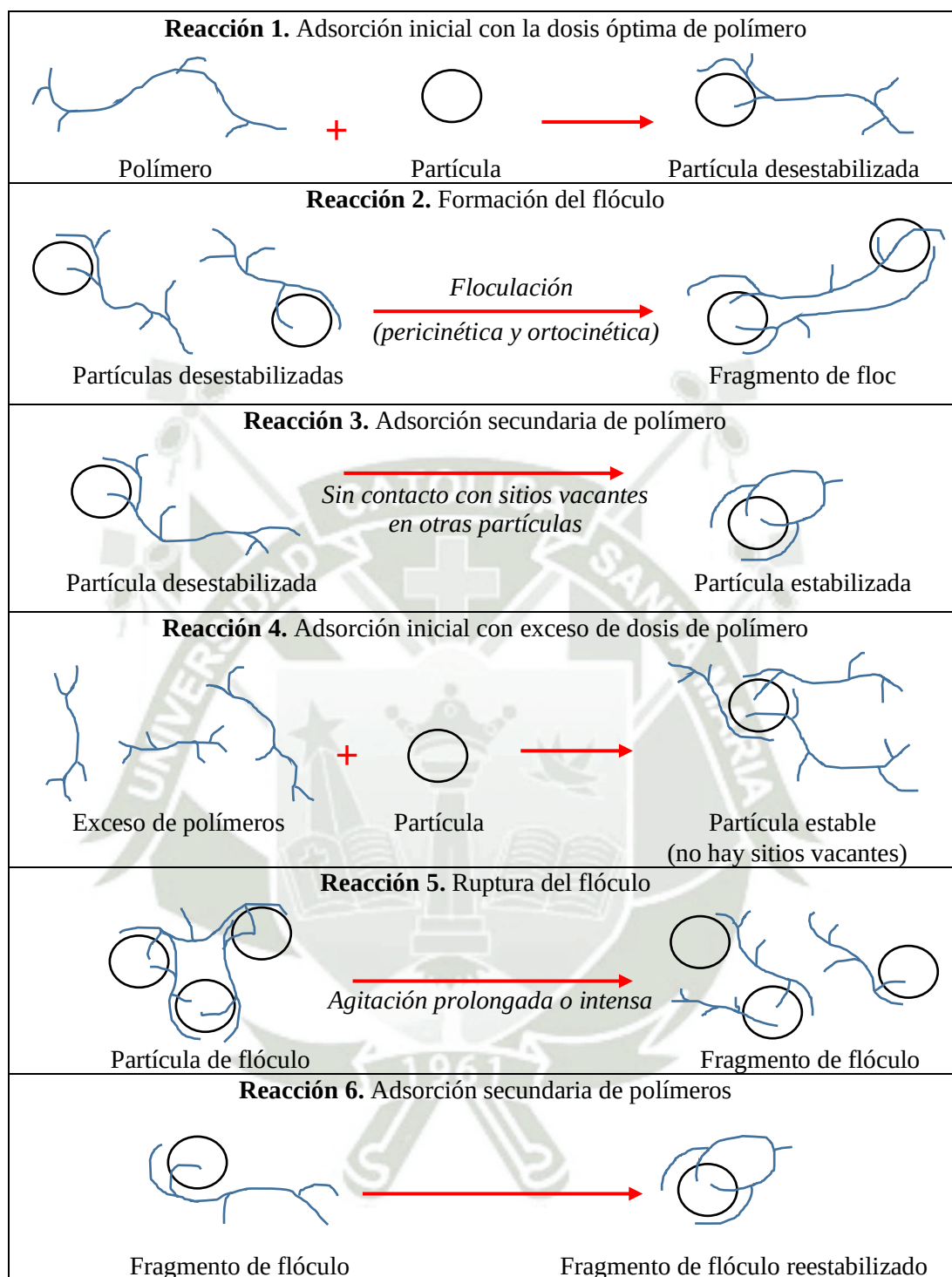


Figura 12. Representación esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de coloides mediante polímeros ¹⁵⁶.

2.8.4 Tipos de coagulación

2.8.4.1 Coagulación por adsorción.

Se presenta cuando se tratan aguas con altas concentraciones de partículas coloidales, por ende, alta turbidez, cuando se agrega el coagulante sus productos solubles son adsorbidos por los coloides, generando de manera casi inmediata flóculos ¹⁴.

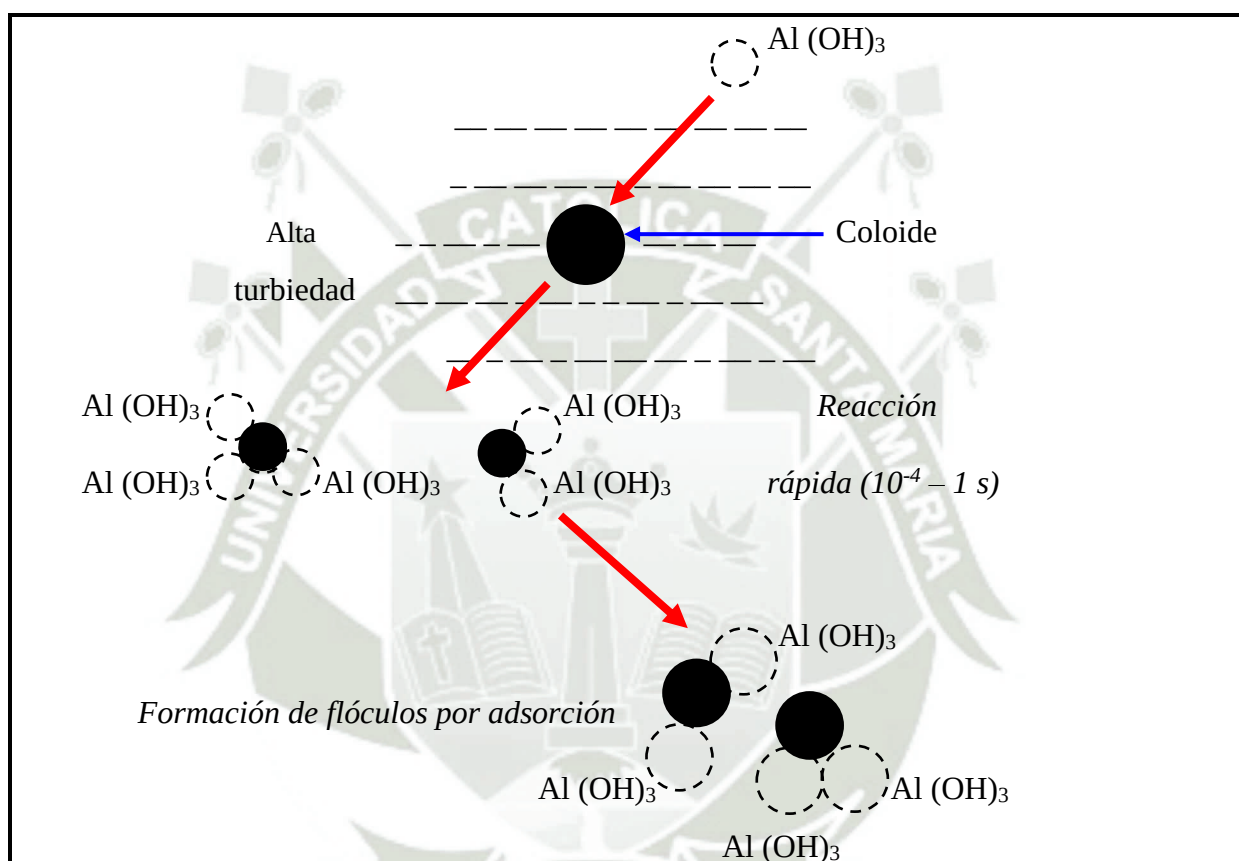


Figura 13. Coagulación por adsorción ¹⁵⁶.

La reacción producida se debe a la gran cantidad de partículas coloidales presentes, las cuales al encontrarse muy próximas entre ellas tendrán una fuerza de atracción elevada, lo que favorecerá el proceso de coagulación ⁶⁶.

2.8.4.2 Coagulación por barrido.

Coagulación presente cuando el agua a tratar es clara (presenta bajas cantidades de coloides), las partículas coloidales son entrampadas al generarse una sobresaturación de precipitado de sulfato de aluminio o cloruro férrico, se va a producir interacciones entre el coloide y el hidróxido precipitado, dicho precipitado va a arrastrar físicamente al coloide ^{14,156}.

En este caso, debido a la distancia de las partículas, las fuerzas de atracción son menores, se requerirá una mayor cantidad de coagulante y energía para desestabilizarlas ⁶⁶.

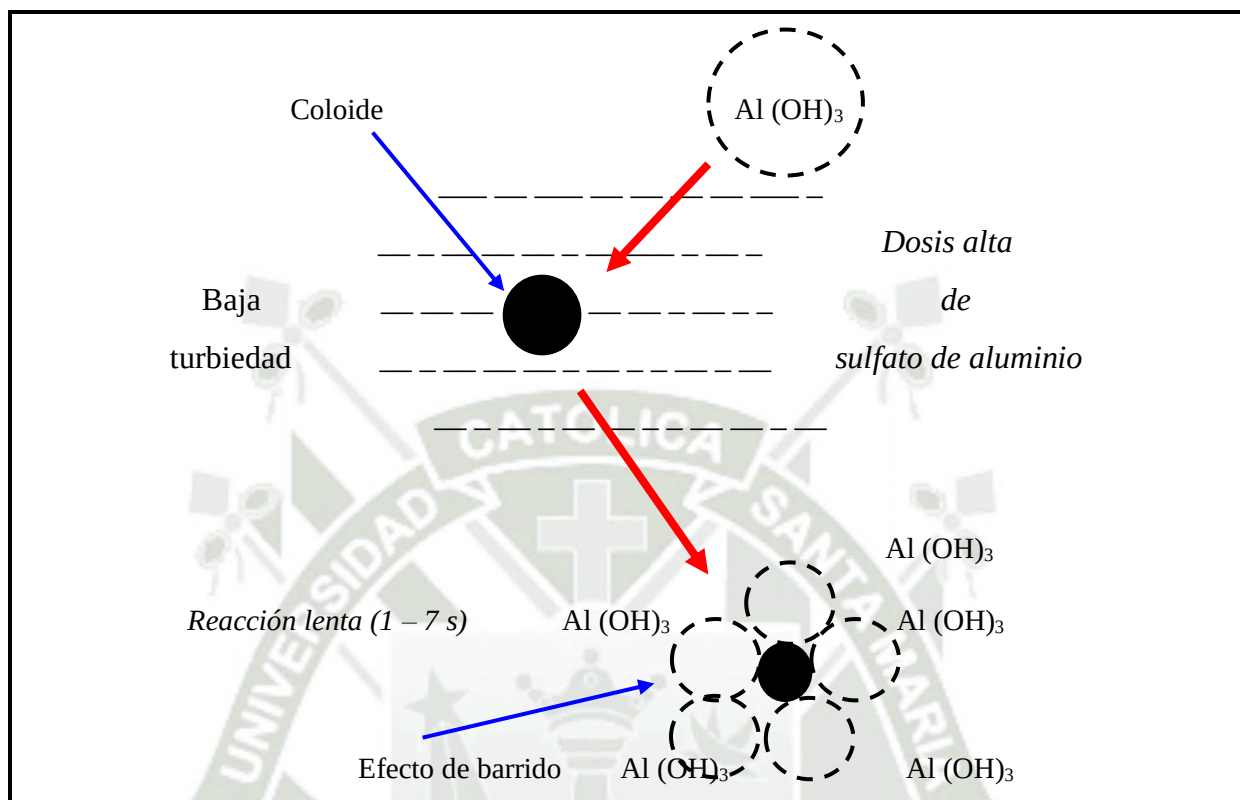


Figura 14. Coagulación por barrido ¹⁵⁶.

2.8.5 Fases de la coagulación

El proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto, consta de cinco fases, las cuales se desarrollan en forma consecutiva y casi simultáneamente; en donde además se van a desarrollar procesos químicos y físicos ^{66,123}.

- **Fase 1.** *Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión;* el coagulante adicionado va a reaccionar con las moléculas del agua, produciendo la desestabilización de las partículas mediante la adsorción específica de los productos de hidrólisis (generalmente con carga positiva), dicho proceso ocurre en la doble capa que rodea a los coloides negativamente cargados (compresión de la doble capa o neutralización de cargas) ^{66,123}.
- **Fase 2.** *Formación de compuestos químicos poliméricos;* ocurren debido a las reacciones de la anterior fase, estas cadenas llegan a tener un extremo activo primordial en el proceso para seguir reaccionando ^{66,123}.

- **Fase 3.** *Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides*; en esta fase los extremos cargados se mantienen activos para formar nuevas uniones ^{66,123}.
- **Fase 4.** *Adsorción mutua de coloides*; acá se produce la adhesión de los extremos por los coloides que tienen deficiencia de carga, se forman masas esponjosas de partículas de la suspensión ligadas por cadenas poliméricas ^{66,123}.
- **Fase 5.** *Acción de barrido*; se produce la precipitación de los coágulos formados por un efecto de barrido, se van recogiendo otros coloides ^{66,123}.

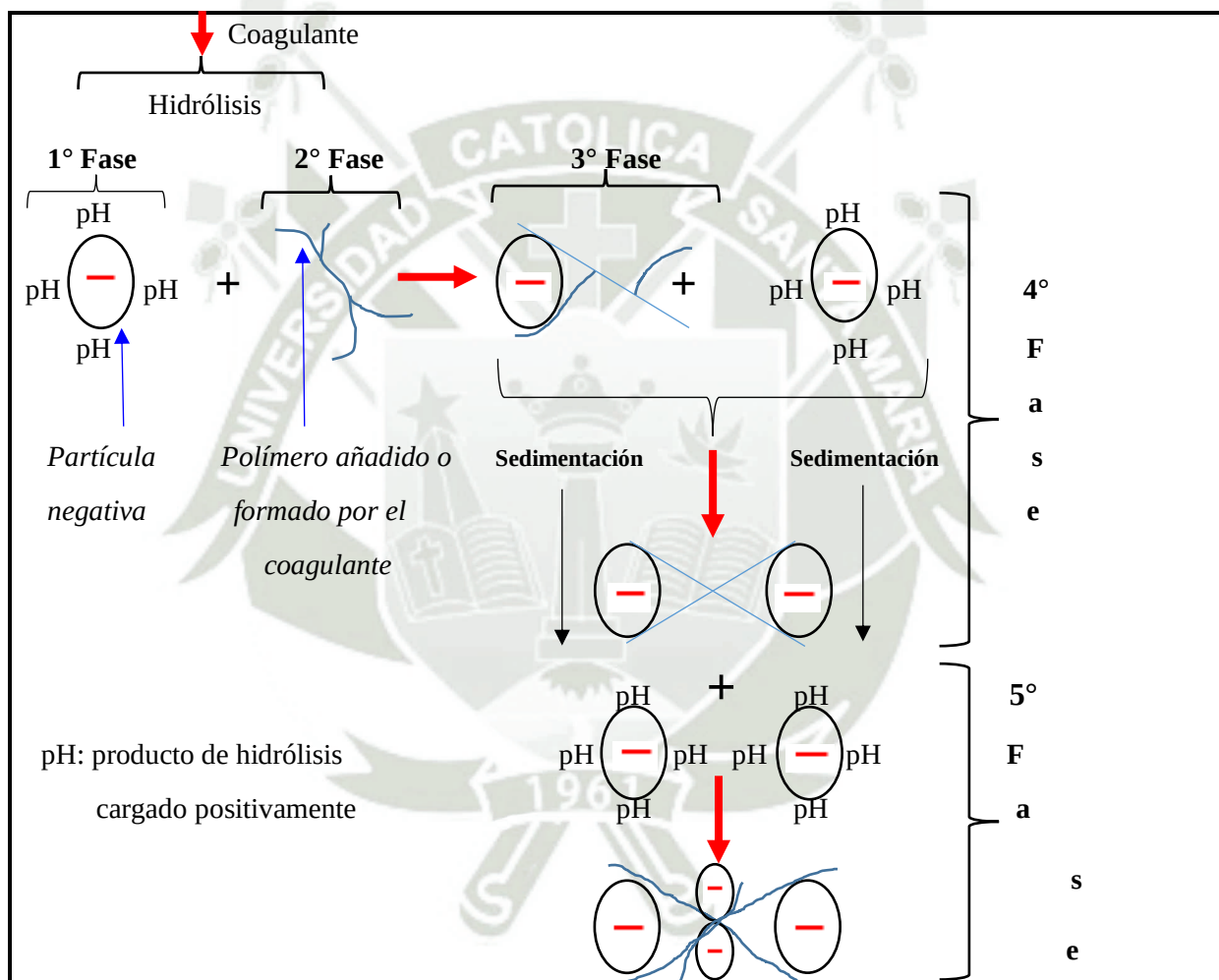


Figura 15. Fases de la coagulación ⁶⁶.

2.8.6 Factores influyentes en la coagulación

2.8.6.1 pH.

Influye en la precipitación de los coloides, en el tiempo de floculación y en la carga sobre las partículas coloides; el rango de pH óptimo para remover coloides por lo general se encuentra entre 5.0 - 7.5 (cuando se usan coagulantes metálicos, cuya sensibilidad al pH y alcalinidad es

alta); cuando el pH no es óptimo la coagulación es muy deficiente pudiendo generar residuos indeseados ¹²³.

2.8.6.2 Temperatura.

Factor que se encuentra estrechamente relacionado con la densidad y viscosidad en la coagulación y floculación del agua, si se produce una variación de 1 °C la densidad se verá modificada y afectará la energía cinética de las partículas en suspensión; la coagulación será más lenta, dado que temperaturas elevadas no favorecen dicho proceso; por otro lado, cuando la temperatura es baja la viscosidad aumenta y se dificulta la sedimentación del flóculo ^{63,64}.

La variación de temperatura presenta dos regiones muy marcadas:

- La primera región se encuentra entre 0 – 10 °C; a medida que el agua se acerca a 0 °C la remoción de turbidez disminuye, se estaría impidiendo el acercamiento de las partículas para su desestabilización; además, la viscosidad del agua aumenta, con ello el transporte de las partículas queda nulo, por consiguiente, la agitación externa no es suficiente para lograr la aglomeración de partículas pequeñas, en este caso el rango de pH óptimo va a disminuir ⁶⁶.
- La segunda región se encuentra entre 10 – 40 °C; en dicha región la remoción de turbidez aumenta, esto se debe al incremento de las colisiones entre las partículas ⁶⁴.

2.8.6.3 Dosis óptima del coagulante.

Factor que tiene relación directa con la eficiencia de la coagulación, la influencia de dicho factor se debe a la variación de la turbidez residual en función a la dosificación del coagulante ⁶⁶.

- Una dosis pequeña del coagulante no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microflóculos es muy escasa y por consiguiente la turbidez residual es elevada ^{63,64}.
- Una dosis elevada del coagulante genera la inversión de la carga de la partícula, produce la formación de grandes cantidades de microflóculos muy pequeños, con velocidades de sedimentación extremadamente bajas, por consiguiente, la turbidez residual se eleva ^{63,64}.

Además, se ha determinado que la dosificación óptima de los coagulantes presenta una curva que posee 4 zonas:

- *Zona 1*; la dosis del coagulante es insuficiente para desestabilizar las partículas, por ende, no se produce la coagulación ⁶⁶.
- *Zona 2*; al aumentar la dosis del coagulante se genera una rápida aglutinación de coloides ⁶⁶.
- *Zona 3*; de continuar con el aumento de la dosis del coagulante, se pueden reestabilizar los coloides bajo ciertos rangos de pH ⁶⁶.
- *Zona 4*; cuando se aumenta incluso más la dosis del coagulante, se creará una sobresaturación, produciendo una rápida precipitación del coagulante, generando un efecto de barrido, arrastrando las partículas que conforman la turbidez en su descenso ⁶⁶.

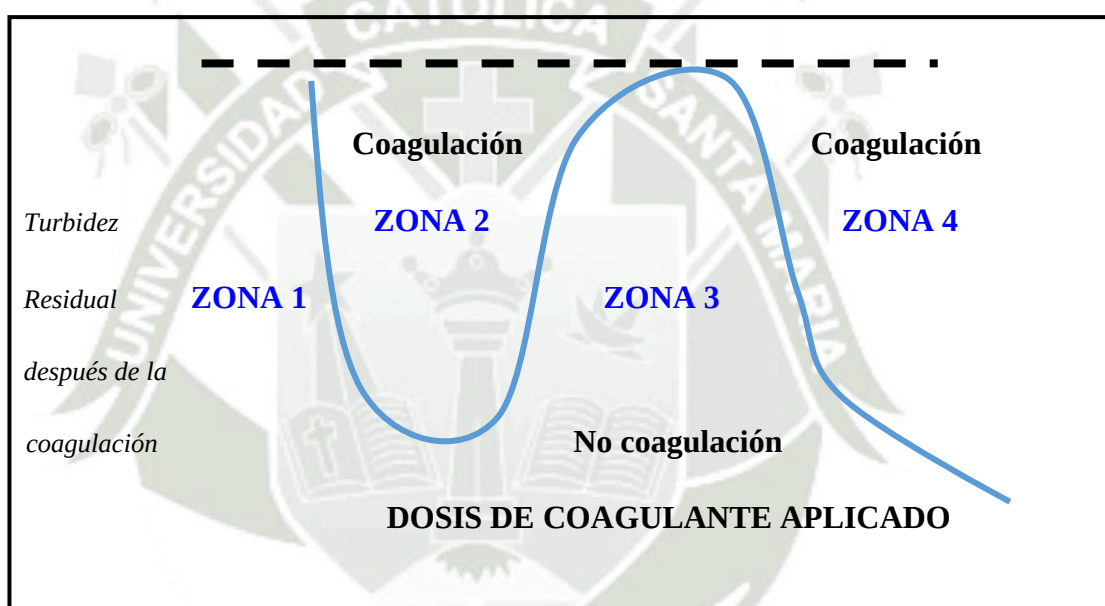


Figura 16. Zonas de coagulación ⁶⁶.

2.8.6.4 Condiciones de mezclado.

Para que se genere una adecuada coagulación se debe tener los siguientes factores físicos idóneos:

- Intensidad de agitación; deberá ser intensa para distribuir homogéneamente el coagulante y así poder entrar en contacto con las partículas antes que se complete la reacción ^{64,66}.
- Tiempo de mezclado; deberá ser el suficiente para un mezclado adecuado ^{64,66}.
- Sistema de aplicación del coagulante; deberá proporcionar un caudal constante y fácilmente regulable ^{64,66}.
- Punto de aplicación; deberá ser donde se produzca la mayor turbulencia ^{64,66}.

- Tipo de mezcla; la coagulación presenta dos tipos de mezcla:
 - a) En la primera etapa conocida como *Mezcla Rápida*; la mezcla es de corta duración (máximo de 60 segundos) y enérgica, su objetivo es dispersar la totalidad del coagulante dentro del agua a tratar ⁶⁴.
 - b) La segunda etapa conocida como *Mezcla Lenta*; se caracteriza por una agitación lenta, su objetivo es generar microflóculos ⁶⁴.

2.8.7 Tipos de coagulantes

2.8.7.1 Coagulantes naturales.

Productos naturales obtenidos generalmente a partir de materiales de origen vegetal o animal, dichos coagulantes están teniendo un gran interés en la actualidad debido a su potencial no invasivo hacia el medioambiente. Los coagulantes naturales se encuentran libres de toxicidad, dado que poseen compuestos bioactivos como proteínas, polisacáridos, mucílagos, polielectrolitos, por citar algunos ^{66,106,112,123}.

Los polielectrolitos son polímeros con varias unidades de cadena repetitiva que poseen grupos electrolitos, dichos polímeros están compuestos por monómeros; los citados polielectrolitos poseen grados de polimerización debido a las cadenas poliméricas; los mencionados polímeros deben tener por lo menos dos núcleos activos para que la macromolécula formada pueda conservar su configuración inicial; cuando las cadenas poliméricas tienen múltiples grupos funcionales se les denomina polielectrolitos ¹²³.

Los polímeros que conforman dichos coagulantes naturales son compuestos orgánicos formados por una larga cadena de moléculas más pequeñas; estos pueden ser catiónicos, aniónicos o no iónicos (carga neutra) ^{110,120,123}.

Los polímeros que poseen los coagulantes naturales tienen una alta carga catiónica, la cual es necesaria para desestabilizar las cargas negativas que poseen los coloides y a su vez, facilitar una rápida floculación, neutralizan las cargas eléctricas de las partículas coloides, lo que produce que estas puedan agruparse; los coagulantes naturales o también denominados primarios son los más utilizados en los tratamientos de aguas residuales ^{110,112}.

Los coagulantes de origen natural poseen una alta eficiencia de remoción de varios contaminantes, además presenta la característica de poder reciclarse, dado que producen lodos biodegradables, los cuales pueden ser usados como materia prima para producir fertilizantes

con niveles de nitrógeno controlado, lo que genera una alternativa a productos químicos como la urea ¹¹⁵.

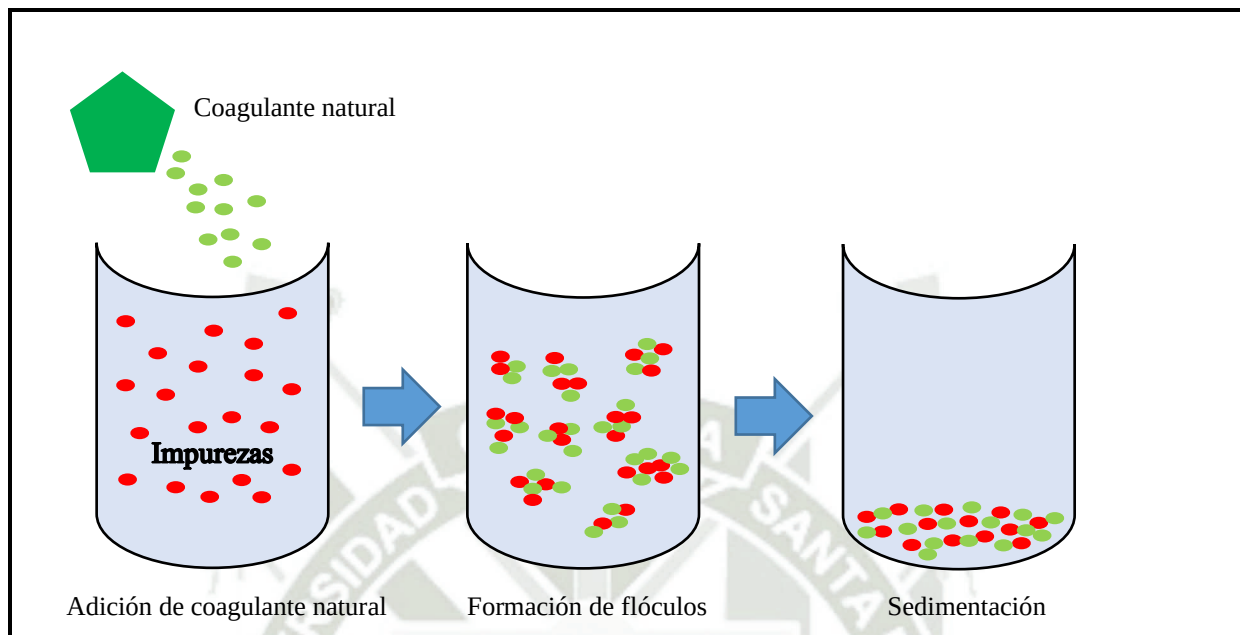


Figura 17. Representación del proceso de coagulación natural ¹¹¹.

Los coagulantes naturales poseen las siguientes características:

- Vienen siendo utilizados de manera doméstica durante varios siglos para el tratamiento de aguas, especialmente en zonas rurales, donde la población consume el agua directamente desde las cuencas de ríos o arroyos, en donde dicha agua no es apta para el consumo humano por estar generalmente contaminada ¹⁰⁰.
- Poseen algunas ventajas con relación a los coagulantes químicos, dentro de estas podemos mencionar que son altamente biodegradables, generan una menor cantidad de lodos, no son corrosivos, no generan impacto al medioambiente, no elevan el pH del agua tratada ¹⁰¹.
- Bajos dosis de coagulante natural sedimentan grandes porciones de sólidos sedimentables ¹²³.
- El proceso de coagulación natural se puede ver afectado por partículas suspendidas que se puedan encontrar, dado que ellas van a tener diversos factores de coagulación (pH, temperatura, dosis óptima, por citar algunos) que van a variar dicho proceso ^{106,110}.
- Producen lodos que son fácilmente biodegradables, dichos lodos son menos voluminosos que los generados por el sulfato de aluminio, en un porcentaje de 20 – 30

%, los citados lodos pueden ser usados como materia prima para obtener abonos orgánicos ¹¹².

- Actúan de manera similar a los coagulantes químicos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua, facilitando la sedimentación y reduciendo la turbidez inicial de dicha agua ⁶⁶.
- De los cuatro tipos de mecanismos de coagulación (compresión de la doble capa eléctrica, adsorción y neutralización de cargas, atrapamiento de partículas dentro de un precipitado, adsorción y puente), los mecanismos de adsorción y neutralización de cargas junto al de adsorción y puente son los que predominan cuando se usan coagulantes naturales ⁶⁴.

Los coagulantes naturales poseen algunas desventajas a tomar en consideración:

- a) Deben prepararse de manera inmediata para uso, puesto que no se encuentran de forma comercial ^{100,101,112}.
- b) No elimina totalmente los patógenos, en algunos casos aumenta la concentración de dichos microorganismos después del proceso de coagulación ^{100,101,112}.
- c) Se necesitan de grandes cantidades de coagulante natural cuando el agua a tratar posea grandes concentraciones de turbidez, no logrando una remoción efectiva ¹²³.
- d) El coagulante debe usarse de manera inmediata, debido a que posee la característica de presentar olor en días posteriores a su preparación, debe emplearse en grandes cantidades para su buena eficacia ^{100,101,112}.
- e) Cuando se adiciona de manera pulverizada, el coagulante natural incrementa la carga orgánica, agregando un 90 % de sustancias orgánicas que no actúan como agentes floculantes ⁶⁶.
- f) Producen pocos flóculos cuando actúan solos, pero cuando se mezclan con coagulantes simples sus resultados mejoran ¹²³.

La elección del tipo de coagulante a utilizar va a ser de mucha importancia para lograr una coagulación adecuada, dado que van a depender de las interacciones con los factores anteriormente mencionados ¹¹⁰.

Por otro lado, la concentración del coagulante debe ser proporcional a la cantidad de materia orgánica presente en la solución, además la concentración del coagulante disminuye a la par

que disminuye el pH, esto es debido a la formación de grupos carboxilos, los cuales evitan la interacción del coagulante ¹¹⁰.

2.8.7.2 Coagulantes químicos.

Los coagulantes químicos o también denominados inorgánicos son utilizados para reducir o eliminar la turbidez en forma de material suspendido y coloidal, materia orgánica, sólidos suspendidos y metales tóxicos como el cromo ^{104,112,143}.

Algunas de las características que poseen los coagulantes químicos son:

- Deben poseer cargas opuestas a los sólidos en suspensión para poder neutralizarlos y así convertirlos en sólidos no sedimentables, los cuales recién van a ser capaces de pegarse entre ellos y así permitir la unión entre dichas micropartículas, las cuales van a formar partículas llamadas “Microflóculos”; una vez finalizado todo este proceso el agua que rodee a dichos microflóculos deberá de aclararse, de no ser así es un indicativo de una inadecuada coagulación ⁹⁹.
- Poseen la desventaja de ser ineficaces en aguas que se encuentran a bajas temperaturas, producir grandes volúmenes de lodos (los cuales se vuelven un problema cuando no son biodegradables) y de afectar el pH del agua tratada ^{100,101,150}.
- Son capaces de formar compuestos polinucleares multicargados, lo que hace que se tenga una mejor adsorción ¹⁰³.
- La adición de algunos coagulantes en aguas residuales no solamente produce la coagulación de partículas coloides, sino que además pueden precipitar compuestos solubles que pudiesen estar en dichas aguas, como es el caso de los fosfatos; también se sabe que la coagulación puede eliminar partículas más grandes que los coloides, esto debido al atrapamiento de dichas partículas de mayor tamaño durante la formación de los flóculos ¹⁰⁷.
- Durante la adición de los coagulantes, los coagulantes químicos metálicos como las sales metálicas se hidrolizarán de manera rápida en las aguas residuales para formar especies catiónicas, las cuales serán adsorbidas por partículas coloidales cargadas negativamente logrando la reducción de la carga superficial y generando microflóculos ¹⁰⁸.

- Cada coagulante tiene un rango específico de pH donde tiene la mínima solubilidad y ocurre la máxima precipitación dependiendo de las características del agua a tratar; los coagulantes químicos son sales ácidas que disminuyen el pH del agua, razón por la cual se agrega un álcali tipo cal o soda cáustica ¹⁴.
- El proceso de coagulación cuando se efectúa en bajas temperaturas tiende a formar flóculos pequeños y frágiles, los cuales son susceptibles a romperse por las fuerzas físicas ¹⁰⁸.
- Los coagulantes químicos son populares debido a su accesibilidad y bajo costo, además a la efectividad de estos compuestos para formar complejos con diferentes cargas, la naturaleza de formación de estos compuestos puede ser controlada por el pH del sistema donde se encuentre ¹²³.

Los coagulantes químicos mayormente usados son las sales metálicas; en donde las sales de aluminio y las sales férricas son las más conocidas y utilizadas; ambos compuestos son altamente efectivos cuando se encuentran en condiciones altamente ácidas, en especial el sulfato de aluminio o alumbre ¹²⁰.

Adicionalmente, dichas sales generan iones altamente cargados en forma de hidróxidos inorgánicos que van a neutralizar las partículas en suspensión que se encuentran en el agua; produciendo polímeros cortos que forman microflóculos; la eficacia de dichos coagulantes se basa en su capacidad de formar complejos polinucleares con buenas características de adsorción ^{104,120}.

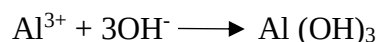
• Sales de aluminio

El mayor representante de estas sales es el sulfato de aluminio o también denominado alumbre, de fórmula química $Al_2(SO_4)_3$, es un coagulante usado comúnmente para eliminar contaminantes presentes en aguas residuales, tales como sólidos en suspensión, partículas coloidales, DBO_5 y DQO ^{109,144}. El sulfato de aluminio es una sal derivada de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas serán muy ácidas ¹⁵⁶.

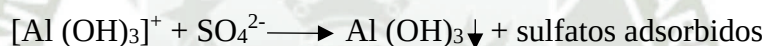
En la coagulación, cuando se agregan sales de aluminio al agua, se van a producir una serie de reacciones complejas, dado que dichas sales reaccionan con la alcalinidad del agua, cuando el alumbre es agregado al agua, las moléculas se disocian en iones de Al^{3+} y SO_4^{2-} ; el ion Al^{3+} se

va a combinar con los coloides cargados negativamente para poder desestabilizar parte de la carga de la partícula coloidal ^{14,121,123,155}.

El Al^{3+} puede combinarse también con los OH^- del agua produciendo hidróxido de aluminio, el cual es un compuesto insoluble, además se generarán precipitados ^{123,155}.



De la ecuación anterior se tiene que el hidróxido de aluminio $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ es un flóculo gelatinoso que sedimenta de manera lenta en aguas residuales, logrando una coagulación de barrido con el material suspendido; sin embargo, hay que tener en cuenta que una sobre dosificación del coagulante puede revertir dicho fenómeno y resurgir el coloide negativo causando nuevamente turbidez y color ^{121,155}. Por lo general, se forma un exceso de solución de hidróxido de aluminio y su destrucción y posterior precipitación se logra mediante los iones sulfato y otros iones negativos presentes en el agua ¹⁵⁵.



En el proceso de floculación se completa la aglomeración de las partículas y crecen los flóculos hasta una condición idónea para su sedimentación, el flóculo se asienta al fondo y deja una solución clara; cuando se agrega sulfato de aluminio al agua este reacciona con la alcalinidad natural del agua para formar un flóculo de hidróxido de aluminio ¹⁵⁵.

El sulfato de aluminio posee algunas propiedades únicas, tales como:

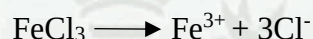
- a. El pH óptimo para la coagulación del sulfato de aluminio está influenciado por la concentración de materia orgánica presente en el agua. Posee una mejor efectividad en un rango de pH entre 5.5 - 8 ^{110,111}.
- b. La coagulación cuando se utiliza sulfato de aluminio es mucho mejor en condiciones ligeramente ácidas ¹¹⁰.
- c. Es un químico fácilmente soluble, además posee características corrosivas contra el aluminio, hormigón y acero, razón por la cual se debe tener implementos adecuados para su manejo ¹¹⁰.
- d. El alumbre es un compuesto que posee reacciones químicas extremadamente complejas, una vez añadido al agua los iones de aluminio entran en una serie de reacciones de hidrólisis, las cuales dan como resultado partículas grandes cargadas positivamente con presencia de iones aluminio en su interior ¹¹⁴.

- e. Para evitar que se formen sustancias indeseadas, el sulfato de aluminio deberá ser distribuido de manera homogénea por toda el agua a tratar mediante una mezcla rápida, de manera que se disminuirá el tiempo de formación de sustancias no deseadas y se aumentará el contacto con los coloidales ¹²³.

- **Sales de hierro**

Las sales de hierro vienen tomando ventaja en comparación a las sales de aluminio, debido a que son eficientes a bajas temperaturas, son capaces de eliminar una mayor gama de materia orgánica que las sales de aluminio y pueden actuar óptimamente en ambientes muy ácidos ¹²⁰. Dentro de las sales de hierro que se usan tenemos al sulfato férrico, cloruro férrico y el sulfato de hierro, de todas las anteriores el cloruro férrico es la que viene siendo la más utilizada ^{63,110}.

Cuando se adiciona cloruro férrico al agua residual se producen una serie de reacciones de hidrolíticas similares al sulfato de aluminio, además, se inicia de manera inmediata una rápida oxidación de dicho coagulante, generando la disociación de sus iones ¹²³.



El cloruro férrico presenta algunas características, tales como:

- a. Por lo general son compuestos corrosivos, presentan dificultades para disolverse y problemas de coloración; su uso puede traer presencia de hierro soluble en los efluentes generados (presentando problemas de remoción de dicho metal), su manejo puede ser limitado por su corto intervalo de pH ^{110,142}.
- b. La coagulación es muy óptima cuando se encuentran en condiciones muy ácidas ¹¹⁰.
- c. El cloruro férrico se produce como una solución acuosa a partir de la oxidación del cloruro ferroso con cloro, el principal uso de este compuesto es eliminar las impurezas en aguas residuales, también se usa para tratar aguas industriales y en la desalinización de aguas marinas ¹¹⁶.

Cuando se encuentran en soluciones acuosas, tanto las sales de aluminio como las sales férricas se van a disociar y reaccionar para formar productos de hidrólisis que van a actuar como coagulantes responsables de eliminar la turbidez y el color de las aguas residuales a tratar; además ambos coagulantes se unen a las partículas en suspensión haciendo que sean menos estables lo que provocará que se asienten ¹¹³.

2.9 Floculación

2.9.1 Definición

Proceso físico posterior a la coagulación, por el cual se produce la colisión y agitación de las partículas previamente desestabilizadas para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con el fin de aumentar su tamaño y peso para que sean fácilmente de eliminar mediante procesos posteriores como sedimentación, filtración o desinfección^{14,66,100,103}.

La floculación es favorecida por un mezclado lento, el cual permitirá la unión adecuada de los flóculos, un mezclado intenso haría que dichos flóculos sean rotos y muy difícilmente se vuelvan a formar en su tamaño y fuerza óptimos^{14,66,100,103}.

En la floculación se realiza la manifestación de la desestabilización en términos prácticos; en dicho proceso se acelera la formación de flóculos y además se va a influenciar ciertas características a dichos flóculos, tales como su fuerza, densidad o tamaño¹⁰³.

La floculación optimiza las condiciones del proceso de sedimentación, al unir a las partículas que se encuentran desestabilizadas y aumentar sus respectivos pesos, lo que provocará que sean mejor eliminadas¹²⁵.

La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas puedan hacer contacto; esto implica la formación de puentes químicos entre partículas, de modo que se forme una malla de coágulos, la que sería porosa y tridimensional; así se formaría mediante el crecimiento de partículas coaguladas un floc suficientemente grande y pesado como para poder sedimentar¹⁵⁷.

La formación de los flóculos es consecuencia de la aglomeración de las partículas descargadas al entrar en contacto entre ellas; puede ser causada por la colisión entre partículas, debido a que cuando se acercan lo suficiente las fuerzas de Van der Waals van a predominar sobre las fuerzas de repulsión, debido a la reducción de la carga eléctrica trayendo como consecuencia la disminución de la repulsión eléctrica¹⁵⁹.

2.9.2 Características del proceso de floculación

- El principal objetivo de la floculación es la reunión de las partículas coloides desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia ¹²².
- La floculación se basa en colisiones exitosas entre partículas desestabilizadas que son impulsadas unas hacia otras por una fuerza hidráulica, esto va a producir que los coloides se unan entre sí, formando microfloculos, los cuales se van acumulando para generar masas de flóculos ¹¹⁰.
- En algunos casos los flóculos recién formados no son lo suficientemente grandes para sedimentar de manera rápida, razón por la cual se agregan sustancias químicas llamadas floculantes auxiliares, los cuales formarán puentes que permitirán enlazar las superficies, logrando enlazar las partículas en aglomerados y a su vez lograr fortalecer dichos flóculos ^{14,66,103}.
- El coagulante aplicado va a generar la formación del flóculo, pero es necesario aumentar el volumen, peso, cohesión y engrosamiento de dicho flóculo, para ello es necesario realizar una agitación que sea homogénea y lenta; con el fin que las partículas descargadas eléctricamente se puedan unir al flóculo generado ¹⁵⁸.
- Para que el proceso de floculación sea el adecuado se necesita de una concentración óptima de dicho floculante, para que los flóculos formados sean capaces de sedimentarse (proceso denominado “Ventana de Floculación”); si no se obtiene dicha concentración óptima se corre el riesgo de reestabilizar las partículas suspendidas ¹²⁵.

2.9.3 Etapas de la floculación

La floculación se basa fundamentalmente en las siguientes etapas:

- a) La primera etapa trata sobre la dispersión del floculante dentro del agua a tratar, la floculación es una operación sensible hacia algunas características fisicoquímicas del agua tales como: alcalinidad, pH y turbidez ¹²².
- b) La segunda etapa consiste en la acción polimérica en donde se va a generar la formación de puentes entre los flóculos formados y las partículas desestabilizadas para provocar grandes aglomerados; los floculantes deben añadirse de manera lenta y ser mezclados de forma uniforme para lograr un adecuado contacto entre los flóculos más pequeños ^{105,118,122}.

La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo, normalmente bajo condiciones determinadas el tiempo óptimo de floculación varía entre 20 - 40 minutos ^{105,118,122}.

- c) En la tercera etapa, los floculantes, al poseer bioestructuras macromoleculares con un número elevado de grupos funcionales, van a interactuar con los contaminantes presentes en el agua. La concentración de las partículas contaminantes, las cuales van a generar turbidez, tiene una influencia notable en la floculación, dado que la velocidad de formación de los flóculos va a ser proporcional a la concentración de partículas ^{106,122}.
- d) Finalmente, en la cuarta etapa los floculantes van a ayudar a aumentar la solidez y densidad de los flóculos generados, lo que reducirá el consumo del coagulante en uso ¹⁰⁸.

La resistencia de los flóculos generados va a depender de los siguientes factores:

- De su tamaño, forma y compactación ¹²².
- Del tamaño, forma y naturaleza de las micropartículas ¹²².

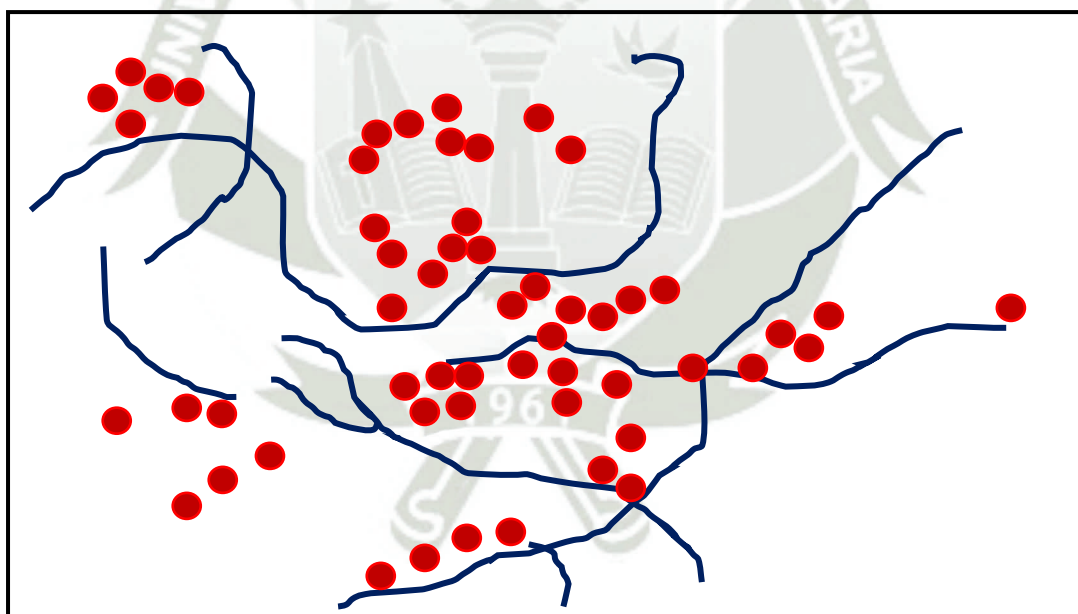


Figura 18. Aglomeración de partículas coloidales usando un floculante ¹⁵².

2.9.4 Mecanismos de floculación

Al momento de agregar el coagulante a una suspensión coloidal, se inician una serie de reacciones hidrolíticas que adhieren iones a la superficie de las partículas coloidales que se encuentran presentes en la suspensión, las cuales tendrán oportunidad de unirse entre sí para formar flóculos que con el tiempo crecerán ¹⁵⁵.

La rapidez con la que ocurrirá lo anteriormente expuesto depende del tamaño de las partículas con relación a sus concentraciones, del estado de agitación del líquido y del grado de desestabilización; todo esto va a permitir que las colisiones sean efectivas para producir adherencia, en dicha colisión intervienen de manera secuencial tres mecanismos de transporte; floculación pericínética, floculación ortocinética y sedimentación diferencial ^{122,155}.

2.9.4.1 Floculación pericínética.

También denominada browniana, es un proceso natural y aleatorio, está producido por el movimiento natural de las moléculas del agua (movimiento browniano) o por el peso de las partículas que tienden a aglomerarse e inducida por la energía térmica del fluido, influye solamente en partículas de tamaños menores a 1 μm . En caso de que se presente una gradiente de velocidad en el líquido mayor a 5 segundos y el tamaño de la partícula sea mayor a 1 μm el efecto que tendrá la floculación pericínética va a ser despreciable, razón por la cual solo se considerará la floculación ortocinética; solamente actúa al comienzo del proceso, aproximadamente a los 6 - 10 segundos ^{64,121,155}.

2.9.4.2 Floculación ortocinética.

Después de coagulada el agua se necesita que se produzca la aglomeración de los microfloculos, para que ello, una vez que la floculación pericínética haya finalizado, la única forma que exista un contacto entre las partículas desestabilizadas es a través de la inducción de gradientes de velocidades en el líquido, ha dicho proceso se le llamará floculación ortocinética ^{64,152}.

Denominada también gradiente de velocidad, la floculación ortocinética se basa en colisiones entre las partículas debido al movimiento del agua, dicho movimiento es inducido por una energía externa a la masa del agua, dicha energía puede ser de origen hidráulica o mecánica, debido a sus gradientes de velocidades originados por la disipación de dichas energías; mientras mayores gradientes de velocidad existan, habrá un mayor número de contacto entre las partículas ^{64,151,157}.

Sin embargo, los floculos serán más pequeños debido a las continuas rupturas de los floculos grandes; por el contrario, si se tienen gradientes de velocidad menores, se obtendrán floculos más grandes, pero requerirán de mayor tiempo para llegar a su tamaño óptimo ^{64,152,157}.

Cuando el coagulante se dispersa en el agua y se produce la desestabilización de las partículas, se requiere de la floculación pericínética para que las partículas coloides de tamaños menores a 1 μm empiecen a aglutinarse, comienza a actuar el movimiento browniano y se forma el

microflóculo inicial. Recién cuando se alcanza un tamaño de 1 μm empieza la floculación ortocinética, generando un desarrollo mayor del microflóculo. Dicho mecanismo fue estudiado en lugares donde la temperatura es alrededor de 0 °C, rango donde el movimiento browniano se anula, por consiguiente, también lo hace la floculación pericinéctica; además, se verificó que la floculación ortocinética en dicho rango de temperatura es ineficiente y sin ninguna importancia sobre partículas tan pequeñas ¹²².

2.9.4.3 Sedimentación diferencial.

Se debe a las partículas grandes, las cuales al precipitarse colisionan con las partículas más pequeñas, que van descendiendo lentamente y aglomerándose en el fondo junto con las más grandes ^{14,122}.

2.9.5 Factores que influyen en la floculación

2.9.5.1 Naturaleza del agua.

La floculación es sensible a algunas características fisicoquímicas del agua, tales como pH, turbidez y presencia de ciertos iones; algunos iones pueden influir en la formación de cadenas poliméricas de los hidróxidos formados o en la interacción de dichos hidróxidos con los coloides, afectando el tiempo de floculación; iones tales como el SO_4^{2-} tiene marcada influencia en el tiempo de formación de flóculos, en función del pH ^{64,122}.

El tamaño inicial de las partículas coloides influye en la formación de flóculos, dado que partículas grandes inhiben e impiden el proceso de floculación. La velocidad de formación de flóculos es proporcional a la concentración de partículas que producen la turbidez, por lo que es más fácil flocular aguas de alta turbidez y que tengan un amplio rango de tamaño de partículas ^{64,122}.

2.9.5.2 Tiempo de floculación.

La velocidad de aglomeración es proporcional al tiempo; por lo general, bajo ciertas condiciones el tiempo óptimo de floculación fluctúa entre 20 - 40 minutos, la sobre permanencia del agua en dicho lapso de tiempo genera resultados ineficaces, cuanto más se aleje del tiempo óptimo más acentuados serán los resultados negativos ^{64,122}.

2.9.5.3 Gradiente de velocidad.

Cuanto mayor es el gradiente de velocidad mayor es la velocidad de aglomeración de las partículas. Sin embargo, cuando aumenta demasiado dicho gradiente, los flóculos se rompen en partículas menores ^{64,122}.

Los valores recomendados de gradientes de velocidad para que una floculación óptima se realice se encuentran en un rango de tiempo de 1000 segundos ¹²².

2.9.5.4 Variación del caudal.

Las variaciones del caudal modifican la gradiente de velocidad y los tiempos de residencia; al disminuir el caudal, aumenta el tiempo de retención, disminuyendo dicha gradiente de velocidad ⁶⁴.

2.9.6 Tipos de floculantes

De acuerdo a su naturaleza química, los floculantes pueden ser clasificados en dos tipos:

2.9.6.1 Floculantes inorgánicos.

También conocidos como electrolitos, son sales solubles en agua, formados generalmente por cationes polivalentes, siendo las más usadas las sales de hierro, sales de aluminio y sílice ¹⁴.

2.9.6.2 Floculantes orgánicos.

2.9.6.2.1 Floculantes orgánicos naturales

Los floculantes orgánicos naturales consisten en polímeros naturales o complejos polisacáridos formados a partir de azúcares provenientes de diferentes polisacáridos tales como almidón, celulosa, quitosano, gomas naturales y mucílagos; los cuales poseen excelentes propiedades floculantes ¹⁰⁹.

Son una fuente alternativa usada para el tratamiento de aguas residuales por países en vías de crecimiento durante muchos años; se generan por reacciones espontáneas producidas por animales y plantas, producto de su metabolismo o de las reacciones bioquímicas que se producen, se caracterizan por presentar baja toxicidad y suelen ser empleados como agentes floculantes, debido a que aglutinan las partículas coloides que se encuentran suspendidas en el agua, favoreciendo su sedimentación y posterior remoción ¹⁶⁰.

Los floculantes naturales poseen características amigables hacia el medioambiente, lo que los convierten en una alternativa altamente potencial para el tratamiento de aguas residuales ^{119,124}.

Entre dichas características tenemos las siguientes:

- Alta capacidad de biodegradabilidad ¹²⁴.
- Nula o poca toxicidad ¹¹⁹.
- No producen aguas con pH extremos ¹²⁴.
- Resistencia al cillazamiento ¹²⁴.
- Rendimientos similares a los floculantes sintéticos ¹¹⁹.
- Generación de lodos orgánicos, los cuales pueden ser utilizados como fertilizantes naturales en agricultura ¹²⁴.

Debido a su bajo precio y alta disponibilidad en el mercado, anteriormente se solían utilizar floculantes inorgánicos para el tratamiento de aguas residuales; pero en la actualidad los floculantes obtenidos de manera natural se vuelven una opción viable debido a que estos acrecientan la tasa de sedimentación lenta en virtud de que aumentan el área superficial de los flóculos formados, todo esto se efectúa en temperaturas bajas ¹²⁵.

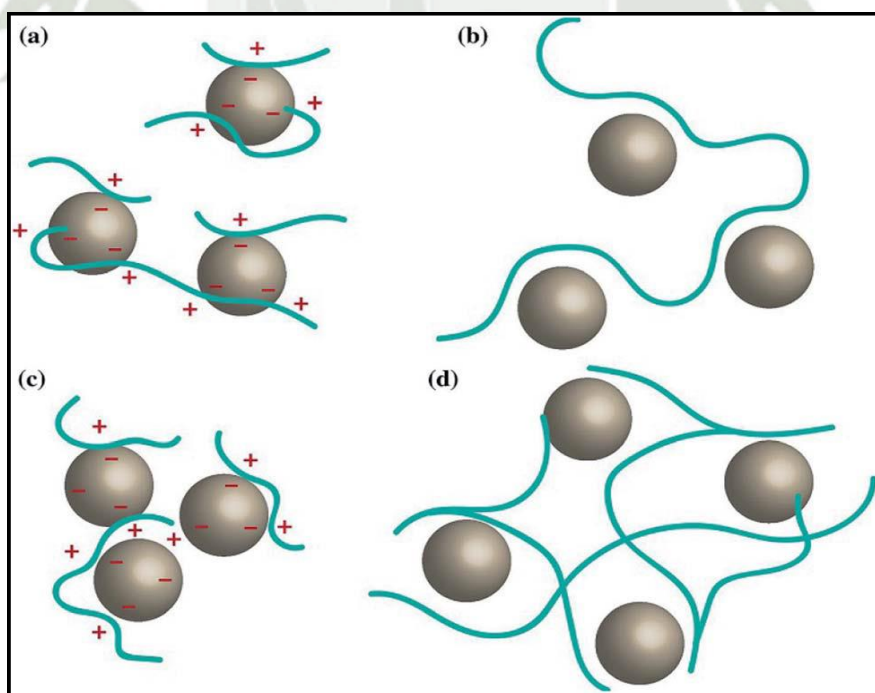


Figura 19. Mecanismo de floculación: **a)** Neutralización de cargas; **b)** Formación de puente; **c)** Unión electrostática; **d)** Barrido de cargas ¹⁰².

2.9.6.2.2 Floculantes orgánicos sintéticos

Los floculantes orgánicos sintéticos son ampliamente usados en la industria química moderna por su eficacia a bajas concentraciones, se caracterizan por ser macromoléculas que poseen grupos activos distribuidos a lo largo de su cadena y por ser obtenidos a partir de asociaciones de monómeros sintéticos con masa molecular elevada de 106 - 107 gr/mol ^{14,68}.

Pueden clasificarse de acuerdo a la ionicidad de los polímeros:

- Aniónicos (generalmente copolímeros de la acrilamida y del ácido acrílico), son ampliamente utilizados para aglomerar y reunir microflóculos pequeños y generar flóculos de mayor tamaño y densidad para así poder facilitar el proceso posterior de sedimentación ^{152,108}.
- Neutros o no iónicos (poliacrilamidas) ¹⁵².
- Catiónicos (copolímero de acrilamida junto con un monómero catiónico) ¹⁵².

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

La tesis presentada se sustentó en la recopilación, recolección, revisión y análisis de información científica, fidedigna y actualizada, recolectada mediante una búsqueda bibliográfica; para ello se exploró, analizó y revisó revistas científicas, libros, publicaciones y demás textos objetivos escritos por la comunidad científica en formato impreso o material en línea ^{151,158}.

3.1 Identificación del problema en estudio

La presente tesis desarrolló una investigación teórica que consistió en efectuar un estudio con el objetivo principal de conseguir información teórica relevante con un sustento científico sobre el proceso de coagulación y floculación que poseen tanto las semillas de *Moringa oleífera* Lam como el mucílago de *Opuntia ficus-indica* para su aplicación en una situación determinada, en este caso la remoción de cromo total, cromo (III) y cromo (VI) en aguas residuales de curtiembre.

3.2 Elección de base de datos

La elección de la base de datos permitió realizar la búsqueda adecuada de información en fuentes especializadas de investigación, blindó el soporte necesario para generar la revisión de literatura adecuada para desarrollar el cuerpo de la revisión, en donde se utilizó las siguientes bases de datos multidisciplinarias y especializadas:

- Scopus (<https://scopus.com>)
- IEEE Xplore Digital Library (<https://ieeexplore.ieee.org>)
- EBSCO (<https://ebSCO.com>)
- Springer (<https://link.springer.com>)
- Science Direct (<https://sciencedirect.com>)
- Web of Science (<https://webOfScience.com>)
- Taylor & Francis (<https://tandfonline.com>)

Adicionalmente, se usó información proveniente de buscadores académicos como:

- Google Scholar (<https://scholar.google.es>)
- Scielo (<https://scielo.org>)
- RENATI (<https://renati.sudenu.gob.pe>)
- Redalyc.org (<https://www.redalyc.org>)

- Dialnet (<https://dialnet.unirioja.es>)
- Academia (www.academia.edu)

3.3 Selección de descriptores – Cadena de búsqueda

La presente tesis se basó en una revisión descriptiva, tomando como punto de partida la búsqueda de información en bases de datos adecuadamente seleccionadas, en donde se dio énfasis a las siguientes palabras clave:

- *Moringa oleífera* Lam (Moringa)
- *Opuntia ficus-indica* (Tuna/Nopal)
- Coagulación
- Floculación
- Curtiembre
- Cromo

3.4 Criterios de búsqueda

3.4.1 Criterios de inclusión

- Temáticos; se abordaron palabras claves como *Moringa oleífera* Lam, *Opuntia ficus-indica*, coagulación, floculación, curtiembre, cromo, legislación nacional; por citar algunas.
- Espaciales; se incluyeron investigaciones y experiencias tanto nacionales como internacionales, priorizando que se encuentren escritas en idioma inglés.
- Temporales; se dio prioridad a investigaciones recientes.
- Por tipo de documento; se trabajó con artículos académicos, revistas, tesis y libros.

3.4.2 Criterios de exclusión

- Toda la información, documentos, artículos académicos, revistas, tesis y libros que no cumplieron con los criterios de inclusión anteriormente descritos.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1 Remoción de cromo total usando semillas de *Moringa oleífera* Lam

Se analizaron los resultados correspondientes a tres casos de estudio relacionados con la determinación de la eficacia de remoción de cromo total que poseen las semillas de *Moringa oleífera* Lam en muestras de aguas residuales provenientes de curtiembres. En la tabla 11 se puede observar los resultados obtenidos en todos los estudios anteriormente mencionados, tales como el porcentaje de remoción de cromo total y dosis óptima de cada coagulante usado por citar algunos parámetros.

Tabla 11. Eficacia de la semilla de *Moringa oleífera* Lam usada como coagulante-floculante en la remoción de cromo total en aguas de curtiembre a partir de tres casos de estudio ^{126,128,130}.

Caso de estudio	Mecanismo de coagulación	Tamaño de poro (µm)	Dosis óptima de coagulante (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)
1	Adsorción y neutralización de cargas	125	50	92.51
2		20	625	99.29
3		250	3000	93

Caso de Estudio 1.

En el primer caso de estudio se determinó la eficacia para remover cromo total y otros metales pesados en aguas de curtiembre por parte de semillas de *Moringa oleífera* Lam en dos formas diferentes: semillas con y sin cáscaras, ambas en combinación con sulfato de aluminio (0.15 gr de sulfato de aluminio mezclado con 0.05 gr de semilla), se pudo comprobar que dichas semillas en ambos estados poseen la capacidad de remover cromo, razón por la cual la concentración inicial de cromo total se redujo de 718.9 mg/L a 53.85 mg/L, logrando un 92.51 % de remoción; en ambos casos el pH inicial del agua tratada fue de 6.88, después del tratamiento usando semillas con cáscaras se modificó dicho pH a 6.56, mientras que cuando se realizó el tratamiento con semillas sin cáscaras el pH varió a 5.75. Se compararon las semillas en tres diferentes tamaños de poro; 125 µm, 250 µm y 500 µm, siendo el primer tamaño en donde se observó la mejor reducción del metal; además se determinó que las semillas poseen una buena

capacidad de disminuir algunos parámetros fisicoquímicos tales como la turbidez y carga microbiana; por último, las semillas tienen también la capacidad de reducir de metales como arsénico, níquel, zinc, y cobre ¹²⁶.

Caso de Estudio 2.

En el segundo caso, se realizaron estudios sobre la capacidad de remoción que poseen las semillas de *Moringa oleífera Lam* para el cromo total y otros metales como hierro, cobre, cobalto, plomo, manganeso y zinc en tres diferentes curtiembres; para el caso del cromo total, las concentraciones iniciales de las muestras recolectadas fueron de 9.80 mg/L, 8.70 mg/L y 8.98 mg/L, las cuales cuando entraron en contacto con el coagulante natural bajaron a 0.07 mg/L, 0.06 mg/L y 0.06 mg/L respectivamente; dicha disminución expresada términos de porcentaje fue de 99.29 %, 99.31 % y 99.93 % en el orden dado; en el caso del pH los valores iniciales y finales fueron los mismos, siendo los siguientes valores: 8.8, 9.10 y 9.05 respectivamente; otro dato importante de este caso de estudio fue que se realizó dos mezclas; la inicial a 100 RPM por un minuto (para el proceso de coagulación) y la siguiente a 30 RPM por 10 minutos (para el proceso de floculación); se concluye que la alta remoción se debe al mecanismo de adsorción y neutralización de cargas que poseen las semillas de *Moringa oleífera Lam*, las cuales atraen los metales de carga negativa en el agua ¹²⁸.

Caso de Estudio 3.

En el tercer caso de estudio se realizó la comparación entre semillas de *Moringa oleífera Lam*, bentonita, café y carbón activado para determinar el porcentaje de remoción de cromo total presente en aguas de curtiembre, cuya concentración inicial era de 50 mg/L; las semillas de *Moringa oleífera Lam* lograron un porcentaje de remoción de 93 %, dicho porcentaje en comparación con los demás coagulantes naturales en estudio fue el más bajo, esto debido al tamaño de poro que se utilizó, la bentonita usó un tamiz de 25 μm y obtuvo el mayor porcentaje de reducción (99 %) en contraste con el tamiz de 250 μm usado por las semillas de *Moringa oleífera Lam*, esto quiere decir que existe una relación directa entre tamaño de poro del coagulante con la reducción del cromo total; también se pudo determinar una relación similar en cuanto al tiempo de mezclado, dado que a mayor tiempo de mezcla se deje actuar la semilla de *Moringa oleífera Lam* mayor será el porcentaje de reducción del metal, en este caso específico se llegó al máximo porcentaje de reducción del cromo total a los 120 minutos, sobrepasando dicho tiempo la actividad coagulante se satura ¹³⁰.

La figura 20 muestra la comparativa entre los tres casos de estudio anteriormente descritos; si bien es cierto en el primer caso se obtiene un porcentaje alto de remoción de cromo total usando la menor cantidad de coagulante natural que los demás casos, tiene la desventaja que la semilla de *Moringa oleífera* Lam fue mezclada con un coagulante químico (sulfato de aluminio), razón por la cual aumentó su capacidad de remoción, este aspecto le resta a su capacidad de remoción propia; para el segundo caso si bien es cierto que requiere de una dosis mayor (625 mg/L) tiene la ventaja que las semillas actúan solas y obtienen un alto porcentaje de remoción de cromo total; finalmente en el tercer caso de estudio es en donde se utiliza la mayor dosis de coagulante natural (3000 mg/L) y se logra un porcentaje elevado de remoción del metal, pero que en comparación con los otros dos casos dicha cantidad de coagulante natural requerido es demasiado elevada.

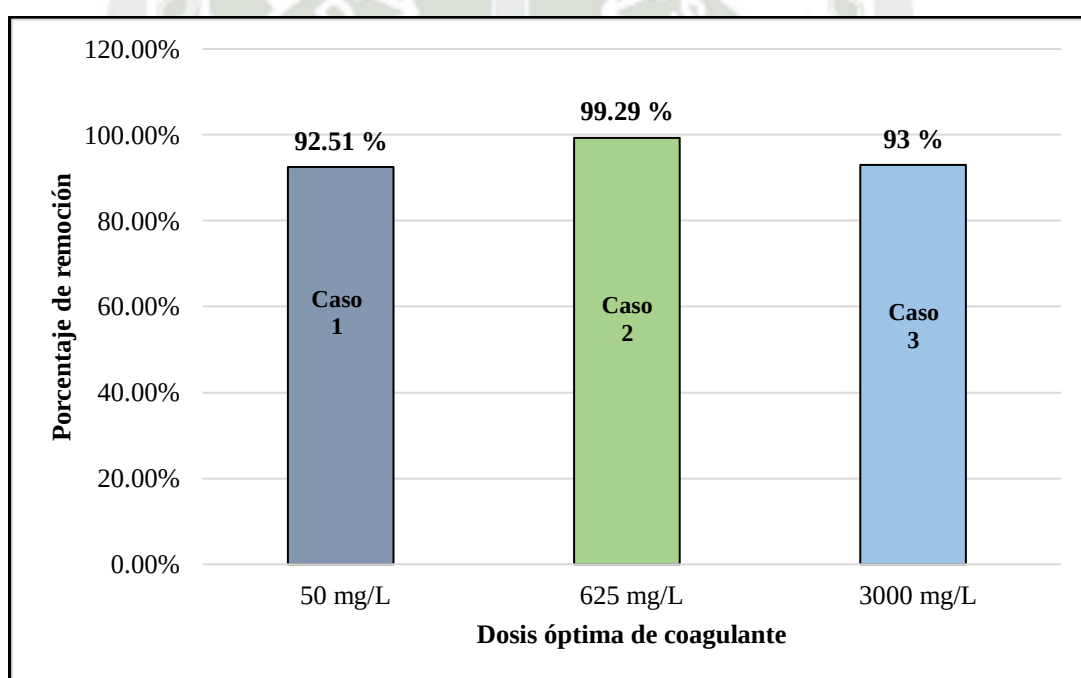


Figura 20. Comparativa de tres casos de estudio en la determinación de la eficacia de remoción de cromo total usando semillas de *Moringa oleífera* Lam ^{126,128,130}

4.2 Remoción de cromo (VI) usando semillas de *Moringa oleífera* Lam

Para el caso del cromo (VI) se analizaron los resultados correspondientes a dos casos de estudio relacionados con la determinación de la eficacia de remoción que poseen las semillas de *Moringa oleífera* Lam en muestras de aguas residuales provenientes de curtiembres.

Tabla 12. Eficacia de la semilla de *Moringa oleífera* Lam usada como coagulante-floculante en la remoción de cromo (VI) en aguas de curtiembre a partir de dos casos de estudio ^{135,132}.

Caso de estudio	Mecanismo de coagulación	Tamaño de poro (µm)	Dosis óptima de coagulante (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)
1	Adsorción y	210	5000	90
2	neutralización de cargas	250	7000	95.6

Caso de Estudio 1.

En el primer caso, se usó semillas pulverizadas de *Moringa oleífera* Lam inmovilizadas en alginato de sodio para determinar su capacidad coagulante/floculante en la remoción de cromo (VI), el tiempo de mezclado entre el coagulante y la muestra fue de 24 horas, se llegó a una dosis óptima de 5000 mg/L que arrojó un porcentaje máximo de reducción de 90 % cuando se ajustó la muestra a un pH de 3 ¹³⁵.

Caso de Estudio 2.

El segundo caso de estudio fue sobre una tesis realizada para determinar la remoción de cromo (VI) a partir de un coagulante natural extraído de las semillas de *Moringa oleífera* Lam, la muestra inicial del agua residual contenía una concentración inicial de cromo (VI) de 1.170 mg/L, dicha concentración se encontraba muy por encima del LMP establecido según normativa nacional D.S. N.º 003 PRODUCE – 2002 “Límite Máximo Permisible de efluentes para alcantarillado de las actividades de cemento, papel y curtiembre”, el cual establece un máximo de 0.4 mg/L.

Para dicha tesis se realizaron cuatro pruebas con distintas cantidades de dosis, pH, velocidades y tiempos de mezclado, para el caso de la dosis y el pH se logró obtener una dosis de coagulante y un pH óptimo de 7000 mg/L y 10 respectivamente, mientras que para el caso de la mezcla rápida se obtuvo el máximo porcentaje de remoción a 200 RPM por 60 segundos (para inducir a la coagulación) y 45 RPM por 10 minutos (para inducir a la floculación) ^{132,27}.

La figura 21 nos muestra la comparativa de los dos casos de estudio anteriormente descritos. El primer caso de estudio tuvo un porcentaje alto de remoción (90 %), cabe mencionar que en este caso se utilizó las semillas de *Moringa oleífera Lam* encapsuladas con alginato de sodio, el cual es un polisacárido aniónico usado en el tratamiento de aguas; finalmente en el segundo caso de estudio si bien es cierto se utilizó la mayor cantidad de coagulante para obtener el mayor porcentaje de remoción no se requirió de algún compuesto agregado, sino que dicha remoción fue obtenida a partir de las semillas.

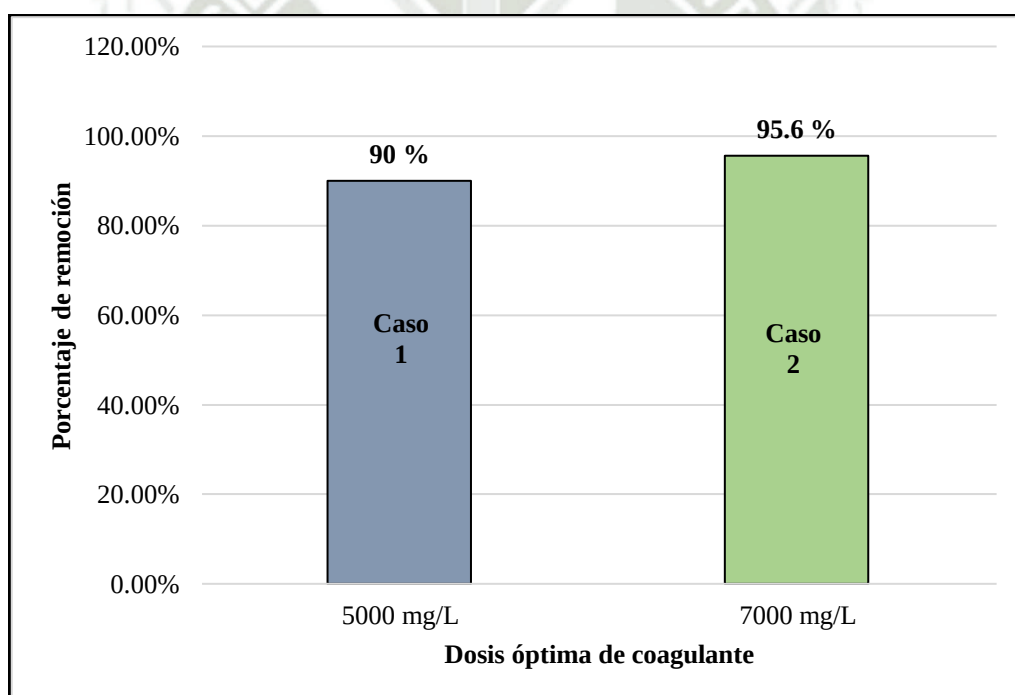


Figura 21. Comparativa de los dos casos de estudio en la determinación de la eficacia de remoción de cromo (VI) usando semillas de *Moringa oleífera Lam* ^{135,132}

De los cinco casos anteriormente analizados, en las semillas de *Moringa oleífera Lam* predomina el mecanismo de coagulación de adsorción y neutralización de cargas, dicho mecanismo se lleva a cabo cuando el coagulante y las partículas contaminantes presentan cargas opuestas, al inicio del proceso de coagulación las partículas coloides tienden aglomerarse, luego debido a la influencia de las fuerzas de Van der Waals se generará su desestabilización,

posteriormente se iniciará el proceso de floculación como resultado de la reducción de la carga superficial de las partículas y su respectiva disminución de fuerza de repulsión ^{131,152}.

La totalidad de los resultados obtenidos muestran una alta capacidad de remoción de cromo total y cromo (VI) por parte de las semillas de *Moringa oleífera Lam*, dichas semillas sirven además para remover otros metales pesados tales como: arsénico, níquel, zinc, cobre, plomo, cadmio, hierro, magnesio y manganeso, mostrando porcentajes elevados de remoción; también poseen una elevada capacidad de disminución para algunos parámetros fisicoquímicos tales como turbidez, carga microbiana, sólidos totales disueltos, conductividad, cloruros, sulfatos, DQO y alcalinidad ^{128,129,135}.

Por otro lado, los cinco casos de estudio usaron el ensayo de jarras, el cual es la técnica mayormente utilizada para simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio; la citada técnica tiene como propósito seleccionar el coagulante más activo, determinar el pH óptimo de coagulación, evaluar la dosis óptima, determinar el orden de adición de otros productos químicos, determinar los niveles óptimos de mezcla, gradiente de velocidad y tiempo de mezcla, por citar algunos parámetros que mide dicho ensayo ^{123,155}.

Finalmente, de toda la investigación realizada en la presente tesis, no se encontró información alguna en las bases de datos seleccionadas sobre tratamientos de aguas residuales de curtiembre usando semillas de *Moringa oleífera Lam* que involucren la remoción de cromo (III).

4.3 Remoción de cromo total usando mucílago de *Opuntia ficus-indica*

Para el caso de remoción de cromo total usando un coagulante natural extraído del mucílago de la penca de *Opuntia ficus-indica* se analizaron tres casos de estudio.

Tabla 13. Eficacia del mucílago de *Opuntia ficus-indica* usado como coagulante-floculante en la remoción de cromo total en aguas de curtiembre a partir de tres casos de estudio ¹⁴⁴⁻¹⁴⁶.

Caso de estudio	Mecanismo de coagulación	Dosis óptima de coagulante	Porcentaje de remoción (%)
1	Adsorción y puente	8 mg/L	32
2		4 ml	99.37
3		6000 mg/L	97.37

Los tres casos de estudio se caracterizaron por lo siguiente:

Caso de Estudio 1.

En el primer caso de estudio se determinó el poder de remoción de cromo total a partir del mucílago de *Opuntia ficus-indica*; llegándose a establecer una dosis óptima de 8 mg/L a un pH de 7.91; la muestra de agua residual proveniente de curtiembre tenía una concentración inicial de 2.667 mg/L, la cual fue disminuida a una concentración final de 0.87 mg/L cuando se agregó la dosis óptima del coagulante a una agitación de 120 RPM, la remoción del cromo total para este caso fue mediante el mecanismo de adsorción y puente, en este caso además se debe mencionar que el pH inicial de la muestra fue de 7.38, el cual varió a 7.91 cuando se llegó al máximo de remoción del cromo total; se concluye de acuerdo al resultado obtenido que el coagulante natural a base del mucílago de *Opuntia ficus-indica* puede ser usado como un pretratamiento para aguas residuales ¹⁴⁴.

Caso de Estudio 2.

Para el segundo caso se evaluó dos tipos de aguas de curtiembre; la primera fue una solución sintética generada en el laboratorio usando sulfato de cromo (III) y la segunda fue una muestra recolectada de una curtiembre que contenía una concentración inicial de 90 mg/L de cromo total, la cual después del tratamiento se redujo a 0.3 mg/L. Para ambos casos se determinó que

el pH es un parámetro de importancia, dado que puede afectar la carga superficial del coagulante y la estabilidad de la suspensión, un pH de 9 fue óptimo para la desestabilización de las partículas coloidales en dicha investigación. El método de Jarras fue el usado para el respectivo mezclado entre coagulante y muestra, se utilizó una agitación de 60 RPM en un tiempo de 20 minutos, este paso permitió asegurar una buena distribución de los agentes coagulantes y la desestabilización química de los coloides, además de facilitar el contacto entre las partículas y evitar daños a los flóculos formados, los cuales llegaron a tener tamaños oscilantes entre 3 – 5 mm de diámetro. Por último, se determinó que el coagulante natural extraído del mucílago de *Opuntia ficus-indica* seguía teniendo la capacidad floculante por un lapso de duración de 15 días sin necesidad de agregar algún conservante ¹⁴⁵.

Caso de Estudio 3.

En el tercer caso de estudio se realizó la comparación entre un coagulante natural obtenido a partir del mucílago del *Opuntia ficus-indica* con un coagulante industrial como es el carbonato de calcio para determinar la remoción de cromo total en aguas de curtiembre; la muestra del agua de curtiembre contenía una concentración inicial de cromo total de 41 109 mg/L, la cual se redujo después del tratamiento a 1.08 mg/L, se logró establecer la dosis óptima de 6000 mg/L, el pH adecuado para dicha remoción fue de 8 y el tiempo de mezclado fue de 60 minutos, en dicho tiempo la mayoría de los iones metálicos presentes en las aguas residuales son atraídos por los sitios de adsorción presentes en el mucílago, si se sobrepasa el tiempo óptimo la unión de los iones a los sitios de adsorción se reduce, dado que dichos sitios se van a limitar, razón por la cual el proceso de coagulación alcanza un estado de equilibrio. Por último, los resultados obtenidos en este estudio demostraron que el mucílago de *Opuntia ficus-indica* es más eficaz en la remoción de cromo total que el carbonato de calcio, el cual es un coagulante industrial ampliamente usado ¹⁴⁶.

La figura 22 muestra la comparación de los tres casos de estudio, se puede observar que en el primer caso la remoción de cromo total es mínima, solamente se logró un porcentaje de 32 % usando una concentración baja de coagulante (8 mg/L); en el segundo caso de estudio se obtuvo el mayor porcentaje de reducción de cromo total, llegando a un 99.37 %, en este caso se utilizó 4 ml de solución de coagulante natural de forma líquida, en contraste con los otros casos en donde se usaron coagulantes en forma sólida; finalmente, el tercer caso de estudio muestra la mayor cantidad de dosis óptima requerida de coagulante para obtener una remoción de 97.37

% de cromo total; de los tres casos analizados el coagulante en forma líquida es el que mejor rendimiento ha mostrado.

Finalmente, en los tres casos de estudio los pH óptimos variaron entre 7 – 9; siendo para el primer caso de 7.91, para el segundo caso un rango de 7 – 9 y para el tercer caso 8.

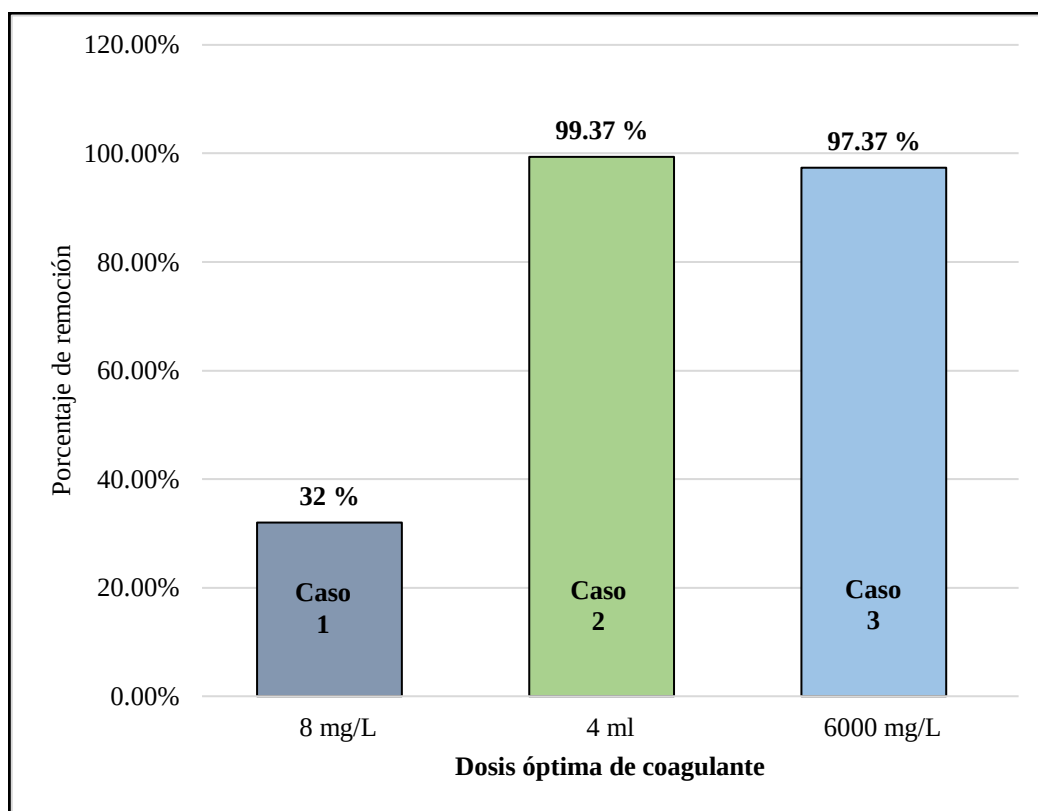


Figura 22. Comparativa de tres casos de estudio en la determinación de la eficacia de remoción de cromo total usando mucílago de *Opuntia ficus-indica* ¹⁴⁴⁻¹⁴⁷

4.4 Remoción de cromo (III) usando mucílago de *Opuntia ficus-indica*

Se analizó el resultado correspondiente al único caso de estudio encontrado en toda la literatura investigada relacionado con la determinación de la eficacia de remoción de cromo (III) que posee el mucílago de *Opuntia ficus-indica* en muestras de aguas residuales provenientes de curtiembres.

Tabla 14. Eficacia del mucílago de *Opuntia ficus-indica* usado como coagulante-floculante en la remoción de cromo (III) en aguas de curtiembre a partir de un caso de estudio ¹⁴⁶.

Caso de estudio	Mecanismo de coagulación	Dosis óptima de coagulante (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)
1	Adsorción y puente	6000	97

Caso de Estudio 1.

En el caso de estudio se comparó la eficacia de un coagulante natural generado a partir del mucílago de *Opuntia ficus-indica* con carbonato de calcio para determinar la eficacia en la remoción de cromo (III) en aguas provenientes de la industria de la curtiembre. La muestra recolectada tenía una concentración inicial de cromo de 33 mg/L, la cual después del tratamiento disminuyó a 0.99 mg/L; además se pudo determinar el tiempo de mezcla y el pH óptimo, los cuales fueron de 60 minutos y 8 respectivamente. Se llegó a la conclusión que el mucílago de *Opuntia ficus-indica* posee iguales o mayores porcentajes de remoción de cromo (III) que el carbonato de calcio, esto se debe a las propiedades adsorbentes y floculantes que lo hace un producto eficiente y seguro ¹⁴⁶. El mucílago de *Opuntia ficus-indica* posee la capacidad de remoción elevada de cromo total, cromo (IV) y cromo (III); también se ha encontrado que sirve para la disminución de algunos parámetros fisicoquímicos tales como DQO, DBO₅, turbidez y de algunos metales como níquel, hierro, cobre ^{133,145}.

4.5 Remoción de cromo (VI) usando mucílago de *Opuntia ficus-indica*

Para el caso del cromo (VI) se analizó el resultado correspondiente a un caso de estudio relacionado con la determinación de la eficacia de remoción que posee el mucílago de *Opuntia ficus-indica* en muestras de aguas residuales provenientes de curtiembres. En la tabla 15 podemos observar los resultados obtenidos de dicho caso de estudio.

Tabla 15. Eficacia del mucílago de *Opuntia ficus-indica* usado como coagulante-floculante en la remoción de cromo (VI) en aguas de curtiembre a partir de un caso de estudio ¹⁴⁶.

Caso de estudio	Mecanismo de coagulación	Dosis óptima de coagulante (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)
1	Adsorción y puente	6	98.8

El caso de estudio se caracterizó por lo siguiente:

Caso de Estudio 1.

En el único caso de estudio se recolectaron muestras de agua proveniente de una curtiembre con una concentración inicial de 8.1 mg/L de cromo (VI), se compararon distintas dosis del coagulante natural para lograr establecer la dosis óptima; el rango fue de 3 - 10 mg/L, llegándose a establecer el máximo de remoción del cromo (VI) a una dosis de 6 mg/L, disminuyendo la concentración inicial de cromo (VI) a 0.09 mg/L; cuando se sobrepasaba dicha cantidad la remoción disminuía gradualmente, esto se puede explicar por el hecho de que en un principio, el aumento de la dosis del coagulante resulta en el aumento de sitios cargados negativamente por parte de *Opuntia ficus-indica*, de manera que los iones metálicos positivos se agregan y adquieren un tamaño suficiente para sedimentar, después de llegar a la dosis óptima el aumento del coagulante conduce a que las partículas agregadas se vuelvan a esparcir sobre el área superficial más grande del coagulante y la sedimentación se interrumpa, dando como resultado que las partículas permanezcan en suspensión.

Adicionalmente, se halló el tiempo óptimo de contacto entre el coagulante natural y la muestra, el cual fue de 60 minutos a un pH óptimo de 8, en dicho tiempo se logró alcanzar el valor máximo de eliminación de cromo (VI), esto se debe a que la mayoría de los iones metálicos

presentes en aguas residuales son atraídos por los sitios de adsorción de *Opuntia ficus-indica* con cargas opuestas, después de 60 minutos la unión progresiva de iones a estos sitios con una cantidad constante del coagulante conduce a un número limitado de sitios de adsorción libres, generando que el proceso alcance el equilibrio ¹⁴⁶.

De los cinco casos de estudio se ha logrado determinar que la capacidad floculante que posee el mucílago de *Opuntia ficus-indica* se debe a que es inducida por polielectrolitos aniónicos presentes en dicho mucílago ¹⁴⁷.

El mecanismo de coagulación predominante que posee el mucílago de *Opuntia ficus-indica* es el de adsorción y puente, el cual se fundamenta en el uso de polímeros con sitios activos que se unirán con los coloides presentes en el agua para sucesivamente formar complejo partícula - puente - partícula, se debe tener en cuenta que las partículas coloides pueden ser neutralizadas directamente por la adición de iones con cargas opuestas, dichos iones van a tener la capacidad de ser directamente adsorbidos en la superficie de la partícula coloide ^{64,66}.

Finalmente, la totalidad de los resultados obtenidos muestran una alta capacidad de remoción de cromo total, cromo (III) y cromo (VI) por parte del mucílago de *Opuntia ficus-indica*, dicho mucílago presenta además la capacidad de remover metales pesados tales como: níquel, hierro y cobre, mostrando porcentajes elevados de remoción; también posee una elevada capacidad de remoción para algunos parámetros fisicoquímicos tales como turbidez, DQO y DBO₅ ^{133,145,147}.

4.6 Remoción de cromo total usando sulfato de aluminio

Para el caso de los coagulantes químicos, el sulfato de aluminio o también llamado alumbre es el más conocido y utilizado en el tratamiento de aguas residuales. En la tabla 16 se puede observar los resultados obtenidos en la remoción de cromo total cuando se trabajan con dicho coagulante inorgánico.

Tabla 16. Eficacia del sulfato de aluminio usado como coagulante-floculante en la remoción de cromo total en aguas de curtiembre a partir de tres casos de estudio ^{137,139,141}.

Caso de estudio	Mecanismo de coagulación	Dosis óptima de coagulante (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)
1	Adsorción y	80	90
2	neutralización de	975	98.2
3	cargas	500	95

Los tres de estudio se caracterizaron por lo siguiente:

Caso de Estudio 1.

En el primer caso de estudio se determinó la eficacia que presenta el sulfato de aluminio para remover cromo total presente en aguas de curtiembre mediante coagulación; la muestra inicial de dichas aguas contenía una concentración inicial de cromo total de 67 mg/L; también se pudo determinar el pH óptimo de remoción, el cual fue de 8. Por otro lado, la dosis óptima del coagulante en donde se obtuvo el mayor porcentaje de remoción del metal fue de 80 mg/L, se realizaron además dos diferentes mezclados; el primero a 100 RPM por un minuto (para inducir a la coagulación) y el segundo a 30 RPM por 10 minutos (para inducir a la floculación), luego se dejó reposar por una hora. La adición de algunos coagulantes comunes a las aguas residuales no solo produce la coagulación de los coloides, sino que también suele provocar la precipitación de compuestos solubles que pueden estar presentes en las aguas residuales. Asimismo, la coagulación también puede producir la eliminación de partículas más grandes que las partículas coloidales debido al atrapamiento de dichas partículas en los flóculos formados durante la coagulación ¹³⁷.

Caso de Estudio 2.

En el segundo caso de estudio se realizó la comparación entre la coagulación química y electrocoagulación; se usó sulfato de aluminio y cloruro férrico para el caso de la coagulación química, mientras que para la electrocoagulación se usaron electrodos de hierro y aluminio. La muestra a tratar era agua residual de curtiembre con una concentración inicial de cromo total de 400 mg/L; para el caso de la coagulación química, la dosis óptima, el tiempo de contacto y el porcentaje de remoción fueron de 975 mg/L, 30 minutos y 98.2 % respectivamente ¹³⁹.

Caso de Estudio 3.

En el tercer caso de estudio también se comparó la coagulación química con la electrocoagulación usando coagulantes a base de aluminio (sulfato de aluminio y cloruro de aluminio) y a base de hierro [sulfato de hierro (III) y cloruro férrico], para este caso la muestra inicial fue recogida después de haber pasado por una sedimentación primaria, dicha muestra tenía una concentración de cromo total de 125 mg/L. Para el caso específico del sulfato de aluminio se llegó a una dosis óptima, pH y porcentaje de remoción de cromo total de 500 mg/L, 10 y 95 % respectivamente ¹⁴¹.

En la figura 24 podemos apreciar los tres casos de estudio en una comparativa de sus dosis y porcentajes de remoción de cromo total, todos los casos poseen una remoción alta, ello se debe a que el sulfato de aluminio es un coagulante químico de elevada efectividad; si bien es cierto que el segundo caso de estudio es el que presenta una mayor remoción de cromo total usando también una mayor cantidad de coagulante, en este caso la concentración inicial de cromo total fue la más alta de todos los casos, lográndose determinar una concentración de 400 mg/L, en contraste con las concentraciones de 67 mg/L y 125 mg/L del primer y tercer caso respectivamente.

El primer caso de estudio obtuvo un porcentaje de remoción de 90 %, siendo el más bajo de todos, en contraste, se usó una cantidad baja en comparación a los demás casos (80 mg/L de coagulante).

El pH óptimo para los tres casos fluctuó entre 7 – 10; mientras que el tiempo de reposo para el primer caso fue de 1 hora, mientras que para el segundo caso fue de 30 minutos, en el tercer caso de estudio el autor no blindo dicha información.

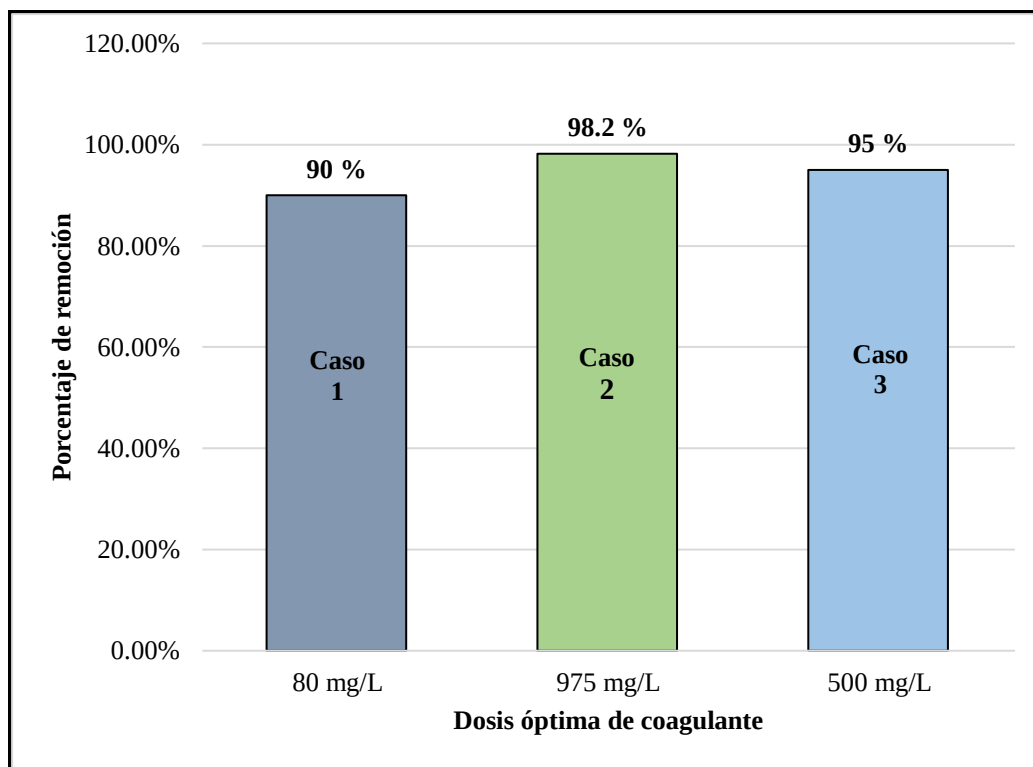


Figura 23. Comparativa de tres casos de estudio en la determinación de la eficacia de remoción de cromo total usando sulfato de aluminio ^{137,139,141}.

El sulfato de aluminio es usado como un agente coagulante/floculante en el tratamiento de aguas residuales, se caracteriza por agrupar sólidos suspendidos en el agua y acelerar la sedimentación ⁶³. Para evitar que se formen sustancias indeseadas, el sulfato de aluminio debe ser distribuido de manera pareja en toda el agua a tratar; para ello el tiempo de mezclado es un factor importante para lograr una buena coagulación, por eso, se suele usar una mezcla rápida, la cual disminuye el tiempo de formación de otras sustancias no deseadas y aumenta el contacto con el coagulante ¹²³.

De todos los casos investigados se puede concluir que el sulfato de aluminio posee altos porcentajes de remoción de cromo total cuando es usado en aguas de curtiembre; además se ha encontrado que dicho coagulante inorgánico también puede remover otros metales tales como aluminio, hierro, fósforo y mercurio; también es un buen coagulante para reducir parámetros fisicoquímicos tales como DBO₅, DQO, turbidez y sólidos totales suspendidos ^{137,142}.

4.7 Remoción de cromo total usando cloruro férrico

Cloruro férrico es el otro coagulante químico mayormente usado para el tratamiento de aguas residuales, la tabla 17 nos muestra los resultados obtenidos a partir del estudio de cuatro casos en la remoción de cromo total.

Tabla 17. Eficacia del cloruro férrico usado como coagulante-floculante en la remoción de cromo total en aguas de curtiembre a partir de cuatro casos de estudio ^{136,138,139,141}.

Casos de estudio	Mecanismo de coagulación	Dosis óptima de coagulante (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)
1	Adsorción y neutralización de cargas	150	93
2		150	96
3		1500	99
4		500	100

Los cuatro casos de estudio se caracterizaron por lo siguiente:

Caso de Estudio 1.

En el primer caso de estudio se utilizó cloruro férrico como coagulante en aguas de curtiembre que previamente fueron filtradas; la muestra tuvo un tiempo de mezcla de 20 minutos a 90 RPM, luego se dejó sedimentar por un día, dicho tiempo de asentamiento tuvo una relación directa con el tratamiento, dado que a mayor tiempo de sedimentación mejor eficacia del tratamiento ¹³⁶.

Para el caso de la dosis óptima se encontró la mayor reducción del cromo total en 150 mg/L de coagulante; cantidades por encima de la dosis óptima del cloruro férrico lograron tener resultados contrarios a la remoción, teniendo una relación inversa, esto se puede atribuir a un mayor número de partículas coagulantes que van a rodear a las partículas coloides combinadas previamente, dificultando tanto la formación del flóculo y que estos no puedan asentarse fácilmente ¹³⁶.

Caso de Estudio 2.

En el segundo caso de estudio se determinó la dosificación óptima de coagulante, la cual fue de 150 mg/L logrando obtener un 96 % de remoción de cromo total a un pH neutro, al igual que el caso anterior cuando se sobrepasaba dicha dosis la eficiencia disminuía y el pH aumentaba, este fenómeno se debe a que las partículas de los efluentes se encuentran rodeadas por partículas del coagulante, cuando la dosis es alta la superficie se satura y hay menos probabilidad de combinarse entre sí, lo que va a generar una estabilidad indeseada. En el caso del pH se estableció que la máxima eficiencia se daba cuando era neutro, dicha eficiencia reducía gradualmente en ambos lados del pH neutro; las sustancias coloides de los efluentes de curtiembre suelen llevar cargas eléctricas negativas, el cloruro férrico posee iones Fe^{3+} , cuando se encuentra en presencia de un pH neutro, el Fe^{3+} se hidroliza en iones complejos de hidróxido mono y multinucleares que poseen la capacidad adsorber partículas, lo que lleva a la conclusión que el pH tiene juega un papel importante en la coagulación controlando las especies de hidrólisis. El tiempo de contacto óptimo para la coagulación fue de un día, manteniéndose constante por dos o más días, esto se debe a que el coagulante químico se hidroliza rápidamente acelerando el proceso de coagulación ¹³⁸.

Caso de Estudio 3.

El tercer caso comparó la coagulación química con la electrocoagulación para determinar la remoción de cromo total presente en aguas de curtiembre usando cloruro férrico. Se determinó el tiempo óptimo de reacción para el cloruro férrico que fue a los 15 minutos, además halló la dosificación adecuada, la cual fue de 1500 mg/L ¹³⁹.

Caso de Estudio 4.

En el cuarto caso de estudio se comparó la coagulación química con la electrocoagulación usando coagulantes a base de aluminio (sulfato de aluminio y cloruro de aluminio) y a base de hierro [sulfato de hierro (III) y cloruro férrico], para este caso la muestra inicial fue recogida después de haber pasado por una sedimentación primaria, dicha muestra tenía una concentración de cromo total de 125 mg/L. La dosificación óptima para el cloruro férrico fue de 500 mg/L logrando una eficiencia del 100 % en la remoción de cromo total ¹⁴¹.

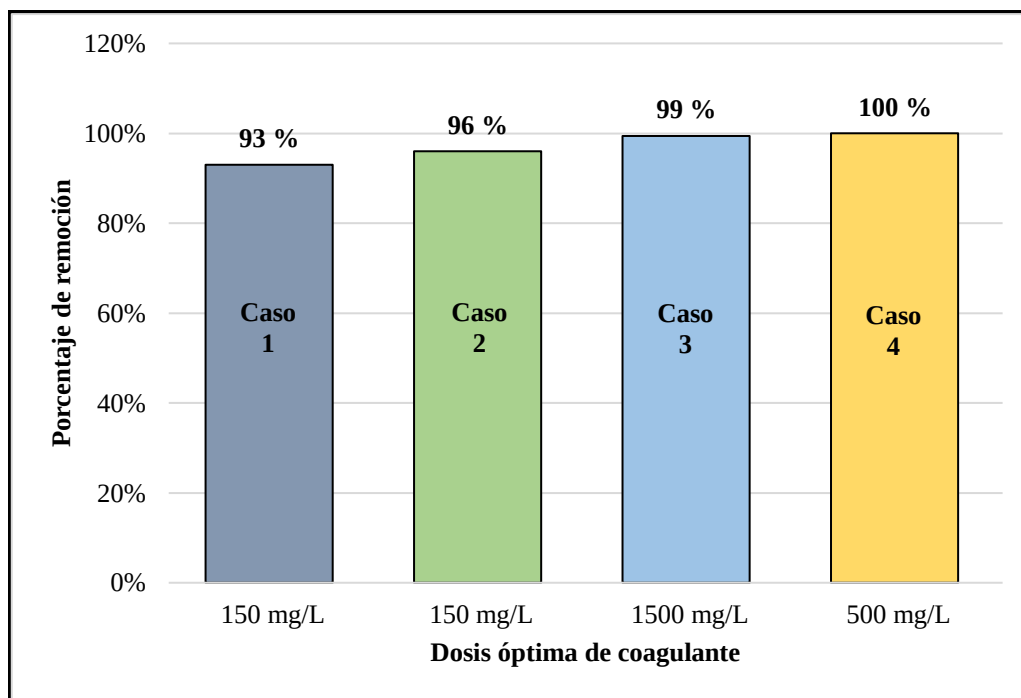


Figura 24. Comparativa de cuatro casos de estudio en la determinación de la eficacia de remoción de cromo total usando cloruro férrico ^{136,138,139,141.}

En la figura 24 se puede observar la comparativa de los cuatro casos de estudio anteriormente descritos, se puede advertir que en todos los estudios el cloruro férrico sobrepasa el 90 % de remoción de cromo total; al igual que el sulfato de aluminio, el cloruro férrico es un coagulante altamente efectivo, se encuentra detrás del sulfato de aluminio en orden de uso de coagulantes químicos. El cuarto caso de estudio es el que obtuvo el 100 % de remoción de cromo total a una dosis relativamente elevada, el tercer caso requiere de una cantidad de diez y tres veces más que los demás casos de estudio; el primer y segundo caso de estudio por la cantidad de coagulante requerido y el porcentaje de remoción obtenido son los casos que mejor efectividad produjeron.

La investigación realizada nos demostró que el cloruro férrico posee una alta eficiencia en remoción cromo total y cromo (VI), llegando a un 100 %, además, posee la capacidad de remover otros metales como fósforo, aluminio, hierro, cadmio, mercurio y arsénico; asimismo, poseen la capacidad de remover los índices de algunos parámetros fisicoquímicos tales como: DBO₅, DQO, sólidos totales en suspensión, turbidez y sólidos totales disueltos ^{136,138,142.}

4.8 Remoción de cromo (VI) usando sulfato de aluminio y cloruro férrico

En el caso del cromo (VI) solamente se obtuvo un caso de estudio específico en donde se comparó la eficiencia del sulfato de aluminio y el cloruro férrico.

Tabla 18. Eficacia del sulfato de aluminio y cloruro férrico usados como coagulantes-floculantes en la remoción de cromo (VI) en aguas de curtiembre a partir de un caso de estudio ¹⁴⁰.

Caso de estudio	Mecanismo de coagulación	Coagulantes inorgánicos usados	Dosis óptima de coagulante (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)
1	Adsorción y neutralización de cargas	Sulfato de aluminio	70	99.25
		Cloruro férrico	70	99.15
		Mezcla	70	99.91

El caso en estudio se caracterizó por lo siguiente:

Caso de Estudio 1.

El caso de estudio comparó la eficiencia de tres coagulantes químicos inmovilizados en alginato de sodio, así como la unión entre ellos, la muestra que contenía una concentración inicial de cromo (VI) de 70.33 mg/L fue llevada dos distintos mezclados, uno rápido que consistía en una aceleración de 100 RMP por un minuto seguida de una mezcla lenta de 30 RPM por 10 minutos para finalmente dejar sedimentar dicha muestra por una hora ¹⁴⁰.

El pH en rangos de 5 – 9 tiene un mayor efecto sobre la coagulación y específicamente sobre la eliminación de contaminantes, siendo el pH de 7 en donde se logró la máxima eliminación de cromo (VI), las aguas residuales provenientes de curtiembres suelen tener sustancias coloides que por lo general llevan cargas negativas, mientras el sulfato de aluminio y cloruro férrico poseen iones Al^{3+} y Fe^{3+} , los cuales son positivos, cuando se posee un pH óptimo los iones se hidrolizan en complejos mono y multinucleares que poseen la capacidad de neutralización, siendo capaces de adsorber partículas; mientras que para el caso de un pH bajo los resultados son menores, por lo que se puede atribuir a una competencia entre los protones

del cromo por los sitios de unión disponibles o también porque los sitios estaban ocupados por dichos protones ¹⁴⁰.

Para el caso de la dosis óptima, se demostró que a mayor dosis del coagulante mayor remoción del metal, estableciéndose una dosificación óptima de 70 mg/L, cuando se sobrepasó dicha cantidad el rendimiento disminuyó gradualmente, dado que las partículas en el agua residual se encuentran encerradas por el exceso de coagulante, dando como resultado que las superficies se encuentren saturadas, lo que imposibilitará la coagulación; mientras que cuando hay dosis muy bajas el coagulante es insuficiente por lo que se genera una ineficaz coagulación ¹⁴⁰.

Los resultados obtenidos en este caso de estudio demostraron que la mezcla entre el sulfato de aluminio y cloruro férrico fue la que mejor resultados dieron, dado que redujo la concentración inicial del metal de 70.33 mg/L a 0.03 mg/L, seguido del cloruro férrico y sulfato de aluminio los cuales redujeron dicha concentración a 0.62 mg/L y 0.53 mg/L respectivamente ¹⁴⁰.

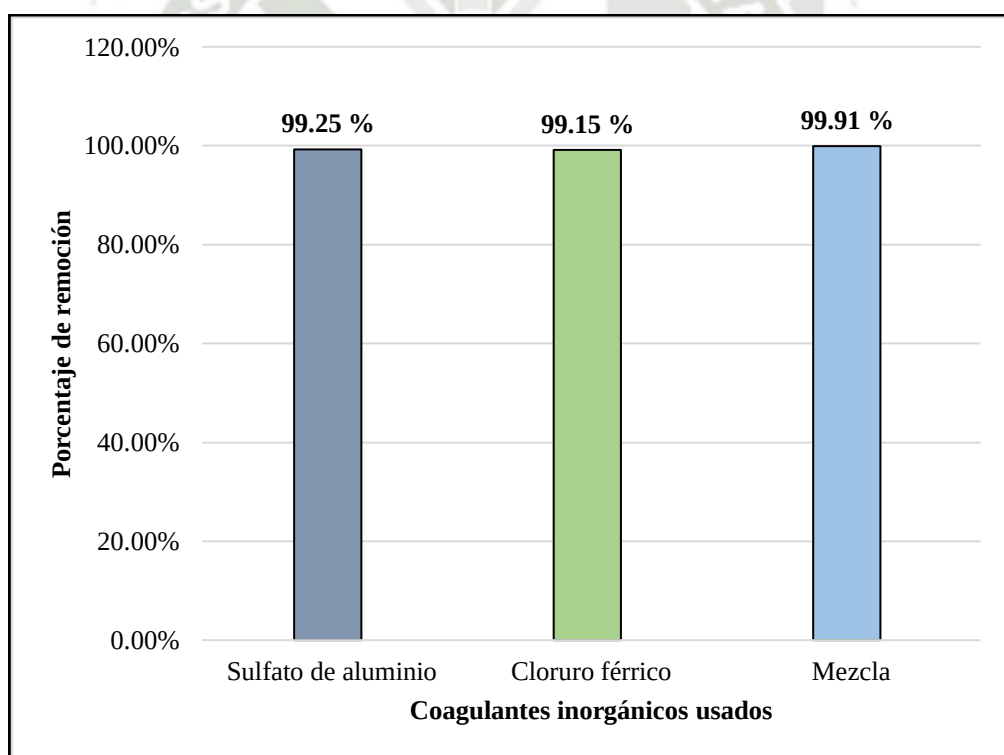


Figura 25. Comparativa de un caso de estudio en la determinación de la eficacia de remoción de cromo (VI) usando sulfato de aluminio y cloruro férrico ¹⁴⁰

CONCLUSIONES

Conclusión 1.

La información obtenida proporcionó características, similitudes y potencialidades que poseen las semillas de *Moringa* y el mucílago de Tuna en la remoción de cromo presente en aguas de curtiembre; dentro de dicha información se ha determinado que las semillas de *Moringa oleífera Lam* tienen en su interior proteínas activas que poseen aminoácidos polares en su superficie, los cuales interactúan con los coloides presentes en el agua. Por su parte, el mucílago de *Opuntia ficus-indica* está compuesto por el ácido galacturónico, el citado ácido posee una estructura aniónica y contiene grupos carboxílicos a lo largo de su cadena; lo cual va a involucrar una adsorción entre los mencionados grupos funcionales y las partículas coloides.

Conclusión 2.

Dentro de los aspectos teóricos relevantes obtenidos se encontró que las semillas de *Moringa oleífera Lam* poseen el mecanismo de coagulación de adsorción y neutralización de cargas; el cual se basa en la anulación del potencial eléctrico que poseen los coloides en su superficie, mediante la adición de coagulantes con iones de carga opuesta, el cual iniciará la reducción de la carga superficial de los coloides y su respectiva disminución de fuerza de repulsión. El mucílago de *Opuntia ficus-indica* posee el mecanismo de coagulación de adsorción y puente; el cual se sustenta en el uso de polímeros, cuando dichos polímeros presenten moléculas muy largas, van a contener grupos químicos en sus extremos que van a adsorber a los coloides; quedando libres los otros sitios de los citados polímeros.

Conclusión 3.

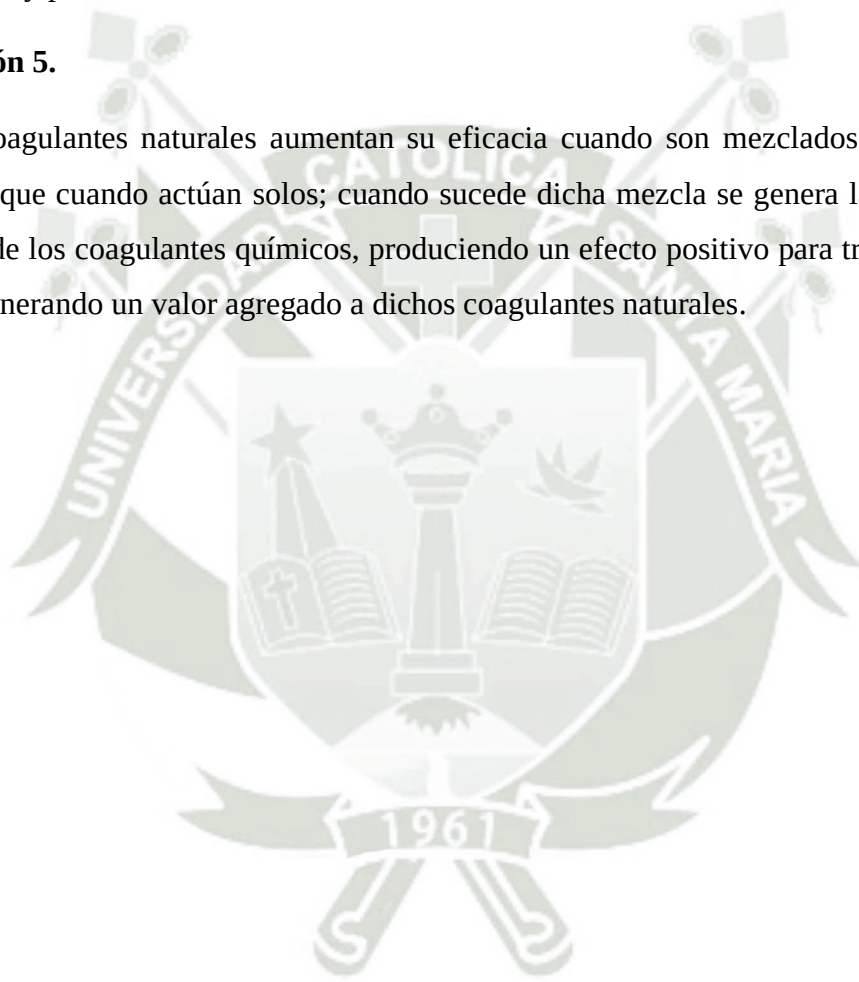
La eficiencia de las semillas de *Moringa oleífera Lam* para la remoción de cromo total logró un máximo de 99.29 % y un mínimo de 93 %; el mucílago de *Opuntia ficus-indica* tuvo un máximo de 97.37 % y un mínimo de 32 %, mientras que ambos coagulantes químicos obtuvieron un porcentaje de 99.9 %. Para el caso del cromo (VI), las semillas de *Moringa oleífera Lam* lograron un máximo y mínimo de remoción de 95.6 % y 58 % respectivamente; el mucílago de *Opuntia ficus-indica* logró un máximo de 99.5 % y un mínimo de 98.8 %; en tanto, el sulfato de aluminio y cloruro férrico obtuvieron una remoción máxima de 99.25 % y 99.15 % respectivamente. Finalmente, para el caso de cromo (III), solo se logró encontrar un caso de estudio relacionado con su remoción en aguas de curtiembre y fue usando el mucílago de *Opuntia ficus-indica*, para dicho caso el porcentaje de remoción fue de 97 %.

Conclusión 4.

Los aspectos comunes que poseen ambos coagulantes naturales usados en tratamientos de aguas residuales se sustentan en su elevada capacidad de remoción de parámetros físicoquímicos como turbidez, color, DQO, DBO₅, turbidez, carga microbiana, conductividad, sólidos totales disueltos, cloruros y sulfatos, por citar algunos; así como también su alta eficacia para remover metales pesados presentes en aguas residuales como, hierro, cobre, zinc, cadmio, magnesio, manganeso y plomo.

Conclusión 5.

Ambos coagulantes naturales aumentan su eficacia cuando son mezclados con coagulantes químicos que cuando actúan solos; cuando sucede dicha mezcla se genera la disminución en cantidad de los coagulantes químicos, produciendo un efecto positivo para tratar de disminuir su uso; generando un valor agregado a dichos coagulantes naturales.



PERSPECTIVAS FUTURAS

La presente tesis tuvo como objetivo general proporcionar información relevante, científica, fidedigna y actualizada, conseguida a través de la búsqueda en artículos científicos, libros, tesis, revistas indexadas y bases de datos interactivas, multidisciplinarias y especializadas para poner a disposición de manera resumida una serie de informaciones, indagaciones y datos que puedan ser útiles y usados como una fuente confiable para diversas perspectivas o enfoques, tales como:

a) *Generación de nuevos proyectos*

Ante las nuevas innovaciones que se vienen dando en tratamientos de aguas residuales a nivel de la ciudad de Arequipa, se propone implementar una técnica que sea:

- Eficiente; comparable con los coagulantes químicos usados.
- Segura; que no altere las propiedades del agua tratada ni genere problemas en la salud.
- Económica; que sea accesible a la población en general.

La generación y posterior empleo de coagulantes y floculantes naturales puede servir como una alternativa para minimizar o evitar el uso e importación de los coagulantes químicos; lo que se busca con esta investigación es crear una alternativa para potenciar y darle un valor agregado a dos productos naturales:

- Semillas de *Moringa oleífera Lam*; las cuales suelen ser desechadas o usadas como alimento para animales de granja.
- Mucílago de penca de *Opuntia ficus-indica*; suele usarse esta planta para realizar delimitaciones y cercos en terrenos agrestes o invasiones.

Adicionalmente, la puesta en marcha de nuevas investigaciones y de darlas a conocer no solamente a la comunidad científica, sino a la población local en general abre una ventana en el cambio de pensar y actuar de la población (especialmente en los empresarios de las industrias del curtido) en cuanto a temas ambientales, haciéndoles saber que se pueden obtener grandes beneficios a partir de darles un valor agregado a productos naturales y comunes que tenemos en nuestra vida cotidiana.

b) *Enfoque medioambiental*

Es conocido que la industria del curtido de pieles genera grandes impactos negativos al ambiente, provocando cambios en la naturaleza del agua; este proyecto propone la

implementación de una tecnología amigable con el ambiente, usando materia prima de fácil accesibilidad y bajo costo; teniendo el objetivo de reducir, mitigar o minimizar dichos impactos ambientales negativos que genera la industria de la curtiembre.

Las industrias de la curtiembre en Arequipa se encuentran alejadas del centro de la ciudad, la mayoría se encuentra en Río Seco – Cerro Colorado, razón por la cual sus impactos ambientales no son muy tomados en cuenta por la mayoría de población, dado que no los afecta de manera directa; pero que en contraposición sí afecta directamente la salud de la población cercana.

Lo que se busca con esta tesis es reducir el impacto ambiental negativo que producen dichas industrias y que se ve reflejado en la salud de la población afectada, además de dar la posibilidad de generar empresa y empleo a nivel local a partir de una tecnología segura, de bajo costo y de fácil accesibilidad a la población directamente involucrada.

c) *Implicancias biotecnológicas*

La obtención de coagulantes/floculantes naturales y su importancia radica en que se trata de un método aplicable a nuestra realidad; dado que es accesible económicamente y muy fácil de obtener, lo cual calzaría de manera perfecta a nuestra sociedad; además no altera el pH ni el sabor del agua tratada, es amigable al medioambiente, no altera los materiales en donde se le prepara (como es el caso de algunos coagulantes químicos que son corrosivos). Finalmente, cuando se agrega coagulantes naturales, se disminuye la cantidad de coagulantes químicos, lo que genera un menor uso de dichos químicos, dándole un valor agregado a dos productos que son usados como cercos perimétricos en terrenos como es la penca de *Opuntia ficus-indica* o usados como ensilaje para animales de granja como es el caso de las semillas de *Moringa oleífera* Lam.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Islam, B.I. et al.** Evaluation and Characterization of Tannery Wastewater. *Journal of Forest Products & Industries* 2014; 3(3): 141-150.
2. **Su, C. et al.** A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques. *Environmental Skepticsand Critics* 2014; 3(2): 24-38.
3. **Appiah - Brempong. M. et al.** Artisanal tannery wastewater: quantity and characteristics. *Heliyon* 2021; 1-10.
4. **Shukla, A. et al.** Studies on recovery of heavy metals from tannery wastewater. *International Journal of Engineering, Science and Technology* 2021; 13(1): 76-80.
5. **Abddulkadir, Y. et al.** Process for chromium (VI) removal from mechanized tannery wastewater using activated carbón obtained from tannery solid wastes. *FUDMA Journal of Sciences* 2021; 5(1): 364-371.
6. **Álvarez-Bernal, D. et al.** Effects of tanneries wastewater on chemical and biological soil characteristics. *Applied Soil Ecology* 2006; 33: 269-277.
7. **Parada, M. et al.** Wastewater treatment technologies review for a tannery in Ecuador. *Revista Ciencia e Ingeniería* 2019; 40(2): 126-136.
8. **Ludvik, J.** Chrome management in the Tanyard. *United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)* 2000; 3-39.
9. **Campos, J.L. et al.** Producción limpia en la industria de curtiembres. *Universidad de Santiago de Compostela* 2007; 141-163
10. **Artiga, P.** Contribución a la mejora del tratamiento biológico de aguas residuales de la industria de curtidos [Tesis Doctoral para optar el Grado de Doctor en Ingeniería Ambiental]. *Compostela: Universidad de Santiago de Compostela*; 2005.
11. **EE, S.M., Lalchhingpuii, L. and Tiwari, D.** Synthesis of functionalized biomaterials and its application in the efficient remediation of aquatic environment contaminated with Cr (VI). *Chemical Engineering Journal* 2016; 296: 35-44.
12. **Toxics Use Reduction Institute University of Massachusetts Lowell (TURI).** Five Chemicals Alternatives Assessment Study 2006 [Internet]. *Massachusetts: TURI*; 2006. Disponible en: <http://www.turi.org>.
13. **Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR).** Resumen de Salud Pública: Cromo 2016 [Internet]. *Atlanta: ATSDR*; 2016. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/>.

14. **Díez Claros, J.** Coagulantes - Flocculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra para el tratamiento de aguas contaminadas [Tesis para optar el Título de Master en Educación en las Ciencias Naturales con Orientación en la Enseñanza de la Química]. Tegucigalpa: Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazán; 2014.
15. **Cuello, S. & Vera, G.** Curso de Curtido Ecológico y Artesanal de cueros. INTA E.E.A. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1-22.
16. **Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles (CPTS).** Guía Técnica de Producción más Limpia para Curtiembres 2003 [Internet]. La Paz: CPTS; 2003. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Juan-Cristobal-Birbuet/publication/291333001_Guia_Tecnica_de_Produccion_Mas_Limpia_para_Curtiembres/links/569fd21108ae2c638eb7c6e6/Guia-Tecnica-de-Produccion-Mas-Limpia-para-Curtiembres.pdf.
17. **Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica del Cuero, Calzado e Industrias Conexas (CITEccal).** Buenas prácticas de producción para la reducción de contaminantes en descargas líquidas, aplicables a Curtiembres MYPEs en el Parque Industrial Río Seco de Arequipa. Arequipa: CITEccal; 2020. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/342851785_Buenas_Practicas_de_Produccion_para_la_reduccion_de_contaminantes_en_descargas_liquiditas_aplicables_a_Curtiembres_MYPEs_en_el_Parque_Industrial_Rio_Seco_de_Arequipa
18. **Ministerio del Ambiente de Ecuador.** Estudio para conocer los potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador 2013 [Internet]. Ecuador: Ministerio del Ambiente. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/03/PART11.pdf>
19. **Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales.** Proyecto Gestión Ambiental en la Industria de la Curtiembre en Colombia. 2004 [Internet]. Medellín: CNPMLTA; 2004. Disponible en: <https://cambioclimatico-regatta.org/index.php/es/instituciones-clave/item/centro-nacional-de-produccion-mas-limpia-y-tecnologias-ambientales>.
20. **Ley N.º 28611.** Ley General del Ambiente. Lima: Diario Oficial El Peruano; 13 de octubre de 2005.
21. **Ley N.º 29338.** Ley de los Recursos Hídricos. Lima: Diario Oficial El Peruano; 31 de marzo de 2009.

22. **D.S. N.º 004-2017-MINAM.** Aprueban Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias. Lima: Diario Oficial El Peruano; 7 de junio de 2017.
23. **D.S. 017-2015-PRODUCE.** Aprueban el Reglamento de Gestión Ambiental para la Industria Manufacturera y Comercio Interno. Lima: Diario Oficial El Peruano; 8 de junio de 2015.
24. **D.S. 010-2019-VIVIENDA.** Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. Lima: Diario Oficial El Peruano; 11 de marzo del 2019.
25. **D.S. 002-2009-MINAM.** Aprobación del Reglamento sobre Transparencia, Acceso a la información pública ambiental y participación y consulta en asuntos ambientales. Lima: Diario Oficial El Peruano; 17 de enero de 2009.
26. **R.M. 466-2019-PRODUCE.** Aprueban Términos de Referencia para la elaboración de los instrumentos de gestión ambiental correctivos de la industria manufacturera y de comercio interno. Lima: Diario Oficial El Peruano; 31 de octubre de 2019.
27. **D.S. 003-2002-PRODUCE.** Aprueban Límites Máximos Permisibles y Valores Referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel. Lima: Diario Oficial El Peruano; 4 de octubre de 2002.
28. **D.L N.º 1278.** Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Lima: Diario Oficial El Peruano; 23 de diciembre de 2016.
29. **Salas, G.** Eliminación de sulfuros por oxidación en el tratamiento del agua residual de una curtiembre. *Rev. Per. Quím. Ing. Quím.* 2005; 8 (1): 49-58.
30. **Salas, G.** Valorización de los residuos líquidos de una curtiembre provenientes de la etapa de pelambre. *Rev. Per. Quím. Ing. Quím.* 2006; 9 (2): 44-49.
31. **Comisión Nacional del Medioambiente – Región Metropolitana.** Guía para el control y prevención de la contaminación industrial – Curtiembre 1999 [Internet]. Santiago de Chile: CONAMA; 1999. Disponible en: <https://www.virtualpro.co/biblioteca/guia-para-el-control-y-la-prevencion-de-la-contaminacion-industrial-curtiembre>.
32. **Hossan, Sh. et al.** Bioremediation of Hexavalent Chromium by Chromium Resistant Bacteria Reduces Phytotoxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2020; 17: 1-19.
33. **Esparza, E. & Gamboa, N.** Contaminación debido a la industria de la curtiembre. *Rev. Per. Quím.* 2001; 15(1): 41-63.

34. **Dirección General de Salud (DIGESA).** Grupo de Estudio Técnico Ambiental GESTA AGUA.
35. **Independent Environmental Technical Evaluation Group (IETEG).** Chromium (VI) Handbook 2004 [Internet]. New York: Guertin, J.; Jacobs, J. & Avakian, C; 2022 [citado el 19 de enero de 2022]. Disponible en: <https://books.google.co.cr/books?id=bUCFwSF7WhgC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>.
36. **International Programme on Chemical Safety (IPCS).** Inorganic chromium (III) compounds 2009 [Internet]. USA: IPCS; 2022. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/44090>
37. **Vincent, J.** The Biochemistry of Chromium (III). The Journal of Nutrition 2007; 130(4): 715-718.
38. **Shrivastava, R. et al.** Effects of chromium on the immune system. FEMS Immunology & Medical Microbiology 2002; 34(1): 1-7.
39. **The Massachusetts Toxics Use Reduction Institute.** Five Chemicals Alternatives Assessment Study 2006 [Internet]. Massachusetts: TURI; 2022 [citado el 25 de enero de 2022]. Disponible en: www.turi.org.
40. **Lunk, H-J.** Discovery, properties and applications of chromium and its compounds. ChemTexts 2015; 1-17.
41. **Hesham, A. et al.** Chromium removal from tannery wastewater using chemical and biological techniques aiming zero discharge of pollution. Proceeding of fifth scientific environmental conference 2010; 171-183.
42. **Chandra Sarker, B.; Basak, B. & Islam, Md.** Chromium effects of tannery wastewater and appraisal of toxicity strength reduction and alternative treatment. International Journal of Agronomy and Agricultural Research (IJAAR) 2013; 3 (11): 23-25.
43. **Mohanty, M. & Kumar Patra, P.** Attenuation of Chromium Toxicity by Bioremediation Technology. Rev Environ Contam Toxicol 2010; 210: 1-34.
44. **Kumar Gupta, A. et al.** Bioremediation of tannery chromium: A microbial approach. Research Journal of Pharmacy and Technology (RJPT) 2014; 7 (1): 118-122.
45. **Avudainayagam, S. et al.** Chemistry of Chromium in Soils with Emphasis on Tannery Waste Sites. Rev Environ Contam Toxicol 2003; 178: 53-91.
46. **McNeill, L. et al.** State of the Science of Hexavalent Chromium in Drinking Water. Water Research Foundation 2012; 1-36.

47. **Mwinyihija, M.** Main Pollutants and Environmental Impacts of the Tanning Industry - Ecotoxicological Diagnosis in the Tanning Industry. Springer Science Business Media 2010; 1-20.
48. **Genawi, N.; Ibrahim, M.; El-Nass, M. & Alshaik, A.** Chromium Removal from Tannery Wastewater by Electrocoagulation: Optimization and Sludge Characterization. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MPDI) 2020; 12(5): 1-12.
49. **Mohan, D. & Pittman Jr, Ch.** Activated carbons and low-cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium for water. Journal of Hazardous Materials 2006; 762-811.
50. **Dhal, B. et al.** Chemical and microbial remediation of hexavalent chromium from contaminated soil and mining/metallurgical solid waste: A review. Journal of Hazardous Materials 2013; 272-291.
51. **Ramesh, V. & Kumar, A.** *Moringa oleífera* as a natural coagulant. International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology (IJARIIT) 2019; 5 (2): 1333-1338.
52. **Effendi, H.; Delima Sari, R. & Hasibuan, S.** *Moringa oleífera* as coagulant for batik effluent treatment. International Association for Impact Assessment 2015; 1-6.
53. **Ali, E. et al.** Production of Natural Coagulant from *Moringa Oleífera* seed for Application in Treatment of Low Turbidity Water. J. Water Resource and Protection 2010; 2: 259 -266.
54. **Tunggolou, J. & Payus, C.** *Moringa Oleífera* as coagulant used in water purification process for consumption. Earth Science e Pakistán 2017; 1 (2): 1-3.
55. **Hadi, M. & Bina, B.** Application of *Moringa oleífera* coagulant protein as natural coagulant aid with alum for removal of heavy metals from raw water. Desalination and Water Treatment 2018; 116: 187-194.
56. **Sulaiman, M. et al.** *Moringa oleífera* seed as alternative natural coagulant for potential application in water treatment: A review. Journal of Advanced Review on Scientific Research 2017; 30 (1): 1-11.
57. **Deshmukh, S.O. & Hedao, M.N.** Wastewater Treatment Using Bio-Coagulant as Cactus *Opuntia Ficus Indica*. 2nd International Conference on New Frontiers in Chemical, Energy and Environmental Engineering (INCEEE) 2019; 1-6.
58. **Nougbo, Y. et al.** Evaluation of the *Opuntia dillenii* as Natural Coagulant in Water Clarification: Case of Treatment of Highly Turbid Surface Water. Journal of Water Resource and Protection 2013; 5: 1242-1246.

59. **Bouatay, F. & Mhenni, F.** Use of the Cactus Cladodes Mucilage (*Opuntia ficus-indica*) As an Eco-Friendly Flocculants: Process Development and Optimization using Stastical Analysis. Int. J. Environ. Res (ISSN) 2014; 8 (4): 1295-1308.
60. **Taa, N.; Benyahya, M. & Chaouch, M.** Using a bio-flocculent in the process of coagulation flocculation for optimizing the chromium removal from the polluted water. J. Mater. Environ. Sci 2016; 7 (5): 1581-1588.
61. **Gandiwa, B.I. et al.** Optimization of using a blend of plant based natural and synthetic coagulants for water treatment: (*Moringa Oleífera-Cactus Opuntia*-alum blend). South African Journal of Chemical Engineering South African Journal of Chemical Engineering 2020; 34: 158-164.
62. **Amira, A.; Ali, A. & Omar, B.** Synthesis and application of a new biomaterial based on *Opuntia ficus indica* (cactus) in water treatment. Algerian Journal of Engineering Research (AJER) 2017; 1: 11-17.
63. **Cabrera Rivas, I.** Formulación de una mezcla constituida por semillas de moringa (*Moringa oleífera*) y sulfato de aluminio, para ser usada en el proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua residual [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico]. Lambayeque: Universidad Pedro Ruiz Gallo; 2019.
64. **Arenas Díaz, M.** Efecto de la remoción del aceite de las semillas de *Moringa oleífera* en el tratamiento de aguas por coagulación-floculación [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniera Ambiental]. Lima: Universidad Agraria La Molina; 2019.
65. **Mejía Carrillo, P.W.; Urquía Collantes, K.; Cabello Torres, R.J. & Valdivieso Gonzales, L.G.** Evaluación de la *Moringa oleífera* en el tratamiento de aguas con alta turbidez y carga orgánica. Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua (FFIA) 2020; 119-127.
66. **López Pérez, M.** Evaluación del uso de la cactácea *Opuntia ficus-indica* como coagulante natural para el tratamiento de aguas [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniera Ambiental]. Lima: Universidad Agraria La Molina; 2018.
67. **Inga Díaz, G.** Disminución de coliformes totales y turbidez mediante coagulantes naturales (*Opuntia ficus indica*) del río cunas, provincia de Chupacas [Tesis para optar el Título Profesional de Maestro en Ingeniería Ambiental]. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú; 2019.
68. **Pinto Guzmán, A.L.** Evaluación y comparación de la efectividad del uso de floculantes naturales *Aloe vera* (Sábila) y *Opuntia ficus-indica* (Nopal/Tuna) y orgánicos (Ferrocryl ® y Chemlok 2040 ®) en el tratamiento de aguas residuales del proceso de teñido de la

- empresa Franky y Ricky S.A [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniera Biotecnóloga]. Arequipa: Universidad Católica de Santa María; 2017.
69. **Pérez, A. et al.** Características y Potencialidades de *Moringa oleífera*, Lamark. Una alternativa para la alimentación animal. Pastos y Forrajes 2010; 33 (4) 1-16.
 70. **Fuglie L. J.** Combating malnutrition with Moringa. In: The miracle tree: the multiple attributes of Moringa. CTA Publication. Wageningen 2001; 6 (4): 117-136.
 71. **Foidl, N. et al.** The potential of *Moringa oleífera* for agricultural and industrial uses. In: Development potential for moringa products: International workshop 2001; 1-21.
 72. **Reddy, D.H.K. et al.** Biosorption of Ni (II) from aqueous phase by *M. oleífera* bark, a low cost biosorbent. DESALINATION: The International Journal on the Science and Technology of Desalting and Water Purification 2011; 268 (1-3): 150-157.
 73. **Rashid, U. et al.** *Moringa oleífera* oil: A possible source of biodiesel. Bioresource Technology 2008; 99 (17): 8175-8179.
 74. **Martín C. et al.** Potenciales Aplicaciones de *Moringa oleífera*. Una revisión crítica. Pastos y Forrajes 2013; 36 (2): 137-149.
 75. **Hernández Sánchez, M. et al.** Evaluación de la efectividad de la semilla de Teberinto (*Moringa oleífera*) como método de remoción de arsénico y plomo en agua para consumo humano [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniera Agroindustrial]. San Salvador: Universidad de El Salvador; 2017.
 76. **Cáceres, C. & Díaz, J.** Propuesta de tratamiento de aguas de desecho de una industria química de adhesivos utilizando extracto acuoso de la semilla de *Moringa oleífera* (Teberinto) [Tesis para optar el Título Profesional de Químico Farmacéutico]. El Salvador: Universidad de El Salvador; 2005.
 77. **Más y Rubí, M. et al.** Eficiencia de las semillas de *Moringa oleífera* como coagulante orgánico en la remoción de metales en aguas de baja turbidez. Revista Tecnocientífica URU 2013; 5: 27-37.
 78. **García Roa, M.** Producción de semillas forestales de especies forrajeras enfatizadas en sistemas silvopastoriles. Instituto Nacional Forestal (INAFOR) 2003; 27-30.
 79. **Ponce Núñez, E.** Validación de la efectividad de la semilla de *Moringa oleífera* como coagulante natural del agua, destinada al consumo humano, Moroceli, Honduras [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniera en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente]. Zamorano: Universidad Zamorano; 2007.
 80. **Melo Vargas, G. & Turriago Ríos, F.** Evaluación de la eficiencia de la utilización de semillas de *Moringa oleífera* como una alternativa de biorremediación en la purificación

- de aguas superficiales del caño cola de pato ubicado en el sector rural del Municipio de Acacias [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Agroforestal]. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD); 2012.
81. **Liñán Tobías, F.** *Moringa oleífera* el árbol de la nutrición. Ciencia y Salud Virtual 2010; 2 (1):130-138.
 82. **Parrotta, John.** *Moringa oleífera* Lam. Reseda, árbol de rábano picante. moringáceas. Familia del árbol del rábano picante. Servicio Forestal del USDA, Instituto Internacional de Dasonomía Tropical 1993; 366-370.
 83. **Alfaro, C. & Martínez, W.** Uso potencial de la Moringa (*Moringa oleífera*, Lam) para la producción de Alimentos Nutricionalmente Mejorados. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá 2008; 1-31.
 84. **Folkard, G. & Sutherland, J.** *Moringa oleífera*, A tree with enormous potentialities. Agroforestry Today 1996; 8 (3): 5-8.
 85. **Deshmukh, S.O. & Hedao, M.N.** Wastewater Treatment Using Bio-Coagulant as Cactus *Opuntia Ficus Indica*. 2nd International Conference on New Frontiers in Chemical, Energy and Environmental Engineering (INCEEE) 2019; 1-5.
 86. **Prisa, D.** *Opuntia ficus-indica* the kay plant in climate change: characteristics, cultivation and uses. GSC Biological and Pharmaceutical Sciences 2021; 17 (2): 94-105.
 87. **Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Cultura (FAO) y Science for resilient livelihoods in dry áreas (ICARDA).** Ecología del cultivo, manejo y usos del Nopal 2018 [Internet]: Italia, México, Túnez, Chile; 2022 [citado el 06 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i7628es/I7628ES.pdf>.
 88. **De Wit, M. et al.** The Effect of Variety and Location on Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica*) Fruit Quality. Plant Foods Hum Nutr 2010; 65: 136-145.
 89. **El-Mostafa, K. et al.** Nopal Cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a Source of Bioactive Compounds for Nutrition, Health and Disease. Molecules 2014; 19: 14879-14901.
 90. **Patrick Griffith, M.** The origins of an important Cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): new molecular evidence. American Journal of Botany 2004; 91 (11): 1915-1921.
 91. **Abou-Elella, F. & Mohammed Ali, R.** Antioxidant and Anticancer Activities of Different Constituents Extracted from Egyptian Prickly Pear Cactus (*Opuntia ficus-indica*) Peel. Biochemistry & Analytical Biochemistry 2014; 3 (2): 1-9.

92. **Djerroud, N. et al.** Enhanced electrocoagulation-electroflotation for turbidity removal by *Opuntia ficus-indica* cladode mucilage. *Water and Environment Journal* 2018; 32: 321-332.
93. **Ettalibi, F.; Al Antari, A.; Hamouda, A.; Gadhi, Ch. & Harrak, H.** Comparative Assessment of Physical and Chemical Characteristics of Phickly Pear Seed Oil from *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia ficus-megacantha* Varieties. *Journal of Food Quality* 2021; 1-8.
94. **Trindade, S.; Rouxinol, M.I.; Nabais, J. & Agulheiro-Santos, A.C.** Evaluation of the Potential of the *Opuntia ficus-indica* Cladodes as a Natural Flocculant for Wastewater Treatment through Simple Procedures. *Journal of Ecological Engineering* 2021; 22 (5): 249-257.
95. **Figueroa, J.A. et al.** *Opuntia ficus-indica* is an excellent eco-friendly biosorbent for the removal of chromium in leather industry effluents. *Heliyon* 2021; 1-7
96. **El Bouaidi, W. et al.** Evaluation of the potentiality of *Vicia faba* and *Opuntia ficus-indica* as eco-friendly coagulants to mitigate *Microcystis aeruginosa* blooms. *Desalination and Water Treatment* 2020; 196: 198-213.
97. **Scarano, P. et al.** Sustainability: Obtaining Natural Dyes from Waste Matrices Using the Pickly Pear Peels of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *Agronomy* 2020; 10 (528): 1-17.
98. **Konkobo, A.; Diao, M.; Savadogo, P.; Diarra, J. & Dicko, M.** Comparative study of the effects of Herbal and chemical Coagulants in the clarification of raw water. *African Journal of Agricultural Research* 2021; 17 (4): 532-541.
99. **Prakash, N.B.; Sockan, V. & Jayakaran, P.** Waste Water Treatment by Coagulation and Flocculation. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)* 2014; 3 (2): 479-483.
100. **Dargo Beyene, H.; Derbe Hailegebrial, T. & Batu Dirersa, W.** Investigation of Coagulation Activity of Cactus Powder in Water Treatment. *Journal of Applied Chemistry* 2016; 2016: 1-10.
101. **Muda, K. et al.** Potential use of fruit seeds and plant leaves as coagulation agent in water treatment. *Journal of Environmental Treatment Techniques* 2020; 8 (3): 971-977.
102. **Cui, H. et al.** Application progress of enhanced coagulation in water treatment. *Royal Society of Chemistry* 2020; 10: 20231-20244.
103. **Bratby J.** Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment. Third Edition. London: IWA Publishing; 2016; 1-340.

104. **Mousa, K. & Al-Hasan, A.** Oilfield Produced Water Treatment by Coagulation/Flocculation Processes. College of Engineering Al-Nahrain 2017; 75-79.
105. **Sanexa, G. et al.** Environmental Pollution, Toxicity Profile and Treatment Approaches for Tannery Wastewater and Its Chemical Pollutants. Reviews of environmental contamination and toxicology 2016; 31-59.
106. **Muruganandam, L et al.** Treatment of wastewater by coagulation and flocculation using biomaterials. International Conference on Science, Engineering the Technology ICSET 2017; 263: 1-11.
107. **Mohammadizaroun, M. & Suffian Yusoff, M.** Review on Landfill leachate treatment using physical-chemical techniques: Their performance and limitations. International Journal of Current Life Sciences 2014; 4 (12): 12068-12074.
108. **Chai Siah, L et al.** A review on application of flocculants in wastewater treatment. Process Safety and Environmental Protection 2014; 92: 489-508.
109. **Kian-Hen, Ch. & Peck-Loo, K.** Potential of Banana Peels as Bio-flocculant for water clarification. Progress in Energy and Environmental 2017; 1: 47-56.
110. **Sahu, O.P. & Chauddhari, P.K.** Review on Chemical treatment of Industrial Waste Water. Journal of Applied Sciences and Environmental Management 2013; 17 (2): 241-257.
111. **Vamshi Harsha Madiraju, S. et al.** Examination of plant-based coagulants to replace and alum for surface water treatment. 112th Annual Conference & Exhibition Quebec City 2019; 1-9.
112. **Kumar, V. et al.** Partial Replacement of Alum by Using Natural Coagulant Aid to Remove Turbidity from Institutional Wastewater. The International Journal of Integrated Engineering 2020; 12 (4): 241-251.
113. **Mungundori, H. et al.** Performance intensification of the coagulation process in drinking water treatment. Water SA 2021; 47 (2): 154-161.
114. **Georgantas, D.A. & Grigoropoulou, H.P.** Phosphorus and Organic Matter Removal from Synthetic Wastewater using Alum and Aluminum Hydroxide. Global NEST Journal 2006; 8 (2): 121-130.
115. **Genena, A.K. et al.** Natural coagulants replacing ferric chloride for wastewater slaughterhouses treatment. International Journal of Advance Engineering Research and Science 2020; 7 (7): 568-583.
116. **Persson, I.** Ferric Chloride Complexes in Aqueous Solution: An EXAFS Study. J Solution Chem 2018; 47: 797-805.

- 117.**Swenden, R.H.** Statistical mechanics of colloids and Boltzmann's definition of the entropy. American Association of Physics Teachers 2006; 74 (3): 187-190.
- 118.**Raza Malik, Sh. et al.** Coagulation Flocculation based biological treatment of tannery industry wastewater using potash alum and drefloc. European Journal of Advances in Engineering and Technology 2017; 4 (1):71-75.
- 119.**Ajao, Victor. et al.** Bioflocculants from wastewater: Insights into adsorption affinity, flocculation mechanisms and mixed particle flocculation based on biopolymer size-fractionation. Journal of Colloid and Interface Science 2021; 581: 533-544.
- 120.**Ukiwe. L.N. et al.** Chemical and Electro-coagulation Techniques in Coagulation – Flocculation in Water and Wastewater Treatment – A Review. ISSN International Standard Serial Number 2014; 9 (3): 1988-1999.
- 121.**Imran, Q. et al.** Coagulation/Flocculation of Tannery Wastewater using Immobilized Chemical Coagulants. Journal of Applied Research and Technology 2012; 10: 79-86.
- 122.**Canepa de Vargas, L.** Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Tomo 1. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). 2004; 265-303.
- 123.**Lopera López, F.** Proceso de Coagulación en el tratamiento de aguas residuales de una heladería: Eficiencia de diferentes coagulantes de origen inorgánico. [Tesis para optar el Título Profesional de Licenciada en Química]. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas; 2019.
- 124.**Ajao, V. et al.** Natural flocculants from fresh and saline wastewater: Comparative properties and flocculation performances. Chemical Engineering Journal 2018; 349: 622-632.
- 125.**Macczac, P. et al.** Recent Achievements in Polymer Bio-Based Flocculants for Water Treatment. Publisher of Open Access Journals (MDPI) 2020; 13: 1-41.
- 126.**Deeba, F. et al.** Utilization of *Moringa oleifera* seeds for treatment of canal and industrial wastewater – an alternative sustainable solution for developing countries. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES) 2015; 7 (1): 54-60.
- 127.**Abdulsalam, S. et al.** Biosorption of Chromium (VI) Ion from Tannery Waste Water Using Two Novel Agricultural By-Products. International Journal of Innovation, Management and Technology 201; 5 (2): 78-82.
- 128.**Tanko, M.A. et al.** Application of *Moringa oleifera* seed extract (Mose) in the removal of heavy metals from tannery wastewater. Nigerian Journal of Technological Development 2020; 17 (2): 70-78.

129. **Kamala Sankari Madhavan, S.A. & Karpagam, S.** Natural coagulants: An easy way to remove heavy metals from tannery effluents. *Journal of Industrial Pollution Control* 2019.
130. **Salelign Yazie, K. et al.** Removal of Chromium from leather industry effluents. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)* 2019; 67 (5): 163-171.
131. **Bravo Gallardo, M.** Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales. [Tesis para optar el Título Profesional de Licenciada en Química]. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas; 2017.
132. **Olivera Huacasi, M.** Remoción de cromo VI de aguas residuales de curtiembre utilizando el polvo de la semilla de *Moringa oleífera* como coagulante natural en la región Puno [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniera Ambiental]. Puno: Universidad Peruana Union; 2018.
133. **Morales-Aredo, J. et al.** Tuna, potencial adsorbente de cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) de aguas contaminadas. 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology 2020; 1-7.
134. **Getahun Mebrate, T. & Geremew Sahilu, G.** Assessment of Cactus biosorption potential of Cr (VI) ions removal from synthetic and tannery wastewater. *Research Square* 2022; 1-13.
135. **Riaz, M.S. et al.** Coagulation/Flocculation of tannery wastewater using immobilized natural coagulants. *Journal of Environmental Protection and Ecology* 2012; 13 (3): 1948-1957.
136. **Ahmed, I. et al.** Analysis and Treatment of Tannery Wastewater by using combined filtration and coagulation treatment process. *Pakistan Academy of Sciences* 2016; 53 (3): 179-183.
137. **Banuraman, S. & Meikandaan, T.P.** Treatability study of tannery effluent by enhanced primary treatment. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)* 2013; 3 (1): 119-122.
138. **Manjushree, Ch. et al.** Treatment of leather industrial effluent by filtration and coagulation processes. *Water Resources and Industry* 2013; 3: 11-22.
139. **Sari Ekran, H. et al.** The investigation of chemical coagulation and electrocoagulation processes for tannery wastewater treatment using response surface methodology. *Desalination and Water Treatment* 2018; 113: 57-73.

140. **Nazmul Islam, K.M. et al.** Efficiency of different coagulants combination for the treatment of tannery effluents: A case of study of Bangladesh. *African Journal of Environmental Science and Technology* 2011; 5 (6): 409-419.
141. **Ulu, F. & Kobya, M.** Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation. *EurAsia Waste Management Symposium* 2020; 1-7.
142. **Zhu, H. et al.** Removal of typical pollutants from water sources of Chouara Tannery by the integration of coagulation-flocculation and activated carbón treatment. *Desalination and Water Treatment* 2020; 196: 67-75.
143. **Maldonado García, Sara.** Coagulantes químicos de reciente generación, tendencias de uso, precio y dosificación en Colombia y el mundo. [Trabajo de grado Monográfico para optar el Título Profesional de Ingeniera Ambiental]. Pamplona: Universidad de Pamplona; 2016.
144. **Swathi, M. et al.** Experimental studies on tannery wastewater using cactus powder as an adsorbent. *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research* 2014; 3 (2): 436-446.
145. **Taa, N. et al.** Using a bio-flocculent in the process of coagulation flocculation for optimizing the chromium removal from the polluted water. *Journal of Materials and Environmental Science (JMES)* 2016; 7 (5): 1581-1588.
146. **Rimawi, W. et al.** Removal of chromium ions from tannery wastewater using cactus powder. *Oriental Journal of Chemistry* 2020; 36 (1): 132-138.
147. **Mane, P. et al.** Heavy metal removal from aqueous solution by Opuntia: A natural polyelectrolyte. *Journal of Natural Produce and Plant Resource* 2011; 1 (1): 75-80.
148. **Ramírez Arcila, H. & Jaramillo Peralta, Jh.** Agentes naturales como alternative para el tratamiento del agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas* 2015; 11 (2): 136-153.
149. **Castellanos Beltrán, L. & Martín Daza, M.** Desarrollo de un coagulante orgánico a partir de la semilla de Moringa para la empresa comercial Dacetex LTDA [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico]. Bogotá: Fundación Universidad de América; 2020.
150. **Kazi, T. & Virupakshi, A.** Treatment of tannery wastewater using natural coagulants. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)* 2013; 2 (8): 4061-4068.
151. **Hernández Sampieri, R. et al.** Metodología de la investigación. Quinta edición. México D.F: McGraw-Hill; 2010: 1-656.

152. **Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL).** Tratamiento de Agua: Coagulación y Floculación 2000 [Internet]. Lima: SEDAPAL; 2023 [citado el 25 de febrero de 2023]. Disponible en: <https://www.gob.pe/sedapal>
153. **Resolución N.º 023-2016-OEFA/TFA-SEM (MINAM).** Resolución directoral referida a los metales pesados como contaminantes ambientales peligrosos por su no biodegradabilidad y riesgo de acumulación. Lima: Diario Oficial El Peruano; 18 de abril de 2016.
154. **Huamaní Taípe, G.** La industria de la curtiembre y su incidencia en el medioambiente de la ciudad de Lima – 2012 [Tesis para optar el Título Profesional de Maestro en Productividad y Relaciones Industriales]. Callao: Universidad Nacional del Callao; 2014.
155. **Castrillón Bedoya, D. & Giraldo, M.** Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento Villa Santana [Tesis para optar el Título Profesional de Tecnólogo Químico]. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira; 2012.
156. **Barrenechea Martel, A.** Tratamiento de agua para consumo humano. Lima: OPS (Organización Panamericana de la Salud); 2004: 153-219.
157. **Gómez Puentes, N.** Remoción de materia orgánica por Coagulación – Floculación. [Trabajo de grado Monográfico para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico]. Manizales: Universidad Nacional de Colombia; 2005.
158. **Escudero Sánchez, C. & Cortez Suárez, L.** Técnicas y Métodos Cualitativos para la Investigación Científica. Primera Edición. Machala: Editorial UTMACH; 2017: 42 – 54.
159. **Lorenzo-Acosta, Y.** Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) 2006; 40 (2): 10 -17.
160. **Murillo M, S. et al.** Manual técnico para la elaboración de coagulantes/floculantes a partir de productos naturales. Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación (SENNOVA) 2020; 1: 1-39.
161. **Campos Castro, H.** Efecto coagulante de la semilla de Moringa (*Moringa oleífera*) para clarificar agua del canal Monsefú, centro poblado Callanca, distrito Monsefú. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental]. Lambayeque: Universidad de Lambayeque; 2019.

- 162. Hernández Sánchez, M. et al.** Evaluación de la efectividad de la semilla de Teberinto (*Moringa oleífera Lam*) como método de remoción de arsénico y plomo en agua para consumo humano. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniera Agroindustrial]. El Salvador: Universidad de El Salvador; 2017.
- 163. Núñez Ponce, E.** Validación de la efectividad de la semilla de *Moringa oleífera* como coagulante natural del agua, destinada al consumo humano, Morocelí, Honduras. [Tesis para optar por el Título Profesional de Ingeniera en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente]. Morazán Honduras: Universidad Zamorano; 2007.
- 164. Álvarez Ancalla, N. & Ccahua Ocón, S.** Remoción de turbidez usando biocoagulantes “*Echinopsis peruviana* y *Opuntia ficus indica*” en muestras con suelo del río Tucuirí, Santo Tomas. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental]. Lima: Universidad de San Ignacio de Loyola; 2021.

