



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN

Uso de los coagulantes naturales de origen vegetal
como una alternativa viable para el tratamiento de
agua

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

Presenta

MARÍA FERNANDA FERNÁNDEZ SOTO



Ciudad Universitaria, CD.MX. 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ
VOCAL: Profesor: MARTHA ELENA ALCÁNTARA GARDUÑO
SECRETARIO: Profesor: GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ
1er. SUPLENTE: Profesor: MARÍA RAFAELA GUTIÉRREZ LARA
2° SUPLENTE: Profesor: LUZ MARÍA LAZCANO ARRIOLA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ

SUSTENTANTE (S):

MARÍA FERNANDA FERNÁNDEZ SOTO

Agradecimientos

A la UNAM por abrirme sus puertas y brindarme todos los recursos y herramientas necesarias para mi formación académica, permitiéndome conocer a personas muy valiosas para mí en el proceso.

A la Dra. Georgina Fernández por su paciencia y consejos que fueron una guía para llevar a cabo la presente investigación en cada una de sus etapas, y cuyo apoyo fue fundamental para alcanzar los mejores resultados.

Finalmente quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, especialmente a mi hermanita Erika, que siempre estuvo conmigo para darme ánimos y escucharme en todo momento.

Tabla de contenido

Índice de figuras	7
Índice de tablas	8
Siglas y abreviaturas	9
Resumen	11
Objetivo general	12
Objetivos particulares	12
Alcances y limitaciones	13
Introducción	14
Capítulo 1. El agua	16
1.1 Propiedades del agua.....	16
1.2 Calidad del agua	17
1.2.1 Parámetros fisicoquímicos del agua	18
1.3 Contaminación del agua	19
1.3.1 Contaminantes del agua	20
1.4 Principales fuentes de contaminación del agua	21
1.5 Normatividad ambiental mexicana.....	23
1.6. Regiones con mayor contaminación del agua	24
1.6.1 A nivel mundial.....	25
1.6.2 A nivel nacional	26
1.6.3 Proceso de potabilización	28
Capítulo 2. Proceso de coagulación/floculación	29
2.1 Generalidades	29
2.2 Partículas coloidales.....	29
2.2.1 Potencial zeta	32
2.2.2 Estabilidad de los coloides	32
2.3 Mecanismos de coagulación.....	33
2.3.1 Compresión de doble capa.....	33
2.3.2 Adsorción y neutralización de cargas.....	35
2.3.3 Coagulación por barrido.....	36
2.3.4 Coagulación por adsorción y puente	37

2.4 Etapas de la coagulación.....	39
2.5 Factores que influyen en el proceso de coagulación.....	40
2.5.1 Temperatura.....	40
2.5.2 Dosis óptima.....	40
2.5.2.1 Prueba de jarras	41
2.5.3 pH	42
2.5.4 Intensidad y tiempo de mezclado	43
2.6 Proceso de floculación	43
2.6.1 Factores que influyen en el proceso de floculación.....	44
Capítulo 3. Tipos de coagulantes	45
3.1 Coagulantes inorgánicos	45
3.2 Polímeros orgánicos sintéticos	48
3.3 Coagulantes de origen natural.....	48
3.4 Comparación entre los tipos de coagulantes	50
3.5 Efectividad.....	51
Capítulo 4. Coagulantes de origen natural.....	56
4.1 Clasificación	56
4.1.1 Coagulantes de origen animal.....	57
4.1.2 Coagulantes de origen vegetal.....	57
4.1.2.1 <i>Moringa oleifera</i> (moringa).....	58
4.1.2.2 <i>Strychnos potatorum</i> (nirmali)	60
4.1.2.3 <i>Opuntia ficus indica</i> (cactus)	61
4.1.2.4 <i>Jatropha curcas</i> (piñón de tempate).....	62
4.1.2.5 <i>Carica papaya</i> (semillas de papaya).....	63
4.1.2.6 <i>Tamarindus indica</i> (semillas de tamarindo).....	64
4.1.2.7 <i>Musa paradisiaca</i> (cáscara de plátano)	65
4.2 Método general de extracción del coagulante natural	66
4.3 Coagulantes compuestos.....	67
4.4 Impacto ambiental.....	68
4.5 Análisis económico	69
4.6 El papel de los coagulantes orgánicos en la Ingeniería Verde.....	71
4.6.1 La Ingeniería Verde	71

4.6.2 Los coagulantes de origen natural y la Ingeniería Verde	73
Capítulo 5. Casos de aplicación de los coagulantes naturales.....	74
5.1 Aplicación de coagulantes naturales en México	75
5.2 Aplicación de coagulantes naturales en Indonesia.....	76
5.3 Aplicación de coagulantes naturales en Colombia	78
5.4 Aplicación de coagulantes naturales en Brasil	79
5.5 Aplicación de coagulantes naturales en India	80
5.6 Aplicación de coagulantes naturales en Honduras.....	81
5.7 Aplicación de coagulantes naturales en Perú.....	82
5.8 Aplicación de coagulantes naturales en China	82
5.9 Futuro de los coagulantes naturales.....	83
Capítulo 6. Discusión.....	85
Capítulo 7. Conclusiones.....	89
Referencias	91

Índice de figuras

- Figura 1.1** Principales fuentes de contaminación del agua
- Figura 1.2** Monitoreo de calidad del agua para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) en cuerpos de agua superficiales
- Figura 1.3** Monitoreo de calidad del agua para la demanda química de oxígeno (DQO) en cuerpos de agua superficiales
- Figura 1.4** Proceso convencional de tratamiento
- Figura 2.1** Propiedades de los sistemas coloidales
- Figura 2.2** Doble capa de una partícula coloidal
- Figura 2.3** Teorías de la doble capa eléctrica
- Figura 2.4** Coagulación por adsorción
- Figura 2.5** Coagulación por barrido
- Figura 2.6** Coagulación por adsorción y formación de puentes
- Figura 2.7** Etapas del proceso de coagulación
- Figura 2.8** Curva de coagulación
- Figura 2.9** Equipo para prueba de jarras
- Figura 3.1** Reacciones de coagulación y formación del conglomerado
- Figura 4.1** Clasificación de los coagulantes de origen natural
- Figura 4.2** Hojas, frutos y semillas de *Moringa oleifera*
- Figura 4.3** Proceso de extracción de *Moringa oleifera*
- Figura 4.4** Planta y semillas de *Strychnos potatorum*
- Figura 4.5** Cladodios de *Opuntia ficus indica* utilizados en el tratamiento de agua residual
- Figura 4.6** Semillas y planta de *Jatropha curcas*
- Figura 4.7** Semillas y polvo de semillas de papaya
- Figura 4.8** Tamarindo (fruto)
- Figura 4.9** Semillas de tamarindo enteras y trituradas
- Figura 4.10** *Musa paradisiaca*
- Figura 4.11** Proceso general de extracción de coagulante a partir de fuentes vegetales
- Figura 4.12** Principios de la Ingeniería Verde
- Figura 5.1** Producción de frutas en Indonesia en el 2014

Índice de tablas

Tabla 1.1 Propiedades del agua

Tabla 1.2 Contaminantes presentes en el agua

Tabla 1.3 Límites máximos permisibles de distintos contaminantes

Tabla 1.4 Zonas con mayores niveles de contaminación hídrica en el mundo

Tabla 2.1 Clasificación de los coloides

Tabla 3.1 Comparación entre coagulantes inorgánicos

Tabla 3.2 Ventajas y desventajas de los coagulantes naturales

Tabla 3.3 Contraste entre los tipos de coagulantes

Tabla 3.4 Remoción de turbiedad con coagulantes naturales

Tabla 3.5 Remoción de turbiedad con coagulantes comerciales

Tabla 4.1 Precios promedio actuales de los distintos coagulantes

Tabla 4.2 Dosis óptimas de los distintos coagulantes para remoción de turbiedad (< 600 UNT)

Tabla 5.1 Porcentajes de eficiencia de distintos coagulantes accesibles para México

Siglas y abreviaturas

Al(OH) ₃	Hidróxido de aluminio
Al ₂ (SO ₄) ₃	Sulfato de aluminio
ASEAN	Asociación de las Naciones de Asia Sudoriental
As	Arsénico
atm	Atmósfera
C	Coulomb
°C	Grados Celsius
cal	Caloría
Ca(OH) ₂	Hidróxido de calcio
CaSO ₄	Sulfato de calcio
Cd	Cadmio
cm	Centímetro
COT	Carbono orgánico total
Cr	Cromo
Cu	Cobre
D	Debye
DAM	Drenaje ácido de mina
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
FeCl ₃	Cloruro férrico
Fe(OH) ₃	Hidróxido férrico
HCN	Ácido cianhídrico
Hg	Mercurio
H ₂ O	Agua
J	Joule
K	Kelvin

kg	Kilogramo
L	Litro
m	Metro
M	Molaridad
mg	Miligramo
MXN	Peso mexicano
NaCl	Cloruro de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
NH ₃	Amoníaco
NOM	Norma Oficial Mexicana
NMP	Número más probable
OMS	Organización Mundial de la Salud
<i>P. aeruginosa</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
Pb	Plomo
pH	Potencial de hidrógeno
PIB	Producto Interno Bruto
s	Segundo
<i>S. aureus</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SST	Sólidos suspendidos totales
UNICEF	Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia
UNT	Unidad nefelométrica de turbidez
USD	Dólar estadounidense
-COOH	Grupo carboxílico
-OH	Grupo hidroxilo

Resumen

Dentro del presente escrito se realiza una revisión de las características, desempeño y eficiencia que tienen algunos de los coagulantes naturales de origen vegetal con mayor aplicación hasta la fecha en el tratamiento de agua proveniente de distintas fuentes, con el fin de determinar la viabilidad de su uso desde una perspectiva social, ambiental, técnica y económica. Por otra parte, se hace énfasis en la sustentabilidad del proceso y su aportación a la Ingeniería Verde, así como la necesidad existente de su implementación especialmente en países en desarrollo con diversidad vegetativa para facilitar su acceso a agua de buena calidad.

En el primer capítulo se describen las generalidades del agua, sus propiedades fisicoquímicas y los parámetros a considerar en la determinación de su calidad. Posteriormente, se plantean algunos de los principales contaminantes encontrados en el agua y los efectos que tienen a la salud humana y al ambiente.

Durante el segundo capítulo se revisan las bases del proceso de coagulación/floculación y su importancia dentro del tratamiento del agua, con ello se aborda de manera general los distintos mecanismos fisicoquímicos que ocurren y los factores que pueden influir en el desempeño y eficiencia del coagulante.

A través del tercer capítulo se presentan las clases de coagulantes tanto de origen natural como inorgánico que existen, comparando sus características, similitudes y diferencias dentro de su mismo tipo y con las otras clasificaciones, además de su efectividad en la reducción de la turbiedad del agua contaminada.

Posteriormente, con el cuarto capítulo se profundiza en los coagulantes de origen natural, enfatizando en algunos de los que se han obtenido resultados más prometedores y han sido más estudiados, provenientes principalmente de plantas y vegetales, describiendo sus características, métodos de extracción, funcionamiento, eficiencias y hallazgos relevantes. Además, se contrastan con los coagulantes inorgánicos desde una perspectiva ambiental y económica destacando su aportación a la Ingeniería Verde.

Más adelante, por medio del quinto capítulo se exponen casos recientes de aplicación a nivel nacional e internacional con el fin de resaltar los hallazgos obtenidos en el tratamiento del agua, considerando sus beneficios y limitaciones.

Finalmente se hace un breve análisis de lo hallado y se concluye sobre el futuro del uso de los coagulantes naturales como una opción para el tratamiento de agua.

Objetivo general

Establecer el uso de coagulantes naturales de origen vegetal como una alternativa viable para el tratamiento de agua aportando a la Ingeniería Verde mediante una revisión bibliográfica en distintas fuentes académicas y especializadas.

Objetivos particulares

Exponer las principales fuentes de contaminación del agua, considerando los parámetros fisicoquímicos más importantes en la determinación de su calidad, para la identificación de las zonas a nivel nacional e internacional con recursos hídricos más afectados.

Investigar sobre el proceso de coagulación/floculación y los distintos mecanismos involucrados en la remoción de contaminantes dispersos en fuentes naturales de agua a través de una revisión de las publicaciones de los últimos 25 años para el reconocimiento de los factores con mayor influencia en la eficiencia del coagulante.

Explicar la clasificación de los diferentes tipos de coagulantes contraponiendo sus características más relevantes en el tratamiento de agua para la mitigación de los efectos adversos a la salud y el ambiente.

Indagar acerca de los beneficios y limitaciones de los coagulantes de origen vegetal enfatizando en su importancia y contribución a la Ingeniería Verde para su evaluación como una alternativa a los coagulantes convencionales.

Mencionar los hallazgos más sobresalientes derivados de pruebas de coagulación/floculación sobre los coagulantes investigados previamente, partiendo de investigaciones reportadas en distintos países, para su posible implementación en comunidades en desarrollo con riqueza vegetativa.

Alcances y limitaciones

El estudio se delimitará a los coagulantes vegetales *Moringa oleifera* (moringa), *Strychnos potatorum* (nirmali), *Opuntia ficus indica* (cactus), *Jatropha curcas* (piñón de tempate), *Carica papaya* (semillas de papaya), *Tamarindus indica* (semillas de tamarindo) y *Musa paradisiaca* (cáscara de plátano).

Los coagulantes sintéticos que se analizarán en la investigación serán el sulfato de aluminio, sulfato férrico y los polielectrolitos.

La revisión se enfocará en investigaciones y pruebas experimentales realizadas en países tropicales en donde se favorece el crecimiento de una vegetación muy diversa y abundante.

La recopilación y revisión de la información se realizará en varias fuentes bibliográficas publicadas durante los años 1999 hasta el 2022. Dichas fuentes constarán en artículos científicos, tesis, libros y textos académicos obtenidos de bases de datos académicas y especializadas como Science Direct, Dialnet, Redalyc, SciELO y Scopus.

Introducción

El desarrollo de la humanidad está ligado con el incremento de los niveles de contaminación de la naturaleza y el consumo desmedido de los recursos del planeta, siendo uno de los más afectados el agua superficial, donde el crecimiento poblacional e industrial ha ocasionado que el volumen de agua residual generada sobrepase la capacidad que se tiene para su tratamiento (Domínguez, 2022).

Actualmente los efluentes industriales y urbanos representan una amenaza para el ambiente al desechar grandes cantidades de agua diariamente, la cual contiene subproductos y residuos no deseados de los diferentes procesos productivos y de las actividades cotidianas, siendo estas especies las que alteran las características intrínsecas del agua y ponen en riesgo el bienestar de los seres vivos. A pesar de que han surgido nuevas tecnologías para el tratamiento de agua, aún existen territorios con limitaciones y sin acceso a sistemas de potabilización (Gautam y Saini, 2020).

Una de las técnicas más empleadas en el proceso de potabilización es la coagulación/floculación para la eliminación de materia suspendida y partículas coloidales, ésta se lleva a cabo mediante la adición de sustancias químicas sintéticas conocidas como coagulantes (siendo estos generalmente sales metálicas de aluminio o hierro), resultando ser un método rentable y eficiente para gestionar los efluentes generados por un gran número de industrias; sin embargo, existen desventajas asociadas a su uso, como altos costos de adquisición, producción de grandes cantidades de lodos y alteraciones en el pH del agua tratada, además de las implicaciones en la salud humana siendo fuentes potenciales de enfermedades debido a los residuos que permanecen en el agua, los cuáles en grandes cantidades pueden ser causantes de enfermedades como Alzheimer (Silva *et al.*, 2021).

En respuesta a la problemática mencionada se plantean los coagulantes naturales como una alternativa sostenible para el tratamiento de agua, contribuyendo a la Ingeniería Verde al minimizar los riesgos para la salud de los seres vivos y el daño al ambiente. Los coagulantes naturales pueden obtenerse a partir de una gran

variedad de plantas, animales o microorganismos y tienen la capacidad de metabolizar e inmovilizar especies contaminantes, depurar el agua, el suelo y el aire de una manera eficiente y segura, disminuyendo el uso de sustancias químicas sintéticas y la producción de lodos (Aguirre *et al.*, 2018). En los trabajos experimentales actuales se ha encontrado que diversas especies vegetales son fuentes potenciales para la obtención de coagulantes al contener gran cantidad de polisacáridos y proteínas, componentes que demuestran ser aptos para remover contaminantes del agua residual (Bravo, 2017).

Hasta la fecha aún es una tecnología poco explorada a pesar de su eficiencia demostrada en el tratamiento de agua, requiriéndose mayor investigación para su aplicación a escala industrial, por lo que en este escrito se presenta una revisión acerca de los beneficios y limitaciones del uso de coagulantes naturales de origen vegetal en la remoción de contaminantes desde diferentes perspectivas a partir de las investigaciones realizadas en los últimos años para evaluar la implementación de dicha alternativa en países cuya riqueza vegetal permita su aprovechamiento para el tratamiento de efluentes de distintos orígenes.

Capítulo 1. El agua

1.1 Propiedades del agua

El agua es un elemento necesario para la vida en la Tierra, ha estado presente en el planeta desde hace unos tres mil millones de años y cubre más del 70% de la superficie (Brenes y Rojas, 2005; Fernández, 2012). Sus propiedades fisicoquímicas la hacen una sustancia única y éstas se originan debido a la estructura tetraédrica de su molécula, donde se produce una elevada cohesión interna y un desequilibrio electrónico que le confiere un momento dipolar eléctrico (Brenes y Rojas, 2005).

Entre las propiedades fisicoquímicas del agua que tienen mayor relevancia en el contexto ambiental se encuentran las siguientes (Alfayate *et al.*, 2002):

- Altos valores de capacidad calorífica: Tiene suma importancia en la regulación del clima y la temperatura de la superficie terrestre.
- Alta conductividad térmica: Resulta importante para trasladar calor.
- Elevadas temperaturas de fusión y ebullición: Es por ello por lo que el agua puede permanecer en estado líquido y no se evapora.
- Variación anómala de la densidad: Permite que el hielo flote en la superficie del agua y sirva como aislante del aire exterior, evitando la congelación profunda de los cuerpos de agua superficiales y protegiendo así la supervivencia de las especies acuáticas.
- Elevada tensión superficial: Permite que el suelo pueda retener mayor cantidad de líquido y ayuda al crecimiento vegetal.
- Gran capacidad disolvente: Es un disolvente versátil en el que se desarrollan gran variedad de reacciones y equilibrios químicos.

En la tabla 1.1 se observan los valores que tienen algunas de estas propiedades:

Tabla 1.1 Propiedades del agua (Alfayate *et al.*, 2002).

Propiedad	Valor	Anotaciones
Color	Ninguno	Cuando está pura
Olor	Ninguno	Cuando está pura
Sabor	Ninguno	Cuando está pura
Capacidad calorífica específica (20°C)	$4.18 \times 10^3 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$	La más alta (Salvo el NH ₃)
Calor de fusión (0°C)	$0.33 \times 10^3 \text{ kJ kg}^{-1}$	El más alto (Salvo el NH ₃)
Calor de vaporización (100°C)	$2.257 \times 10^3 \text{ kJ kg}^{-1}$	El más alto
Temperatura de fusión (1 atm)	0°C	La más alta de su serie
Temperatura de ebullición (1 atm)	100°C	La más alta de su serie
Conductividad térmica (20 °C)	$0.00141 \text{ cal s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Muy alta para líquidos
Densidad H ₂ O (0°C)	0.9168 kg l^{-1}	Variación atípica
Densidad H ₂ O (20°C)	0.9998 kg l^{-1}	Variación atípica
Tensión superficial (20°C)	$72.8 \times 10^{-3} \text{ J m}^{-2}$	La más alta
Momento dipolar (20°C)	$6.14 \times 10^{-30} \text{ C m (1.84 D)}$	El más alto (salvo el HCN)

1.2 Calidad del agua

El agua es un recurso imprescindible tanto para la supervivencia de los seres vivos cómo para el desarrollo socioeconómico de las naciones y las actividades cotidianas, sin embargo, puede transportar sustancias nocivas que llegan a ocasionar daños a la salud, es por ello por lo que se han establecido valores guía que permiten evaluar la calidad del agua (Chulluncuy, 2011).

La calidad del agua se define como “aquellas condiciones que deben darse en el agua para que ésta mantenga un ecosistema equilibrado y cumpla unos

determinados objetivos de calidad (calidad ecológica)". Este no es un término completamente objetivo ya que depende del uso que se le piense dar, donde para cada uso existe un determinado estándar de calidad (Bosch, 1999).

Existen factores de origen natural y antropogénico que alteran la composición del agua y afectan sus propiedades por lo que han surgido distintos procesos cuyo fin es mejorar su calidad, para evaluar la eficiencia de estos procesos se hace una valoración a partir de los parámetros fisicoquímicos del agua, los cuales proveen información sobre la naturaleza de las especies químicas encontradas en el medio y de esta manera seleccionar la metodología más adecuada para su tratamiento (Samboni *et al.*, 2007).

1.2.1 Parámetros fisicoquímicos del agua

Las características físicas y químicas del agua tienen repercusión directa sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua, siendo significativas para el tratamiento de agua cruda con fines de consumo. Entre estas características destacan las siguientes: turbiedad, color, temperatura, alcalinidad y pH (López, 2018).

A continuación, se presentará una breve descripción de los parámetros mencionados anteriormente (Vargas, 2004).

- a) Turbiedad: Es originada por partículas en suspensión que forman sistemas coloidales; éstas reducen la claridad del agua afectando su estética. La medición de este parámetro se realiza mediante un turbidímetro o nefelómetro.
- b) Color: Esta característica está relacionada con la turbiedad, siendo dependiente de las condiciones ambientales, la temperatura y el pH. El color del agua frecuentemente se origina a partir de la presencia de materia orgánica y la presencia de metales disueltos o suspendidos.

- c) Temperatura: Es un parámetro que puede influir en la actividad biológica en el agua, la absorción de oxígeno, precipitación de descuentos, los procesos de desinfección, floculación y sedimentación.
- d) Alcalinidad: Se denomina así a la capacidad del agua de neutralizar ácidos, está fuertemente ligada al pH, la composición del agua, la temperatura y la fuerza iónica. Es muy importante en el tratamiento de agua ya que influye en la eficiencia de coagulantes hidrolizables, además de tener incidencia sobre el carácter corrosivo o incrustante que pueda tener el agua.
- e) pH: Es la concentración de iones H^+ en el agua. Puede influir en los procesos de coagulación y desinfección; se considera que el pH de las aguas tanto crudas como tratadas debe oscilar entre 5.0 y 9.0.

1.3 Contaminación del agua

El desarrollo industrial ha logrado mejorar la calidad de vida de las personas en algunos aspectos al satisfacer las necesidades de consumo de una creciente urbanización, mientras por otro lado ha desencadenado importantes problemas ambientales y diversas formas de contaminación que ponen en riesgo el bienestar de los seres vivos y del planeta; una de ellas es la contaminación del agua (Alfayate *et al.*, 2002)

El agua se denomina contaminada cuando presenta cambios en su composición o condición natural, degradando su calidad de manera instantánea o paulatina de tal manera que deja de ser apta para el uso al que estaba destinado (Ojeda, 2012). Las especies que provocan este fenómeno son llamadas contaminantes y pueden ser clasificadas de la siguiente forma según su naturaleza (Ortega, 2015):

- Físicas: Son aquellas que no modifican la composición del agua, pero obstaculizan la penetración de la luz alterando sus propiedades organolépticas.
- Químicas: Modifican su composición química generando efectos adversos. Pueden ser de origen orgánico o inorgánico.
- Biológicas: Entidades vivas que pueden transmitir enfermedades.

1.3.1 Contaminantes del agua

En la siguiente tabla se clasifican algunos de los contaminantes que pueden encontrarse en el agua:

Tabla 1.2 Contaminantes presentes en el agua (Chulluncuy, 2011).

Físicos	Químicos	Biológicos
Partículas radiactivas	Cloruros	Bacterias
Sólidos en suspensión	Fosfatos	Hongos
Sólidos disueltos	Sulfatos	Protozoos
Grasas y aceites	Metales pesados	Algas
Espumas	Detergentes	Virus
Temperatura	Compuestos nitrogenados	
	Salinidad	
	Plaguicidas	

Existe gran cantidad de contaminantes provenientes tanto de fuentes naturales como antropogénicas que afectan las propiedades naturales del agua, siendo los de origen químico y biológico los que representan una mayor amenaza y generan preocupación para la salud pública a nivel local y mundial no sólo por los efectos adversos en la salud y los ecosistemas, también por sus altos costos de tratamiento (Peyravi *et al.*, 2020).

Mantener la calidad del agua dentro de los límites permisibles establecidos para cada parámetro es de suma importancia para evitar efectos negativos irreversibles a largo plazo en la salud y en el ambiente. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) se descargan a diario, aproximadamente dos millones de toneladas de aguas residuales junto con residuos industriales, esta gestión inadecuada significa que el agua que utiliza cientos de millones de personas está fuertemente contaminada haciéndola inadecuada para su uso (United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization, 2018).

1.4 Principales fuentes de contaminación del agua

Los cuerpos de agua en la naturaleza tienen la capacidad de autolimpiarse, pero esta capacidad se ve limitada al depender del volumen, los niveles de contaminación y la cantidad de microorganismos que habitan en el agua, siendo estos últimos los que se encargan de descomponer los compuestos contaminantes y convertirlos en especies químicas que pueden ser utilizadas por plantas y animales; sin embargo, si un exceso de contaminantes llega al agua, estos no pueden ser degradados, por lo que permanecen en el cuerpo de agua y evitan el crecimiento de la flora y fauna natural (Ramírez y Jaramillo, 2003). A pesar de que los contaminantes pueden surgir a partir de fuentes naturales, es mayor la contaminación producida por fuentes antropogénicas, empeorando como resultado de la sobrepoblación en las zonas urbanas (Owa, 2014).

En general, las fuentes de contaminación antropogénicas pueden dividirse en (Schweitzer y Noblet, 2018):

- Fuentes puntuales: Son aquellas identificables y directas, descargando contaminantes en localizaciones específicas. Por ejemplo: el efluente de una industria.
- Fuentes no puntuales: Son las distribuidas sobre una amplia área geográfica, son las más difíciles y costosas de controlar. Ejemplo: vertimiento de contaminantes en aguas superficiales.

A continuación, se describirán brevemente algunas de las fuentes antropogénicas con mayor impacto en la contaminación del agua, y se resumen en la figura 1.1 (Singh y Gupta, 2017):

- Descargas domésticas: Son las que provienen principalmente de viviendas y edificios comerciales, conteniendo altas cantidades de materia orgánica. Surgen como resultado de las actividades cotidianas de las personas.
- Descargas industriales: La naturaleza de las descargas industriales es muy variada dependiendo del tipo de industria y el grado de tratamiento que reciben los efluentes antes de su descarga; algunas industrias como la del

papel requieren grandes cantidades de agua para sus procesos de manufactura, adicionando altas cantidades de sustancias como ácidos, álcalis, tintes y otros productos químicos que afectan los ecosistemas.

- Desperdicios agrícolas: Proviene de los animales de las granjas porcinas, avícolas y lecheras, además de los desperdicios agroquímicos como plaguicidas y fertilizantes los cuáles contienen grandes cantidades de fósforo y nitrógeno, compuestos que en exceso resultan tóxicos para la vida acuática, pudiendo entrar en contacto con el humano a través de la cadena alimenticia, además de ser no biodegradables y muy persistentes en el ambiente por largos periodos de tiempo.
- Minería: Se manifiesta en forma de metales pesados como cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), arsénico (As), mercurio (Hg) y el cobre (Cu), entre otros; estos residuos son tóxicos en altas concentraciones. También se presenta en el drenaje ácido de mina (DAM) resultante del proceso de separación de minerales sulfatados y rocas donde se forma ácido sulfúrico que acidifica el agua, aniquilando la vida acuática y volviéndola tóxica (Effen, 2010).
- Derrames de aceites e hidrocarburos: Los derrames de petróleo, diésel y sus derivados contaminan el agua gravemente, formando capas de emulsión agua-aceite, existen pocas facilidades para disponer de estos residuos, sólo un limitado número de industrias poseen la infraestructura para ello.

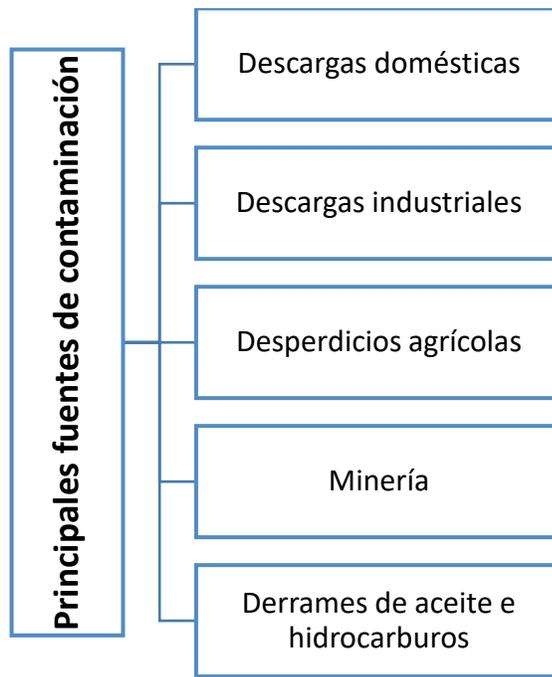


Figura 1.1 Principales fuentes de contaminación del agua (Singh y Gupta, 2017).

1.5 Normatividad ambiental mexicana

En México, la norma que regula la cantidad de contaminantes que se descargan en aguas nacionales es la NOM-001-SEMARNAT-2021, dicha norma publicada el 11 de marzo de 2021 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales con el fin de proteger su calidad y posibilitar sus usos, siendo de carácter obligatorio su implementación para los responsables de dichas descargas.

En la tabla 1.3 se muestran los límites máximos permitidos de algunos de los contaminantes más comunes encontrados en el agua.

Tabla 1.3 Límites máximos permisibles de distintos contaminantes (Fuente: NOM-001-SEMARNAT-2021)

Parámetro	Ríos, arroyos, canales y drenes		Embalses, lagos y lagunas		Zonas marinas mexicanas	
	P.D	P.M	P.D	P.M	P.D	P.M
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35
Grasas y aceites (mg/L)	15	15	18	15	18	15
SST (mg/L)	72	60	24	20	24	20
DQO (mg/L)	180	150	120	100	100	85
COT (mg/L)	45	38	30	25	25	21
Nitrógeno total (mg/L)	30	25	25	15	30	25
Fósforo total (mg/L)	18	15	10	5	18	15
Huevos de Helminfos (huevos/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 ml)	500	250	500	250	500	250

P.D: Promedio diario

P.M: Promedio mensual

N.A: No aplica

1.6. Regiones con mayor contaminación del agua

Los cuerpos de agua que tienden a ser más contaminados son los localizados cerca de grandes urbanizaciones con sistemas de tratamiento deficientes; es muy importante controlar las descargas realizadas en ellos si se quiere disminuir la concentración de contaminantes en el océano. A continuación, se enlistarán las zonas a nivel nacional e internacional con mayor grado de contaminación.

1.6.1 A nivel mundial

La siguiente tabla enuncia algunos de los lugares con más problemas de contaminación hídrica mundialmente.

Tabla 1.4 Zonas con mayores niveles de contaminación hídrica en el mundo (Evenson, 2021).

Nombre	Ubicación	Contaminante	Afectaciones
Río Citarum	Indonesia	Desechos industriales sin tratar, elevando los niveles de mercurio y añadiendo grandes cantidades de plomo, zinc, cromo y polonio	Este río provee de agua para consumo humano a aproximadamente 25 millones de personas, las cuáles al no tener otra opción usan esta agua contaminada para sus actividades cotidianas causando alrededor de 50,000 muertes anualmente.
Lago Karachai	Rusia	Desechos radiactivos	Al descargar desechos radiactivos de la planta Mayak el agua se volvió tóxica. En la actualidad se encuentra sellado y es monitoreado de manera frecuente.
Río Ganges	India	Desechos industriales y descargas domésticas sin tratar, además de cuerpos humanos	Abasteciendo a más de dos billones de personas para sus necesidades básicas como beber o cocinar ha esparcido enfermedades como cólera, hepatitis y tifoidea.
Mar Caribe	Océano Atlántico tropical	Microplásticos	Estos materiales amenazan los ecosistemas marinos y la salud humana, ya que se transportan a través de la cadena alimenticia.
Río Shatt al-Arab	Iraq	Desechos industriales e hidrocarburos	En el año 2018 se reportaron 150,000 casos de envenenamiento. La salinidad en el río es diez veces mayor a los límites permisibles.

1.6.2 A nivel nacional

De acuerdo con datos presentados en las Estadísticas del Agua en México y los resultados de las evaluaciones de calidad del agua aplicadas a los sitios de monitoreo en 2013 se logró determinar cuáles son los sitios más contaminados, donde se obtuvo que estos se localizan, principalmente, dentro de las cuencas hidrológico-administrativas Aguas del Valle de México, Balsas, Lerma-Santiago-Pacífico, Pacífico-Sur y Península de Baja California (Sánchez, 2016).

En otras investigaciones se encontró que los ríos son los cuerpos de agua más contaminados en el país, al recibir grandes cantidades de aguas contaminadas provenientes de industrias, afectando gravemente la biodiversidad. Además, se detalló que en el país los principales ríos y cuencas contaminadas por aguas residuales son el río Santiago-Lerma (en el estado de Guanajuato y Estado de México), Tula (Hidalgo) y Atoyac (Tlaxcala, Puebla y Oaxaca) (Machorro, 2020).

Los indicadores que utiliza Conagua para medir la calidad del agua en México son la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO) y la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) (SEMARNAT, 2015a). En las figuras 1.2 y 1.3 se observan las variaciones que hubo en los valores de DQO y DBO_5 entre los años 2012 y 2014, así como los sitios con mayor contaminación hídrica, resaltando la disminución de sitios de excelente calidad durante ese periodo de tiempo.

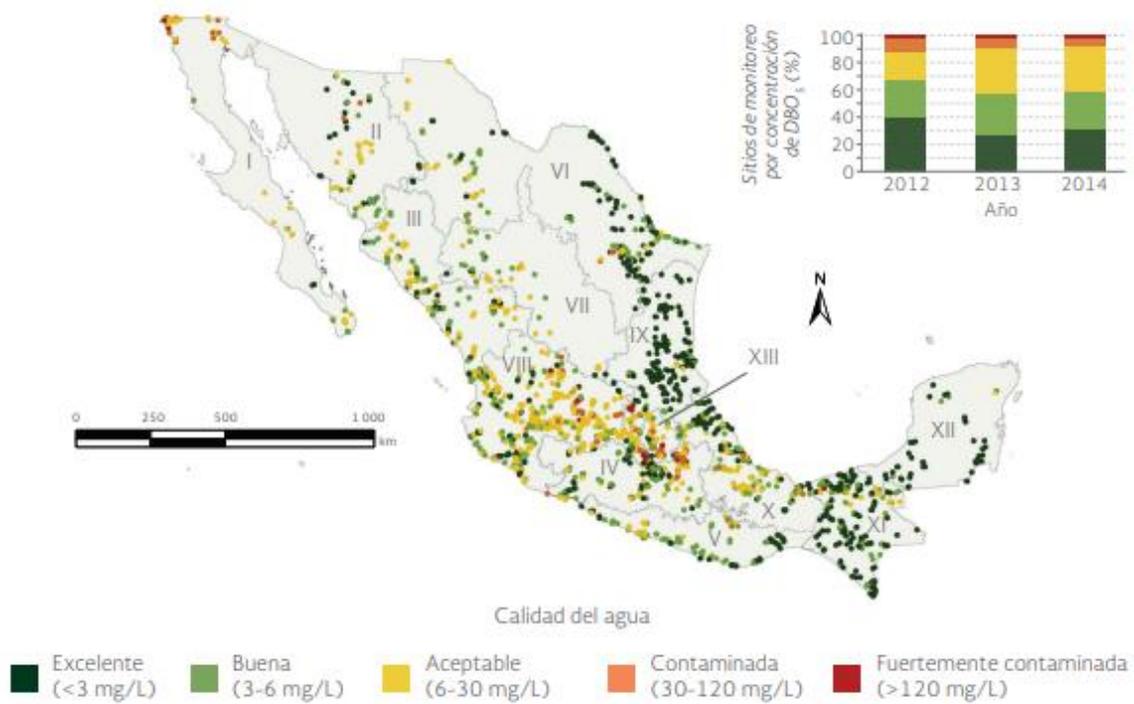


Figura 1.2 Monitoreo de calidad del agua para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) en cuerpos de agua superficiales (SEMARNAT, 2015a).

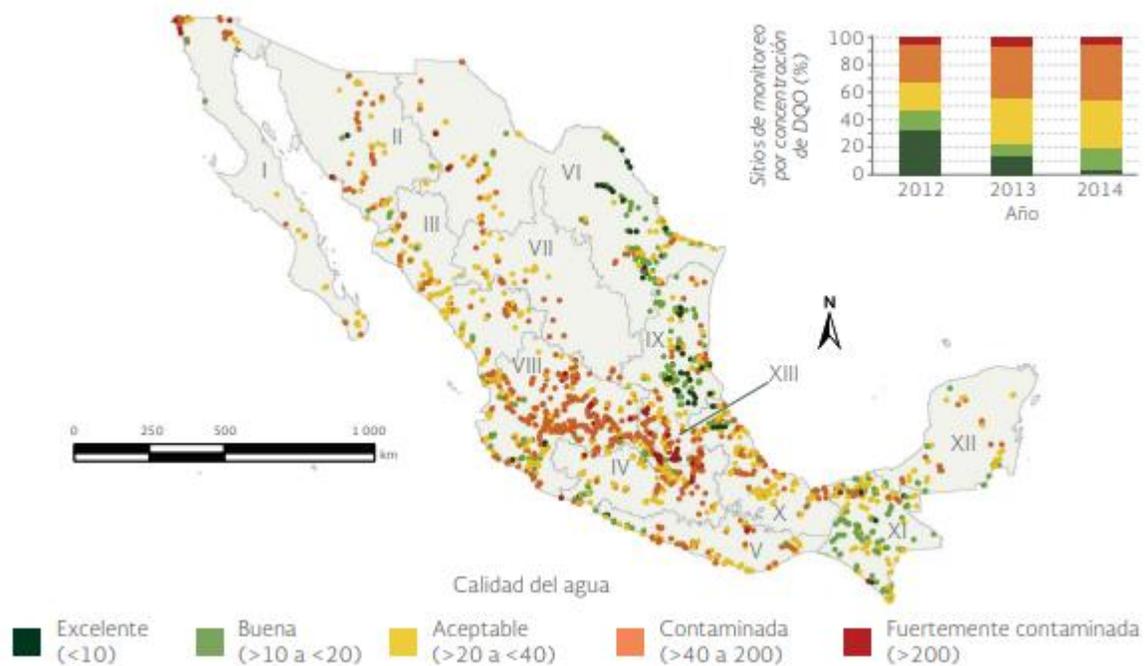


Figura 1.3 Monitoreo de calidad del agua para la demanda química de oxígeno (DQO) en cuerpos de agua superficiales (SEMARNAT, 2015a).

1.6.3 Proceso de potabilización

En el proceso de tratamiento de agua se emplean diversas técnicas, cuya complejidad variará dependiendo de las características del agua cruda y el uso destinado, buscando obtener un agua inocua y apta para uso humano. Este proceso incluye una serie de pasos, donde generalmente para tratar agua destinada al consumo humano se llevan a cabo dos procesos importantes, la coagulación/floculación y la desinfección (Bodlund, 2013).



Figura 1.4 Proceso convencional de tratamiento (Modificado de Bodlund, 2013).

El proceso de coagulación/floculación se considera como uno de los más importantes en el tratamiento de agua debido a que de este depende la eficiencia de la etapa de sedimentación y filtración, por lo que requiere de un buen control. En dicho proceso se hace uso de coagulantes, entre los que destaca el sulfato de aluminio, para la desestabilización y eliminación de partículas coloidales, mientras que para la etapa de desinfección suelen añadirse desinfectantes químicos derivados del cloro, asegurando la potabilidad del agua para su posterior distribución (Ojeda, 2012).

Capítulo 2. Proceso de coagulación/floculación

2.1 Generalidades

El proceso de coagulación/floculación es un método fisicoquímico de clarificación que consiste en la desestabilización eléctrica de partículas coloidales por medio de la adición de sustancias químicas denominadas coagulantes, con el fin de remover entre el 80 y 90% de las partículas en suspensión tanto de carácter orgánico (virus, algas, bacterias) como inorgánico (óxidos metálicos, arcillas) (Ojeda, 2012). Posterior a ello se realiza la aglomeración de las partículas mediante una agitación moderada, formando partículas de mayor tamaño y peso específico mayor al del agua (también llamados flóculos) a fin de que puedan sedimentar con mayor facilidad (López, 2018).

Las ventajas asociadas a este proceso son: baja sensibilidad a las variaciones de caudal y composición, flexibilidad y fácil adaptación según las características del vertido, pudiendo ser aplicado a diversos tipos de efluentes (Aguilar, 2002).

Generalmente en este proceso se utilizan coagulantes basados en sales de aluminio o hierro debido a su bajo costo, accesibilidad y efectividad para remover la turbiedad del agua; sin embargo, se han encontrado efectos negativos a la salud derivados de su uso, por lo que en años recientes se ha profundizado en la búsqueda de nuevos coagulantes seguros y eficaces en la depuración de aguas residuales urbanas y efluentes industriales (López León *et al.*, 2017; Maurya y Daverey, 2018) hallando alternativas en la extracción y uso de coagulantes originados de plantas y animales.

2.2 Partículas coloidales

En el agua residual se puede encontrar gran variedad de impurezas, las cuáles varían de tamaño de acuerdo con su origen. Entre las de menor tamaño se encuentran las partículas coloidales, con un tamaño entre 10^{-3} y 10^{-6} cm; estas, por ser demasiado pequeñas, se dificulta su eliminación por sedimentación, haciendo

imprescindible el uso de la coagulación para la formación de agregados que faciliten su separación. Estas partículas generalmente son responsables de la turbiedad y el color del agua (Aguilar, 2002).

Los coloides se pueden clasificar según varios aspectos ya sea por su duración en caduco (cambian rápidamente) o diuturno (larga duración), por su estructura química (orgánicos o inorgánicos) o bien por su atracción hacia el agua en hidrofílicos e hidrofóbicos, siendo esta clasificación la más relevante en el proceso de tratamiento de agua (Olortegui, 2020).

Tabla 2.1 Clasificación de los coloides (Olortegui, 2020).

CLASIFICACIÓN DE LOS COLOIDES					
Duración		Estructura		Atracción hacia el agua	
Caduco	Diuturno	Orgánicos	Inorgánicos	Hidrofílicos	Hidrofóbicos

Dentro de las características más importantes de los sistemas coloidales que destaca Soto Bubern (2007) se encuentran:

- Cinéticas: Definen el comportamiento de las partículas coloidales referidas a su movimiento en el agua.
- Ópticas: Relacionan la interacción de los sistemas coloidales con la radiación electromagnética.
- De superficie: Relacionada con su capacidad de adsorción.
- Electrocinéticas: Permiten comprender la estabilidad de las dispersiones coloidales.

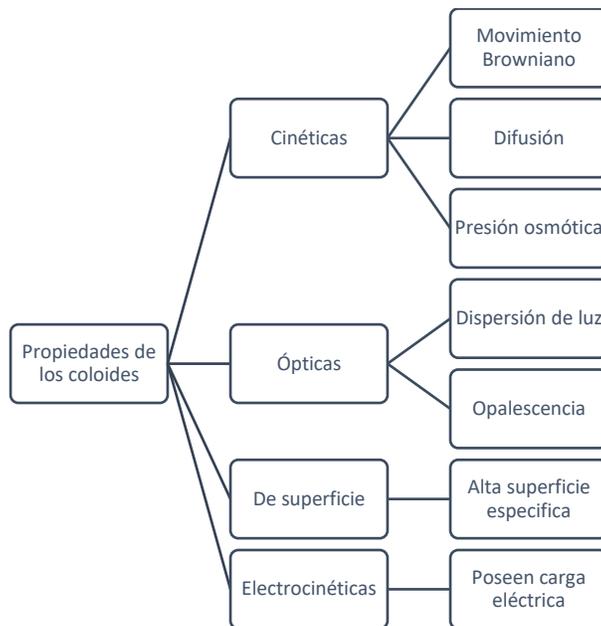


Figura 2.1 Propiedades de los sistemas coloidales (Modificado de Soto Bubert, 2007).

La alta superficie específica de los coloides permite que posean una gran capacidad de adsorción, lo cuál es la base fundamental de la estabilidad de algunas dispersiones coloidales (López, 2018). Es debido a su gran área superficial que los coloides absorben iones en cantidades desiguales, originando la formación de una carga eléctrica negativa en su superficie que contribuye a su estabilidad.

Son las cargas superficiales, también denominadas cargas primarias, las que atraen a los iones positivos del agua, adhiriéndose fuertemente a las partículas y atrayendo a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos, formando así dos capas, la capa comprimida formada por los iones adheridos a la partícula y la capa difusa constituida por los iones adheridos débilmente (Gómez, 2005). El gradiente que existe entre la superficie de la partícula y la disolución se llama potencial zeta (Olortegui, 2020).

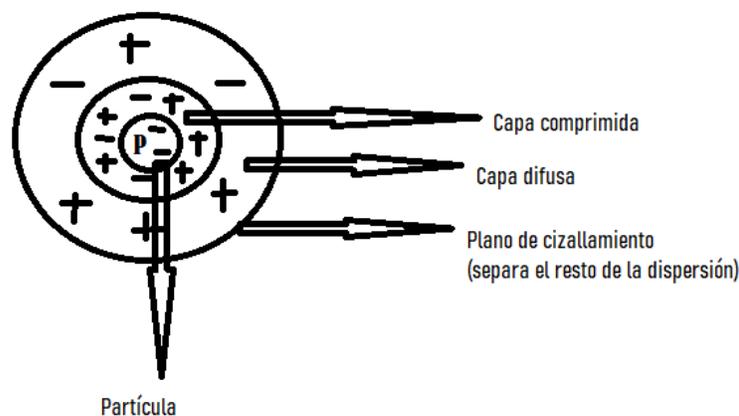


Figura 2.2 Doble capa de una partícula coloidal (Modificado de Gómez, 2005).

2.2.1 Potencial zeta

El potencial zeta es un parámetro fundamental para determinar la estabilidad de un coloide, su función es medir la magnitud de la repulsión o atracción electrostática entre las partículas suspendidas en el agua, lo que permite tener un criterio que determine la dosis de coagulante necesaria para un óptimo proceso de coagulación donde, a mayor potencial zeta, mayor es la fuerza de repulsión entre coloides y por lo tanto existe mayor estabilidad en la suspensión coloidal lo que impide la formación de aglomerados y dificulta su filtrado. Se ha demostrado que al minimizar el potencial zeta se alcanzan mejores resultados en el proceso de coagulación/floculación (Betancur *et al.*, 2012).

2.2.2 Estabilidad de los coloides

Dentro de los sistemas coloidales existen fuerzas que pueden favorecer u oponerse al acercamiento y a la agregación de las partículas entre sí. Entre las fuerzas de estabilización o repulsión resaltan las siguientes (Ojeda, 2012):

- Carga de las partículas
- Hidratación

Mientras los factores de atracción o desestabilización son los siguientes:

- Gravedad

- El movimiento Browniano
- Las fuerzas de Van der Waals

Dentro de estos fenómenos de desestabilización, se considera que la gravedad es despreciable y la que tiene mayor relevancia en el proceso son las fuerzas de Van der Waals al constituir la principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales, ésta es un producto de la interacción de dipolos permanentes o inducidos entre partículas y tiende a decrecer con la distancia entre ellas (Soto Bubern, 2007); sin embargo, no es lo suficientemente fuerte como para impedir la repulsión electrostática entre las partículas por lo que no se aglomeran.

2.3 Mecanismos de coagulación

Existen distintos mecanismos de desestabilización coloidal útiles para explicar las interacciones entre el coagulante (ya sea de origen natural o sintético) y las partículas coloidales, estos se describirán a continuación:

2.3.1 Compresión de doble capa

Este mecanismo está basado en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión, donde se encuentra una doble capa eléctrica en cada interfase entre un sólido y el agua; al incrementar la concentración de electrolito (coagulante), se incorporan iones de signo contrario (contraiones) en la capa difusa, comprimiéndola, y en consecuencia disminuyendo las fuerzas repulsivas y con ello el potencial zeta (Gómez, 2005).

Para explicar este mecanismo se han presentado tres teorías que relacionan la distribución de iones y la variación del potencial con la distancia a la superficie (Larios, 2007).

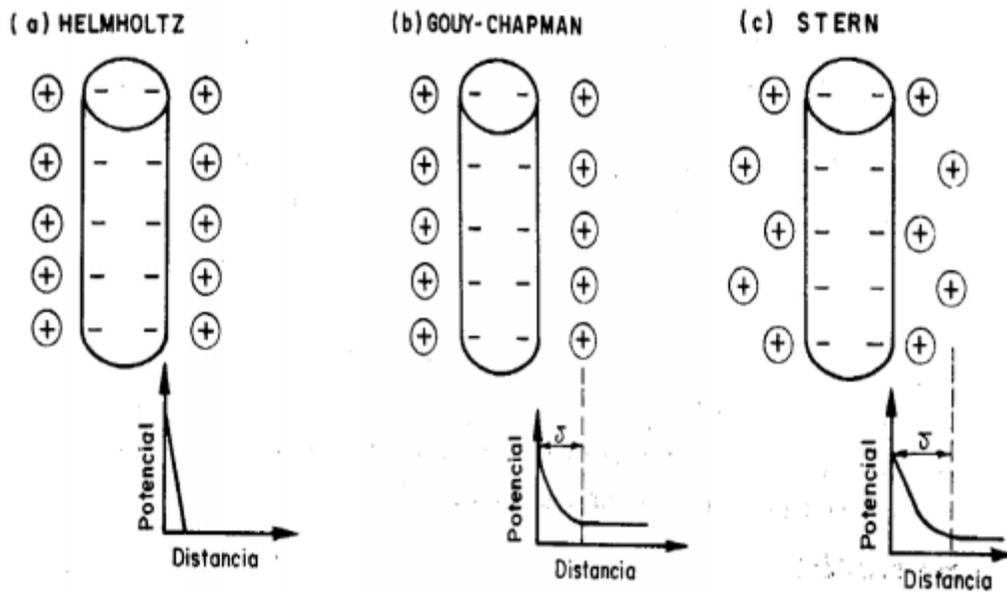


Figura 2.3 Teorías de la doble capa eléctrica (Ojeda, 2012).

De acuerdo con Larios (2007) las diferencias planteadas entre los tres modelos son las siguientes:

Helmholtz: La diferencia de potencial se establece entre dos capas de cargas eléctricas de signos contrarios. Se propone que la carga en la solución se encuentra adyacente a la superficie del electrodo, de manera que existen dos planos de carga con polaridad distinta separados por una distancia de orden molecular.

Gouy-Chapman: Establecieron un modelo en donde tanto el potencial como la concentración del electrolito influyen sobre la estructura de la doble capa eléctrica. Proponen que la doble capa eléctrica es difusa y no compacta como en la teoría propuesta por Helmholtz, denominando a esta “doble capa difusa”.

Stern: Es el modelo utilizado actualmente, considera la coexistencia de las teorías de Helmholtz y Gouy, contemplando la posibilidad de la existencia de una capa adherida y una difusa alrededor del coloide.

2.3.2 Adsorción y neutralización de cargas

Este mecanismo generalmente se lleva a cabo cuando el coagulante y las partículas contaminantes poseen carga opuesta (Bravo, 2017) donde debido a la carga negativa en la superficie de las partículas coloidales, las cuáles atraen a los iones positivos que se encuentran en solución en el agua formando una capa adherida al coloide, se neutraliza la carga del coloide con las cargas positivas del coagulante. Para este proceso se requiere emplear dosis bajas de coagulante, cuando hay un exceso de este se reestabiliza la carga debido a que se adsorbe en la superficie de la partícula, produciendo una carga invertida a la carga original (Aliaga, 2010).

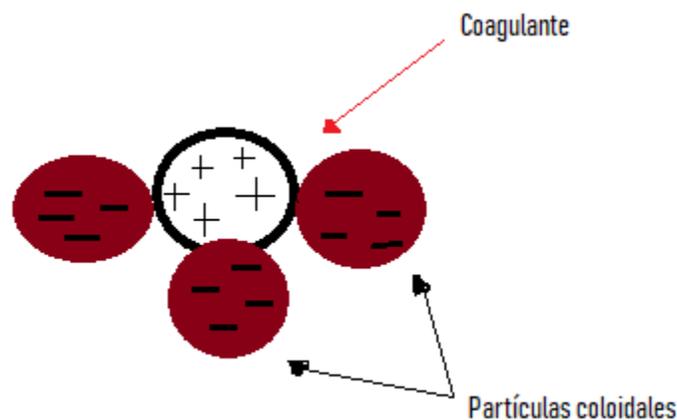


Figura 2.4 Coagulación por adsorción (Modificado de Lee *et al.*, 2014)

Aunque aún no se ha logrado definir con exactitud el mecanismo de remoción que hay detrás de los coagulantes naturales, existe evidencia experimental que demuestra que normalmente suelen actuar con este mecanismo al contener cantidades significativas de proteínas solubles en agua (Banchón *et al.*, 2016), las cuales tienen una carga positiva cuando están en una disolución y se unen a las partículas coloidales cuya carga es negativa, para posteriormente acumularse y formar partículas más grandes y pesadas llamadas flóculos (Thakur y Choubey, 2014).

Un ejemplo de ello es la *Moringa oleífera*, donde se sugiere que sus agentes activos coagulantes son las proteínas catiónicas diméricas y actúa a través del mecanismo de adsorción y neutralización (Guzmán *et al.*, 2013).

2.3.3 Coagulación por barrido

Sucede al agregar una alta concentración de coagulante excediendo el límite de solubilidad de este en el agua, lo que produce una masa esponjosa (conglomerado de barrido) que atrapa coloides y partículas suspendidas, removiendo la turbiedad del agua. Habitualmente se utilizan sales de metales trivalente como el sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, o cloruro férrico FeCl_3 , por lo que el conglomerado está formado de moléculas de $\text{Al}(\text{OH})_3$ o de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Gómez, 2005).

Es importante denotar que la presencia de ciertos aniones puede acelerar la formación del precipitado, además se debe considerar la concentración de partículas en suspensión ya que de ellas depende la cantidad de coagulante que se va a requerir (Ojeda, 2012).

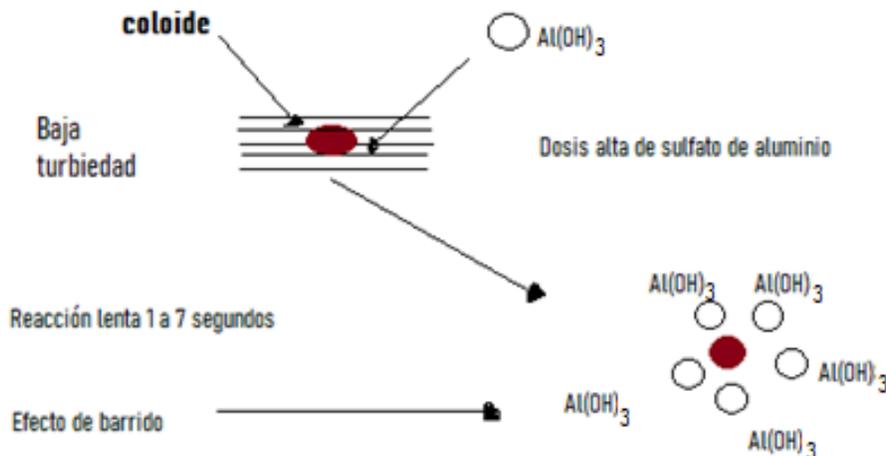


Figura 2.5 Coagulación por barrido (Modificado de Aliaga, 2010).

2.3.4 Coagulación por adsorción y puente

Los coagulantes naturales también pueden actuar mediante este mecanismo. Generalmente surge al emplear agentes coagulantes de cadena larga (como los polímeros naturales), con alto peso molecular y baja densidad de carga (Bravo, 2017).

Se produce al hacer uso de un polímero aniónico cuando las partículas están cargadas negativamente, donde las moléculas del polímero al ser muy largas presentan sitios ionizables a lo largo de la cadena que pueden adsorber las partículas coloidales formando un “puente”. Se puede tener una reestabilización de la suspensión, por una excesiva carga de polímeros (Olortegui, 2020).

En diversos estudios se sugiere que uno de los coagulantes que actúa a través de este mecanismo es el de *Opuntia spp.* donde la remoción de turbiedad es atribuida a la presencia de monosacáridos arabinosa, galactosa y ramnosa, los cuales tienen efectos sinérgicos con ácidos galactorónicos para iniciar el efecto de desestabilización coloidal (Banchón *et al.*, 2016; Guzmán *et al.*, 2013),

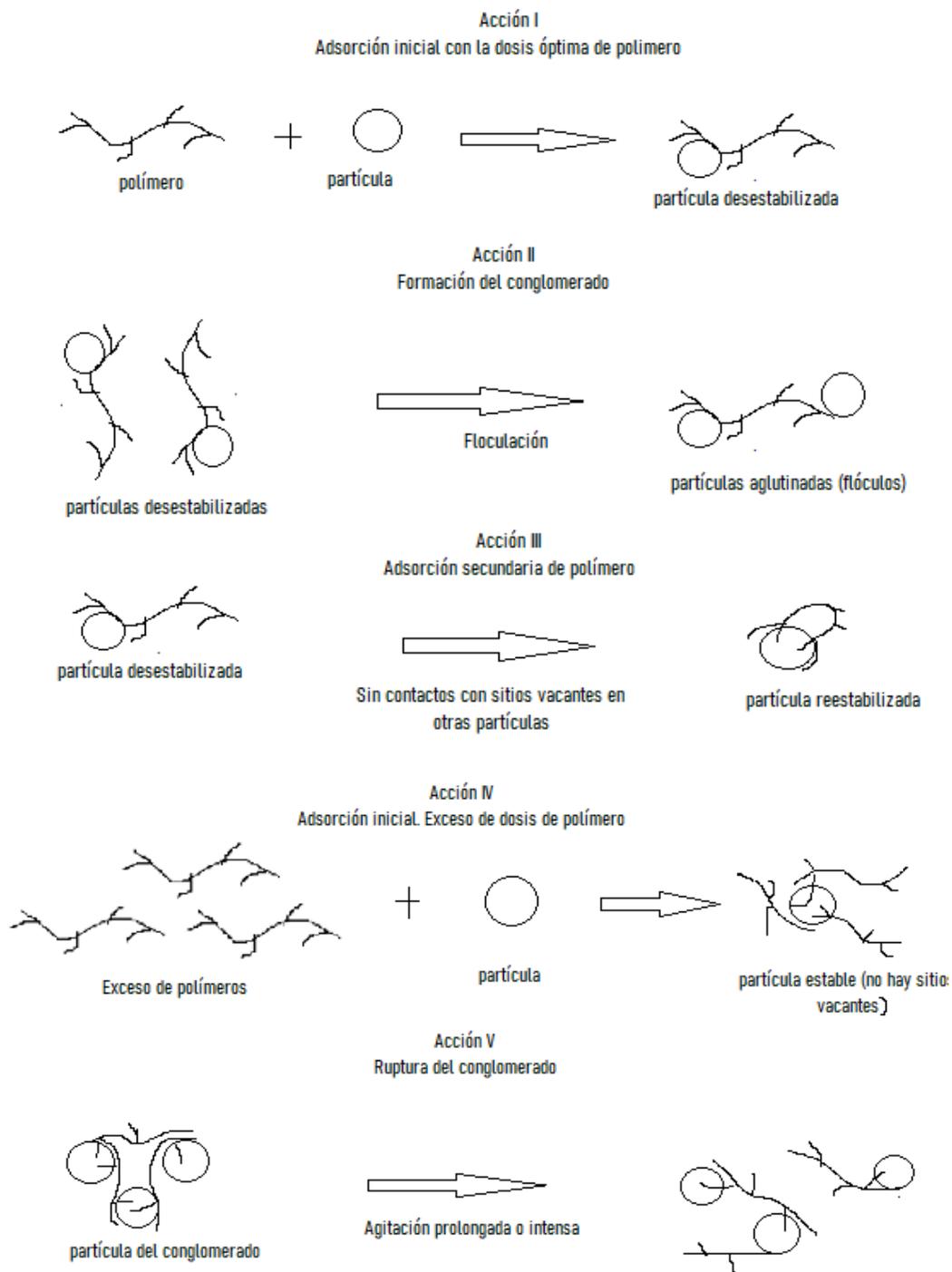


Figura 2.6. Coagulación por adsorción y formación de puentes (Modificado de Gómez, 2005).

2.4 Etapas de la coagulación

La coagulación es un proceso que depende del tiempo, y consta de las siguientes etapas, las cuales suceden en un tiempo muy corto (Andía, 2000):

- Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- Formación de compuestos químicos poliméricos.
- Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides.
- Adsorción mutua de coloides.
- Acción de barrido.

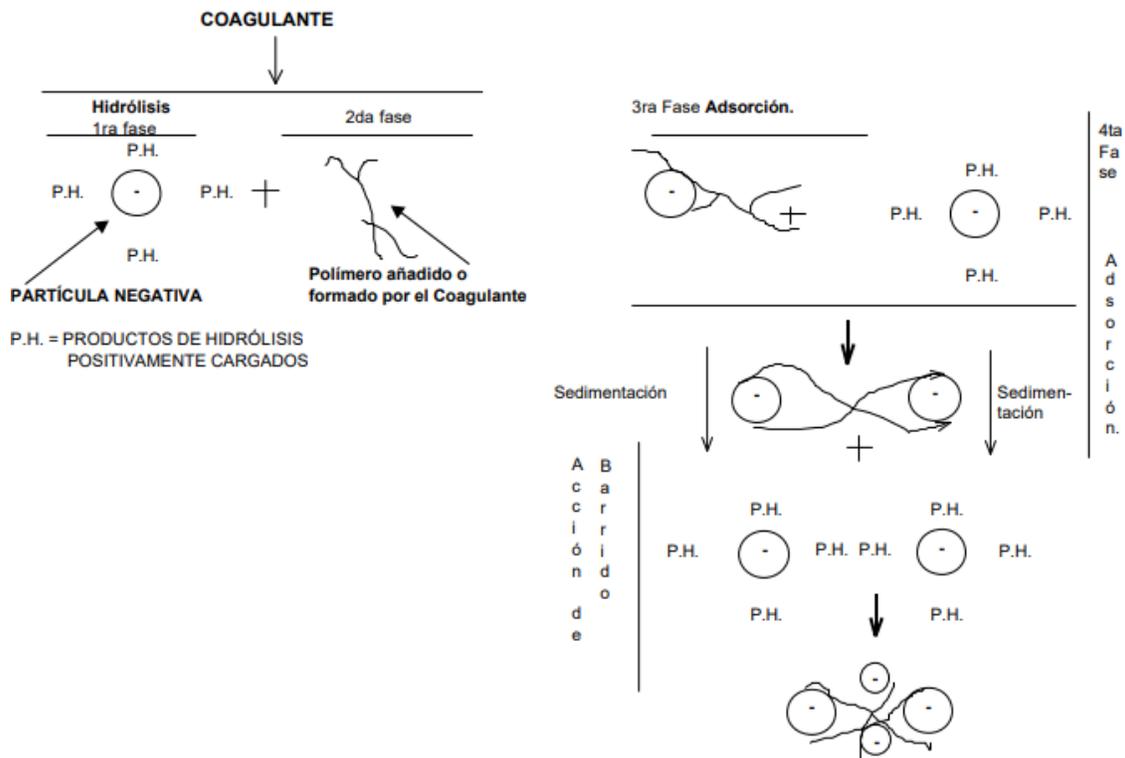


Figura 2.7. Etapas del proceso de coagulación (Andía, 2000)

2.5 Factores que influyen en el proceso de coagulación

Existen distintos factores que influyen en el proceso de coagulación/floculación independientemente de la naturaleza del coagulante, siendo este sumamente sensible a las características fisicoquímicas que posea el agua cruda; asimismo, la interrelación entre cada uno de ellos permite predecir cuáles son las cantidades de los coagulantes para adicionar al agua (Soto Bubert, 2007) lo que posibilita optimizar el proceso. Entre los parámetros que tienen una mayor influencia se encuentran los siguientes:

2.5.1 Temperatura

La variación de la temperatura del agua ocasiona cambios en su densidad, lo que altera la energía cinética de las partículas suspendidas y consecuentemente ralentiza el proceso de coagulación, además de alterar el tiempo requerido para la formación de flóculos. Se ha analizado la influencia de la temperatura en el proceso de coagulación, llegando a establecer dos regiones de variaciones muy marcadas: una entre 0° - 10°C y la segunda entre 10° - 40°C (Andía, 2000; López, 2018).

En la primera zona se define que a medida que el agua se acerca a 0°C la remoción de turbiedad disminuye, esto debido a que en dichas condiciones se estaría impidiendo el acercamiento de las partículas para su desestabilización; igualmente, la viscosidad del agua aumenta y con ello el transporte de las partículas coloidales se anula, por lo cual, la agitación exterior del agua no es suficiente para conseguir la aglomeración de las partículas pequeñas; además, el rango de pH óptimo también disminuye. Por otra parte, en la segunda región (10° - 40°C) se determinó que la eficiencia en la remoción de turbiedad mejoraba al aumentar la temperatura, debido al incremento de las colisiones de las partículas (López, 2018).

2.5.2 Dosis óptima

A partir de las características y el nivel de turbiedad que presente el agua cruda se puede determinar cuál es la dosis necesaria de coagulante a través de ensayos de

laboratorio (prueba de jarras), con ello se puede evitar el desperdicio de productos químicos y la disminución del rendimiento de la planta de tratamiento. Las curvas de coagulación para determinar la dosis óptima pueden dividirse en cuatro zonas (Izquierdo Flores y Garcia, 2015):

- Zona 1: La dosis añadida de coagulante es insuficiente para conseguir la desestabilización de las partículas y por lo tanto no se produce la coagulación.
- Zona 2: Al incrementar la dosis de coagulante, se produce la desestabilización de partículas y el conglomerado precipita.
- Zona 3: Si se continúa incrementando la dosis, se pueden re-estabilizar los coloides con ciertos valores de pH.
- Zona 4: Al aumentar aún más la dosis, se produce una sobresaturación que provoca una rápida precipitación de los coagulantes con un efecto de barrido, arrastrando en su descenso las partículas que conforman la turbiedad.

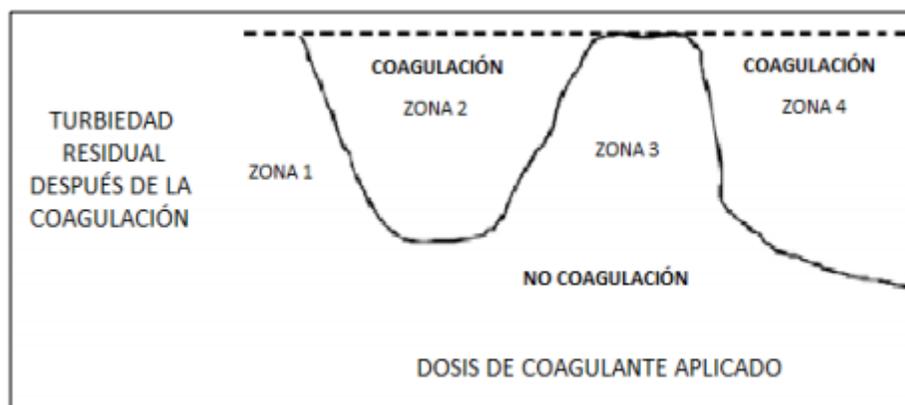


Figura 2.8 Curva de coagulación (López, 2018).

2.5.2.1 Prueba de jarras

Algunas veces puede resultar difícil determinar la dosis correcta de coagulante para el agua, por lo que la prueba de jarras es un método que se considera muy útil. En la prueba de jarras se utiliza variaciones en la dosis del coagulante en cada jarra, alternando variables como velocidades y tiempos de mezclado, pH y temperatura,

lo que permite reducir la cantidad de coloides en suspensión y formar flóculos, es decir, simula los procesos unitarios de coagulación, floculación y sedimentación, permitiendo realizar el ajuste de las variables de cada muestra hasta llegar a los valores en los que la floculación alcanza sus mejores resultados (Fúquene y Yate, 2018).

Dicho método es utilizado cuando se requiere determinar la dosis óptima de coagulantes en plantas de tratamiento de agua potable y/o agua residual. Con este procedimiento se obtienen las condiciones óptimas a escala laboratorio lo más representativas con el objetivo de predecir el funcionamiento de una operación unitaria a gran escala (Gómez, 2005).



Figura 2.9 Equipo para prueba de jarras (Mascarós, 2013).

2.5.3 pH

El pH se considera el factor que más influye en la coagulación ya que si no se selecciona el rango correcto puede disminuir la solubilidad del coagulante en agua y tardará más tiempo en formarse el conglomerado (Fúquene y Yate, 2018); cada agua tiene un pH óptimo dependiendo de su nivel de turbiedad y alcalinidad. De acuerdo con López (2018) se sabe que el pH óptimo para tratar aguas con color es más bajo (entre 4 y 6) que en agua con turbiedad (entre 6.5 y 8.5).

Los coagulantes naturales son muy sensibles a las variaciones de pH, donde si se emplea un valor distinto al óptimo se afecta la carga iónica de los aminoácidos que

componen las proteínas responsables de la coagulación y esto puede disminuir la eficiencia de remoción (Alazaiza *et al.*, 2022).

2.5.4 Intensidad y tiempo de mezclado

Entre las variables físicas que van a influir en el proceso de coagulación se encuentran: la intensidad de agitación, el tiempo de mezcla, el sistema de aplicación del coagulante, el punto de aplicación y el tipo de dispositivo de mezcla (López, 2018). Para garantizar una coagulación homogénea se requiere de un mezclado intenso y uniforme para distribuir el coagulante en toda la masa de agua, de modo que el mismo entre en contacto con las partículas coloidales antes de que la reacción de neutralización de cargas se complete.

El mezclado se realiza en dos etapas; en la primera el mezclado es enérgico para dispersar totalmente el coagulante en el agua; posteriormente, el mezclado es más lento y tiene como objetivo favorecer la formación de los flóculos (Andía, 2000).

2.6 Proceso de floculación

La floculación consiste en la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación para formar otras de mayor tamaño (flóculos). El objetivo de la floculación es la aglutinación de microflóculos para formar un conglomerado con peso específico superior al del agua, se disminuye su grado de hidratación para producir baja concentración volumétrica, lo cual produce una alta eficiencia en los procesos posteriores como sedimentación y filtración (Olortegui, 2020).

Como se mencionó anteriormente la floculación es favorecida por el mezclado lento que favorece la unión de los flóculos; si se realizara un mezclado demasiado intenso estos se romperían dificultando su filtración, lo cual afectaría la calidad del agua resultante (Andía, 2000).

La rapidez con la que ocurre la floculación depende del tamaño de las partículas con relación al estado de agitación del líquido, de la concentración de las mismas y

de su “grado de desestabilización”, siendo esto último el factor que permite la adherencia de las partículas entre sí (Aliaga, 2010).

Normalmente, la floculación suele tratarse como un proceso causado por la colisión entre partículas. Según Chambi-Hancco (2018) en ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

- Floculación pericinética o browniana. Es el movimiento natural de las moléculas del agua y está inducida por la energía térmica.
- Floculación ortocinética o gradiente de velocidad. Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el cual es producido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico.
- Sedimentación diferencial. Sucede cuando las partículas grandes, al precipitar, colisionan con las más pequeñas que van descendiendo lentamente y forman un aglomerado.

2.6.1 Factores que influyen en el proceso de floculación

De acuerdo con Chambi-Hancco (2018), los principales factores que influyen en el proceso de floculación son los siguientes:

- Concentración y naturaleza de las partículas: La velocidad de formación del flóculo es proporcional a la concentración de partículas en el agua y el tamaño inicial de estos.
- Tiempo de detención: La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención, donde a una eficiencia dada, se obtienen tiempos cada vez menores a medida que se aumenta el número de cámaras en floculación en serie.
- Gradiente de velocidad: Este es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Existe un límite máximo de gradiente que no puede ser sobrepasado, para evitar el rompimiento del flóculo.

Capítulo 3. Tipos de coagulantes

Los coagulantes pueden dividirse en coagulantes primarios y auxiliares de coagulación, siendo la principal diferencia entre ambos el que los coagulantes primarios se encargan de desestabilizar las partículas e iniciar la aglomeración, mientras los ayudantes aumentan la densidad de los flóculos de manera que no se rompan en etapas posteriores (Aliaga, 2010).

Dentro del proceso de coagulación existe una gran gama de coagulantes que permiten la remoción de partículas suspendidas y coloidales. Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas se clasifican en inorgánicos, polímeros orgánicos sintéticos y coagulantes de origen natural (Bravo, 2017).

3.1 Coagulantes inorgánicos

Esta clase de coagulantes se puede aplicar en una gran variedad de agua residual de distintos orígenes, siendo particularmente eficaces en agua cruda con baja turbiedad. Al ser añadidos al agua se producen una serie de reacciones químicas complejas donde las sales reaccionan con la alcalinidad del medio y producen hidróxidos metálicos (de hierro o aluminio), los cuáles son insolubles y forman los precipitados (Ramírez y Jaramillo Peralta, 2016).

Entre los coagulantes inorgánicos más utilizados en el proceso destacan el sulfato de aluminio, el sulfato férrico, el sulfato ferroso, el cloruro férrico y el aluminato de sodio (Bravo, 2017). Este tipo de coagulantes son de los más usados en el tratamiento de agua debido a su rendimiento, disponibilidad, costo y efectividad (Shak y Wu, 2014), sin embargo se han estudiado y se ha demostrado que poseen efectos adversos a la salud humana debido a los residuos que permanecen en el agua.

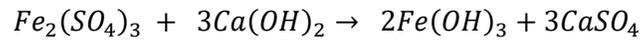
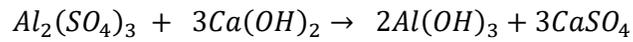


Figura 3.1. Reacciones de coagulación y formación del conglomerado (Mountain Empire Community College, 2010)

Muchas veces dependiendo del pH y alcalinidad inicial del agua bruta es necesario añadir un álcali, también denominado auxiliar de coagulación, para contrarrestar el decaimiento de pH del coagulante primario, siendo importante al afectar la carga superficial de la partícula, aumentando la densidad de los flóculos e incrementando la rapidez de sedimentación lo que facilita la formación del precipitado. Estos auxiliares no siempre son requeridos ya que depende del tipo de agua que se quiera tratar y en general son utilizados para reducir el tiempo de floculación (Mountain Empire Community College, 2010).

Tabla 3.1. Comparación entre coagulantes inorgánicos (Aguilar, 2002; González, 2016; Peyravi *et al.*, 2020).

Coagulante	Características	Ventajas	Desventajas
$Al_2(SO_4)_3$	<ul style="list-style-type: none"> Se presenta en forma sólida o líquida Soluble en agua Forma iones de carga positiva Rango de pH: 5.5 – 7.5 	<ul style="list-style-type: none"> Fácil de disolver en agua Bajo costo Flexibilidad de uso en diferentes tipos de agua No genera coloración rojiza de suelos, paredes o equipos 	<ul style="list-style-type: none"> Es eficaz sólo en cierto intervalo de pH Alta generación de lodos
$FeSO_4$	<ul style="list-style-type: none"> Compuesto granular de color verde Reacciona con la alcalinidad del agua para formar bicarbonato ferroso Suele emplearse con cal para formar precipitados al elevar el pH Rango de pH: 8.0 – 11.0 	<ul style="list-style-type: none"> El hidróxido férrico se forma a valores de pH bajos. El hidróxido férrico es insoluble en un amplio intervalo de valores de pH El flóculo de hidróxido férrico no se disuelve fácilmente 	<ul style="list-style-type: none"> Para que sea útil como coagulante debe existir la oxidación del ion ferroso en ion férrico insoluble Su uso es muy apegado a la presencia de cal
$Fe_2(SO_4)_3$	<ul style="list-style-type: none"> Material anhidro Soluble en agua Es eficiente en la prevención de olores debido a su capacidad de reaccionar con sulfuros Rango de pH: 8.0 – 11.0 	<ul style="list-style-type: none"> El hidróxido férrico se forma a valores de pH bajos, por lo que la coagulación es posible con sulfato férrico a valores de pH tan bajos como 4,0 El hidróxido férrico es insoluble en un amplio intervalo de valores de pH. El flóculo formado con coagulantes férricos es más pesado que el formado con alumbre El flóculo de hidróxido férrico no se disuelve a valores altos de pH 	<ul style="list-style-type: none"> El producto requiere un mejor diseño de proceso El producto sólido necesita una muy buena mezcla en la unidad de dilución
$FeCl_3$	<ul style="list-style-type: none"> Forma líquida o cristalina Reacciona con la alcalinidad del agua o con cal para formar un conglomerado de hidróxido férrico Se usa más en tratamiento de aguas residuales que en aguas para consumo Rango de pH: Mayor a 3.5 	<ul style="list-style-type: none"> Alta velocidad de reacción Bajo costo El rango bajo de pH 3.5 – 7.0 es superior en la remoción de sustancias orgánicas El rango alto de pH 8.0-9.5 es usado para la remoción de hierro y manganeso 	<ul style="list-style-type: none"> Problemas en el proceso pueden causar un color y precipitación en el agua tratada Muy corrosivo para manejar y almacenar

3.2 Polímeros orgánicos sintéticos

También denominados polielectrolitos. Son polímeros solubles en agua de gran peso molecular que están basados en unidades repetidas de varios monómeros tales como acrilamida y ácido acrílico. Suelen derivar de materias primas basadas de petróleo y no son renovables (Espinosa y Zuluaga, 2018). Estos materiales suelen usarse más como ayudantes de coagulación.

Los polímeros sintéticos son clasificados en catiónico (carga positiva), aniónico (carga negativa) , anfótero (contiene grupos catiónicos y aniónicos) y no iónico (sin carga), donde su capacidad coagulante es fuertemente influenciada por parámetros como la naturaleza de las cargas, el peso molecular y la densidad de carga (Bravo, 2017).

La ventaja que tienen los polielectrolitos es que cuando en condiciones normales no habría sido posible la formación del conglomerado por las fuerzas de repulsión creadas por la doble capa los polielectrolitos permiten la unión de coloides entre sí por fuerza química (Ojeda, 2012).

Actualmente se emplea una gran variedad de polímeros orgánicos sintéticos, sin embargo, la toxicidad de estos productos es un factor de suma importancia ya que en ocasiones los monómeros que los componen pueden ser tóxicos, como lo son los monómeros acrílicos, representando una amenaza a la salud (Aliaga, 2010).

3.3 Coagulantes de origen natural

Los coagulantes naturales son sustancias solubles en agua, extraídas a partir de materiales de origen vegetal o animal que actúan de forma parecida a los coagulantes sintéticos, desestabilizando y aglomerando las partículas coloidales que contiene el agua para facilitar su posterior sedimentación, con la diferencia que estos son biodegradables y no tóxicos. Además, otra ventaja adicional es que varios de ellos poseen además propiedades antimicrobianas, por lo que reducen o eliminan los microorganismos patógenos capaces de producir enfermedades (García, 2007).

El uso de los coagulantes naturales se remonta a milenios atrás donde se empleaban de manera empírica para la depuración de agua contaminada. En la actualidad se realizan estudios que hacen posible identificar posibles fuentes de obtención de coagulantes naturales para su aplicación en el tratamiento de agua, con esta alternativa se podría disminuir el uso de sustancias químicas sintéticas, minimizando con ello la cantidad de residuos tóxicos que permanecen en el agua. Por otra parte, los lodos producidos serían biodegradables, con un volumen entre el 20-30% menor comparados con los generados con agentes coagulantes metálicos, lo que facilitaría su manejo y disposición. (Sanghi *et al.*, 2006; Villabona *et al.*, 2013).

Resultan una potencial alternativa debido a su valor agregado en contraste con los coagulantes químicos donde los de origen natural son seguros, ecológicos y libres de compuestos tóxicos, producen menos volumen de lodos y son accesibles para los países en desarrollo al poder extraerse de residuos agrícolas y cultivarse localmente, manteniendo rendimientos comparables con las sales metálicas y una alta efectividad en la clarificación de agua residual de distintos orígenes (Espinosa y Zuluaga, 2018).

A continuación, se presenta una tabla describiendo las principales ventajas y desventajas de los coagulantes naturales.

Tabla 3.2 Ventajas y desventajas de los coagulantes naturales (López León *et al.*, 2017)

Coagulantes naturales	
Ventajas	Desventajas
Bajo costo	No todos tienen el mismo desempeño
Poder antimicrobiano	Algunos son utilizados ampliamente en la agricultura
Bajas concentraciones	Pueden llegar a no ser tan efectivos como el sulfato de aluminio
No representan un riesgo a la salud	Incrementan la carga de materia orgánica en el agua
No son tóxicos	
Residuos no contaminantes	

3.4 Comparación entre los tipos de coagulantes

Algunos de los coagulantes de origen natural han sido estudiados con mayor profundidad, proporcionando resultados positivos en relación con su actividad coagulante en contraste con las sales inorgánicas. De todos los coagulantes naturales, el coagulante primario de origen vegetal más conocido y estudiado en la actualidad es la semilla de *Moringa oleífera*. Investigaciones sugieren que para aguas de baja turbiedad, sus semillas pueden ser un sustituto potencialmente viable del sulfato de aluminio para la clarificación de las aguas (López, 2018).

Sin embargo, un inconveniente importante que presentan los coagulantes naturales es que cuando se adicionan al agua pulverizados, aumenta la carga orgánica de manera significativa, añadiendo hasta un 90% de sustancias orgánicas que no actúan como agentes floculantes (Bravo, 2017).

Por otra parte, los coagulantes naturales son bastante rentables, ya que se pueden añadir en una dosis mucho más baja sin perder su eficiencia, y son accesibles para todos, pudiendo obtenerse de una gran diversidad de plantas. Esta solución también produce naturalmente cantidades mucho menores de lodo para eliminar, lo que nuevamente reduce los costos (Silva *et al.*, 2021).

Además, a diferencia de los coagulantes inorgánicos, estos coagulantes no consumen alcalinidad del líquido al que se añaden, lo que ayuda a minimizar los cambios de pH o conductividad. Otro factor es que debido a la composición del coagulante, tampoco hay aumento de sal dentro del líquido y, como tal, cualquier preocupación por la contaminación se reduce en gran medida (Ramírez y Jaramillo Peralta, 2016).

En la tabla 3.3 se muestra una comparación entre los coagulantes sintéticos y los de origen natural en varios aspectos importantes a considerar para su comercialización e implementación en el tratamiento de agua.

Tabla 3.3 Contraste entre los tipos de coagulantes (Bravo, 2017; Fuentes Molina *et al.*, 2016; López *et al.*, 2017).

Característica	Coagulante inorgánico	Coagulante natural
Rentabilidad	Si	Si
Abundancia	Alta	Alta
Biodegradabilidad	No	Si
Producción de lodos	Alta	Baja
Dosis	Suele ser alta	Bajas
Toxicidad	Residuos y subproductos tóxicos	Nula
Solubilidad	Alta	Escasa
Rendimiento	Alto	Medio
Facilidad de producción	Alta producción	Se pueden cultivar localmente
pH	Efectivos en pH 5.5 – 8.0	Efectivos en pH 7.0 – 10.0
Costo de adquisición	Alto	Bajo
Temperatura	Ineficaz a baja temperatura	Ineficaz a baja temperatura

3.5 Efectividad

En la tabla 3.4 se resumen datos obtenidos de diversos estudios enfocados a la aplicación de coagulantes de origen vegetal para la remoción de turbiedad en muestras de agua residual proveniente tanto de efluentes industriales como muestras sintéticas, bajo diferentes condiciones.

Tabla 3.4 Remoción de turbiedad con coagulantes naturales

Coagulante	Tipo de agua	Turbiedad inicial (UNT)	pH	Dosis óptima (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
<i>Moringa oleífera</i> (Semillas)	Agua residual sintética	150	6-8	200	80.7	(Thakur y Choubey, 2014)
	Agua cruda de río	50-100	ND	10 - 45	90	(Rodiño-Arguello <i>et al.</i> , 2015)
	Efluente de industria textil	52	9	16	92	(Hemapriya <i>et al.</i> , 2015)
<i>Strychnos potatorum</i> (nirmali)	Agua residual sintética	35	ND	0.8	57.14	(Gaikwad y Munavalli, 2019)
	Agua cruda	125	ND	3	58.4	(Deshmukh <i>et al.</i> , 2013)
	Agua residual sintética	20	ND	0.6	64.28	(Gaikwad y Munavalli, 2019)
<i>Opuntia ficus indica</i> (cactus)	Efluente industria textil	ND	5-7	0.8	95	(De Souza <i>et al.</i> , 2014)
	Agua residual sintética	100	9	50	84	(Caldera <i>et al.</i> , 2020)
	Agua residual sintética	200	9	50	97.4	
<i>Jatropha curcas</i> (piñón de tempate)	Agua residual sintética	250	3	120	99	(Abidin <i>et al.</i> , 2011)
	Agua residual sintética	250	7	120	42	
	Agua residual sintética	250	11	120	97	

Coagulante	Tipo de agua	Turbiedad inicial (UNT)	pH	Dosis óptima (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
<i>Carica papaya</i> (semillas de papaya)	Agua residual municipal	71.66	7.7	800	66.6	(Maurya y Daverey, 2018)
	Agua cruda	94	4	196	87.6	(Amran <i>et al.</i> , 2021)
	Agua cruda	392.7	8	ND	88.7	(Yimer y Dame, 2021)
<i>Tamarindus indica</i> (semillas de tamarindo)	Efluente industria detergentes	1670	7.25	400	97.01	(Ayangunna <i>et al.</i> , 2016)
	Efluente industria minera	1531.11	4	500	78	(Effendi y Hariyadi, 2017)
	Agua residual sintética	180	7	400	70	(Emiliah <i>et al.</i> , 2017)
<i>Musa paradisiaca</i> (cáscara de plátano)	Agua residual sintética	216	1	100	73	(Mokhtar <i>et al.</i> , 2019)
	Agua residual municipal	71.66	7.73	400	59.6	(Maurya y Daverey, 2018)
	Efluente de refinería	39.3	8	20	71.9	(Nwanisobi, 2018)

(ND: NO DISPONIBLE)

En la tabla 3.4 se presentan de forma resumida los hallazgos encontrados en la literatura, donde se aplican los coagulantes naturales con el objetivo de remover la turbiedad en muestras de agua residual de origen industrial, municipal y sintético. Las muestras sintéticas utilizadas poseen diferencias entre si en cuanto a las condiciones de pH y el nivel de turbiedad inicial con el fin de resaltar la influencia que tienen estos parámetros en la determinación de la dosis óptima de coagulante necesaria y el porcentaje de eficiencia del proceso.

De acuerdo con los datos recopilados, se observa que *Moringa oleifera* es eficaz para agua de baja turbiedad en dosis pequeñas, mientras que en agua de mayor turbiedad se necesita incrementar la dosis y aunque no se consigue igualar la eficiencia de remoción alcanzada en la primera, el resultado obtenido es favorable. Por otra parte, las semillas de *Strychnos potatorum* tienen eficiencias similares con dosis bajas independientemente del valor de dicho parámetro. Entonces, *Moringa oleifera* es un coagulante más eficaz para agua de alta turbiedad, en comparación con *Strychnos potatorum*.

También se muestra que el coagulante *O. ficus indica* a condiciones de pH básico (9 unidades) y valores altos de turbiedad inicial (200 UNT) es bastante efectivo, requiriendo aplicarse a la muestra sólo una dosis pequeña de coagulante (50 mg/L), para alcanzar un porcentaje alto de remoción (97.4%). *Jatropha curcas* funciona en un gran rango de turbiedades manteniendo su eficiencia en la remoción a pH ácidos o alcalinos.

Las semillas de tamarindo muestran mejores eficiencias de remoción a pH neutro que ácido; por el contrario, la cáscara de plátano en condiciones altamente ácidas mostró buenos resultados.

Las semillas de papaya funcionan mejor en agua con baja turbiedad, mientras las semillas de tamarindo muestran buenos resultados independientemente de la turbiedad inicial; sin embargo, requieren dosis más altas de coagulante.

En la tabla 3.5 se muestran datos recopilados sobre la aplicación de coagulantes sintéticos para la remoción de turbiedad en industrias de diversos giros, con sus respectivas eficiencias al igual que la dosis empleada.

Tabla 3.5 Remoción de turbiedad con coagulantes comerciales.

Coagulante	Tipo de agua	Dosis óptima (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
Sulfato de Aluminio + polímero catiónico	Agua de curtiduría	100	97	(Haydar y Aziz, 2009)
Sulfato de Aluminio + organopol	Industria papelera	1000	99.7	(Haydar y Aziz, 2009)
Sulfato de Aluminio	Lixiviado	11	99.8	(Silva <i>et al.</i> , 2021)
Sulfato de Aluminio	Refinería	40	92	(Silva <i>et al.</i> , 2021)
Cloruro férrico	Industria del carbón	400	98	(Babarao y Verma, 2015)
Cloruro férrico	Agua de curtiduría	150	72	(Ahmed <i>et al.</i> , 2016)
Cloruro férrico + Sulfato de Aluminio	Agua de hospital	---	92	(Suarez <i>et al.</i> , 2009)
Cloruro férrico	Industria de bebidas	300	100	(Amuda y Amoo, 2007)
Cloruro férrico	Industria cosmética	500	70	(Carpinteyro <i>et al.</i> , 2012)
Sulfato férrico + polielectrolito	Industria de bebidas	500	94	(Amuda y Amoo, 2007)

Como se muestra en la tabla anterior, los coagulantes convencionales obtienen eficiencias de remoción un poco más elevadas en contraste con la que se llega a alcanzar con los coagulantes naturales; sin embargo, las dosis óptimas suelen ser mucho más elevadas, lo que influye directamente en el costo de tratamiento, además de las consecuencias ambientales y a la salud humana que desencadenan al no poderse eliminar por completo los residuos de estos materiales del agua.

También se observa que las mezclas de coagulantes inorgánicos en el tratamiento de agua residual proveen resultados favorables en la clarificación de agua, teniendo en algunos casos incluso una mayor eficiencia que por sí solos.

Capítulo 4. Coagulantes de origen natural

Los coagulantes y floculantes de origen natural son una fuente alternativa que los pueblos originarios han empleado desde la antigüedad en distintos lugares del mundo para el tratamiento del agua, siendo esenciales para la aglomeración de las partículas contaminantes que se encuentran suspendidas en el agua. Dichos compuestos se generan por reacciones espontáneas producidas en animales y plantas, producto de su metabolismo o de las reacciones bioquímicas que ellos producen.

Los polímeros orgánicos naturales se han usado por más de 4000 años en India, en África y en China como coagulantes eficientes y como auxiliares de coagulación de aguas con alta turbiedad, para uso doméstico en áreas rurales (Andía, 2000)

Los coagulantes de origen natural se pueden usar como coagulante primario o como auxiliar de coagulación y de floculantes químicos, aplicándose para reducir la turbiedad y los microorganismos en aguas y para el acondicionamiento de lodos (Espinosa y Zuluaga, 2018).

4.1 Clasificación

Existen tres tipos de coagulantes naturales dependiendo de su origen: los provenientes de plantas, los de animales, y los microorganismos. La mayoría de los coagulantes naturales explorados para el tratamiento del agua son polisacáridos de origen vegetal y animal. En una revisión exhaustiva de coagulantes a base de plantas reportados utilizados para el tratamiento del agua se halló que las partes de las plantas utilizadas son en su mayor parte son semillas, frutos, hojas y raíces (Nimesha *et al.*, 2022)

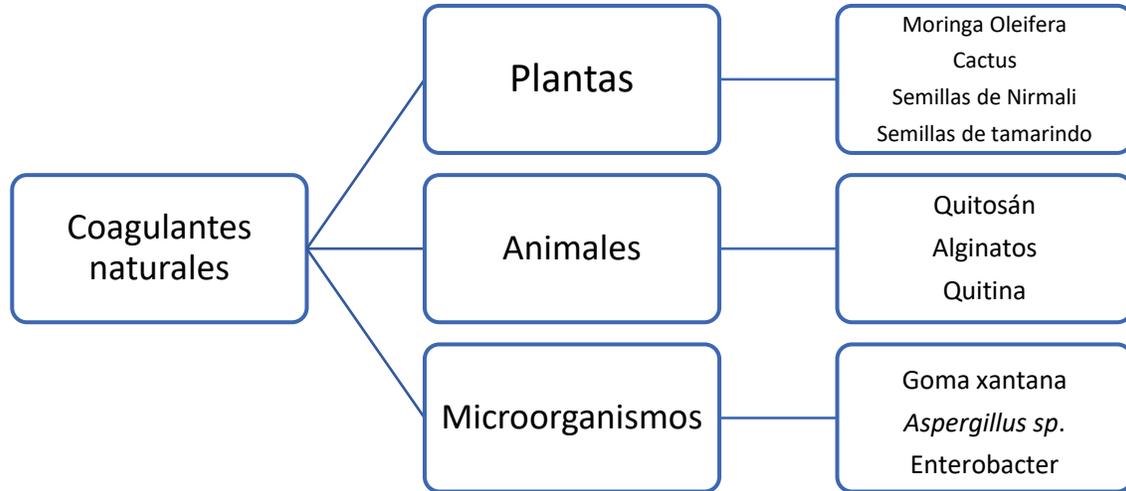


Figura 4.1 Clasificación de los coagulantes de origen natural (Modificado de Nimesha *et al.*, 2022).

4.1.1 Coagulantes de origen animal

Dentro de los metabolitos procedentes de los animales, el quitosán, un producto derivado del exoesqueleto de caracoles, camarones y cangrejos, se ha empleado como coagulante y floculante. Según Ramírez y Jaramillo-Peralta (2016), el quitosán se ha empleado ampliamente en aguas provenientes de la industria y en menor medida en el tratamiento de aguas para potabilización. El porcentaje de remoción de la turbiedad que se ha alcanzado con esta sustancia es del 98% en pruebas de laboratorio y a bajas concentraciones de turbiedad (< 90 UNT).

4.1.2 Coagulantes de origen vegetal

La gran mayoría de los extractos vegetales empleados como coagulantes y floculantes provienen de las hojas, flores, semillas y raíces de las plantas (Ramírez y Jaramillo Peralta, 2016). Este tipo de sustancias son polímeros naturales empleados en diferentes regiones del mundo y provenientes de diferentes especies vegetales, hasta la fecha, algunos de los tipos de especies vegetales que se han utilizado ampliamente como coagulantes naturales son *Moringa oleifera* (moringa),

Strychnos potatorum (nirmali), *Opuntia ficus indica* (cactus), *Jatropha curcas*, *Carica papaya* (semillas de papaya), *Tamarindus indica* (semillas de tamarindo) y *Musa paradisiaca* (cáscara de plátano) usados en la disminución de contaminantes para el tratamiento de aguas residuales, y especialmente en la remoción de turbiedad, es por ello que en el presente escrito se profundizará más en la aplicación y características de dichos coagulantes.

4.1.2.1 *Moringa oleifera* (moringa)

Moringa oleifera conocida comúnmente como moringa, pertenece a la familia Moringaceae. Es una planta tropical originaria de la India con actual presencia en Asia, África y América Latina; puede crecer en condiciones de escasez de agua (Martín *et al.*, 2018). Sus semillas han sido utilizadas ampliamente como coagulantes naturales para el tratamiento de agua, en la eliminación de turbiedad, sólidos totales suspendidos, colorantes y Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Bravo, 2017). Otros estudios, han demostrado la eficiencia de las hojas de moringa, como agente antimicrobiano y bactericida para la inhibición del crecimiento de bacterias como *P. aeruginosa*, *S. aureus* y *E. coli* (Azuero *et al.*, 2016).

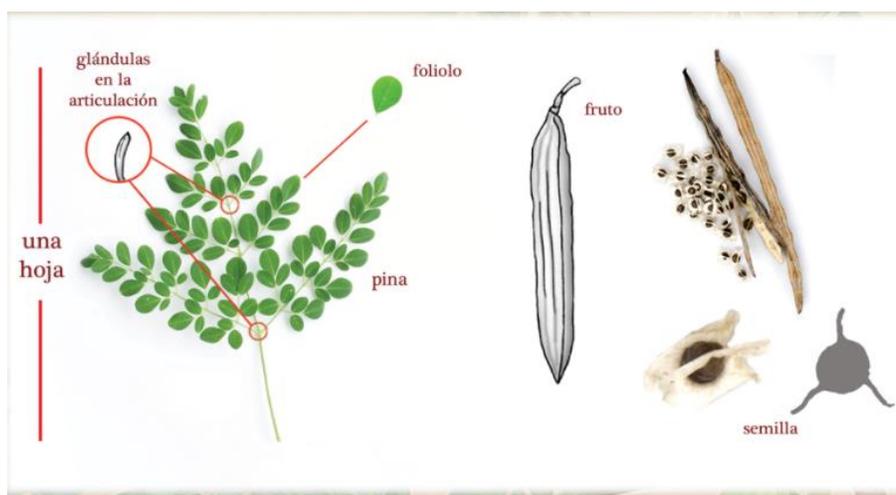


Figura 4.2 Hojas, frutos y semillas de *Moringa Oleifera* (Santillán, 2013).

Las partes utilizadas de *Moringa oleifera* para la coagulación son principalmente las semillas secas trituradas para extraer los componentes activos que generan actividad coagulante, posteriormente disueltas en agua destilada o en presencia de

solución salina (NaCl 0.5 M). Posterior a su extracción, el activo coagulante de *Moringa oleífera*, se puede purificar con diversas técnicas como la ultrafiltración de intercambio iónico, precipitación química y electroforesis para extraer los agentes activos que intervienen en el proceso de coagulación y disminuir la generación de materia orgánica (Bravo, 2017).

El siguiente diagrama describe el proceso más común por el cual se puede extraer el componente activo de la moringa responsable de la coagulación (Arias *et al.*, 2017):

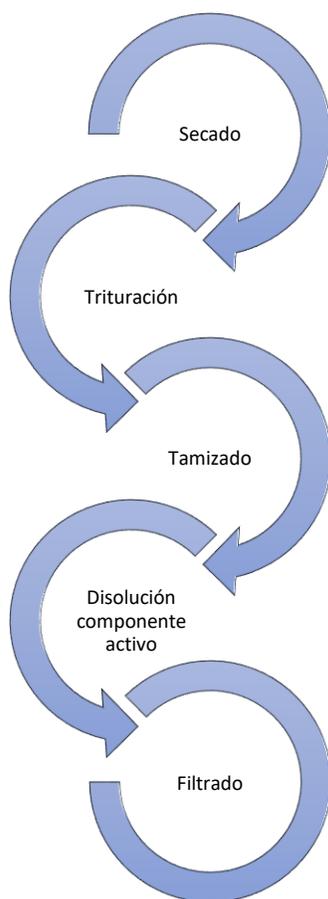


Figura 4.3 Proceso de extracción de *Moringa Oleífera* (García, 2007).

Según los resultados obtenidos por diversos autores, los componentes activos coagulantes de *Moringa oleífera* están presentes tanto en semillas con cáscara como sin ella, las primeras muestran actividad coagulante en el tratamiento de aguas con alta turbiedad inicial (426 UNT), mientras que las semillas sin cáscara

reportan capacidad coagulante en aguas con baja turbiedad (105 UNT) (Bravo, 2017), por ello su aplicación se puede extender a agua contaminada proveniente de distintos orígenes.

4.1.2.2 *Strychnos potatorum* (nirmali)

Strychnos potatorum también conocido como árbol de nuez de claro pertenece a la familia Loganiaceae. Las semillas del árbol se utilizan comúnmente con fines medicinales, así como para purificar el agua en la India y Myanma (Deshmukh *et al.*, 2013).

Escritos de la India relatan que las semillas de *Strychnos potatorum* se utilizaron para aclarar aguas superficiales turbias hace más de 4000 años. Entonces, la especie se nombró como árbol de nuez de limpieza o nirmali (Deshmukh *et al.*, 2013).

Al analizar los extractos de semillas de nirmali se definió que son polielectrolitos aniónicos que desestabilizan las partículas en el agua por medio de interpartículas puente. Además, se detalló que los extractos de semillas contienen en mayor proporción taninos, seguido de saponinas, lípidos, carbohidratos y alcaloides que contienen –COOH y –OH libre en la superficie, grupos que mejoran la capacidad de coagulación (Yadav *et al.*, 2014).

Esta especie ha mostrado ser efectiva en dosis pequeñas como auxiliar de coagulación de sales metálicas en la remoción de turbiedad (Banchón *et al.*, 2016).



Figura 4.4 Planta y semillas de *Strychnos potatorum* (Leone *et al.*, 2015).

4.1.2.3 *Opuntia ficus indica* (cactus)

Opuntia ficus indica (cactus) pertenece a la familia Cactaceae y cuenta con aproximadamente 258 especies distintas (López, 2018). Esta planta es originaria de América del Sur, pero también se encuentra en África, Australia, sur de Europa y Asia (Bravo, 2017).

Es una de las plantas que ha sido ampliamente investigada como un agente coagulante y floculante para la descontaminación de aguas industriales y domésticas, con enfoque hacia la remoción de turbiedad, metales pesados, y color principalmente (Villabona *et al.*, 2013).

La planta está compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, azúcares reductores como glucosa y fructosa, y de metabolitos secundarios tales como saponinas, en forma de triterpenos y flavonoides. Las propiedades coagulantes se deben principalmente a la presencia de carbohidratos complejos almacenados en los cladodios del cactus donde se piensa que el ácido poligalacturónico es el principal responsable (Villabona *et al.*, 2013); también el mucilago es muy utilizado para el proceso de coagulación/floculación.

Por lo tanto, *Opuntia ficus indica* se considera como un material natural, económico y biodegradable para la descontaminación del agua.



Figura 4.5 Cladodios de *Opuntia ficus indica* utilizados en el tratamiento de agua residual (Bravo, 2017).

4.1.2.4 *Jatropha curcas* (piñón de tempate)

Jatropha curcas (piñón de tempate) es una planta originaria de México dentro de la familia Euphorbiaceae, perteneciente al grupo de las oleaginosas. En la actualidad se cultiva en América Central, América del Sur, Sureste de Asia, India y África (Delgado, 2016).

De acuerdo con estudios, las semillas y los residuos después de la extracción de aceite de esta especie contienen principios activos que muestran alta actividad coagulante (Abidin *et al.*, 2011).

Para la extracción del agente coagulante, se han usado semillas sin cáscara previamente pulverizadas mezcladas con diferentes disolventes, como cloruro de sodio (NaCl), hidróxido de sodio (NaOH), y agua destilada (Bravo, 2017). Según distintos estudios, los componentes activos que confieren propiedades coagulantes en las semillas de *Jatropha Curcas* son proteínas catiónicas solubles (Caldera *et al.*, 2020).



Figura 4.6 Semillas y planta de *Jatropha Curcas* (Bravo, 2017).

4.1.2.5 *Carica papaya* (semillas de papaya)

La papaya es una planta herbácea originaria de América Central; mide entre 2 y 10 m de altura con un diámetro de 6 a 30 cm y crece en lugares con climas tropicales o subtropicales (Singh *et al.*, 2010). Diversos estudios han encontrado poderosas propiedades anticancerígenas y medicinales (Kumar Neethu y Devi, 2017).

Sus semillas están compuestas principalmente por ácidos grasos, proteínas, fibra, aceite de papaya, carpaína, caricina, glucotropeolina, bencil glucosinolatos, bencil isotiocianato, bencil tiourea, hentriacontano, β -sitostrol, y una enzima mirosina (Kumar Neethu y Devi, 2017). Dentro de dicha composición la que le confiere propiedades coagulantes es la proteína con carga positiva conocida como cisteína proteasa la cual se une a las partículas coloidales y permite la formación y precipitación del conglomerado (Unnisa y Bi, 2018).



Figura 4.7 Semillas y polvo de semillas de papaya (Unnisa y Bi, 2018).

4.1.2.6. *Tamarindus indica* (semillas de tamarindo)

El tamarindo es una fruta tropical originaria de África perteneciente a la familia Fabaceae que se ha expandido a Asia, América Central y del sur. El uso que se le da es principalmente gastronómico debido a su pulpa de sabor ácido característico, rica en vitaminas A y C, fibra, antioxidantes y minerales (Zanin, 2021).



Figura 4.8. Tamarindo (fruto) (Unnisa y Bi, 2018)

La semilla del tamarindo es rica en proteínas; conteniendo una gran cantidad de aminoácidos esenciales, como isoleucina, leucina, licina, metionina, fenilalanina, valina. Además de esto, las semillas también son una buena fuente de ácidos grasos esenciales. Además, el polisacárido de semilla de tamarindo y la goma de

tamarindo son muy útiles en la industria textil, de pintura y en muchas industrias farmacéuticas (Bagul *et al.*, 2018).

El polvo de semilla de tamarindo, frecuentemente desechado como residuo agrícola, es un agente eficaz para tratar agua turbia municipal e industrial, donde la proteína contenida en la semilla actúa como un polielectrolito para clarificar el agua (Raju *et al.*, 2018).



Figura 4.9 Semillas de tamarindo enteras y trituradas (Raju *et al.*, 2018).

4.1.2.7 *Musa paradisiaca* (cáscara de plátano)

El plátano es una planta monocotiledónea que pertenece a la familia Musaceae. Es uno de los cultivos más importantes en la agricultura mexicana y ocupa el segundo lugar de la producción en frutas tropicales con un valor nutritivo alto, aportando potasio, hierro y vitamina K (García-Mata *et al.*, 2013).



Figura 4.10 *Musa paradisiaca* (Ríos, 2014).

Generalmente, la cáscara de plátano representa del 30 al 50% del peso total de la fruta de banano, y se compone principalmente de pectina, celulosa, hemicelulosa, lignina y una gran cantidad de grupos hidroxilo y carboxilo siendo estos los que se pueden combinar con contaminantes en el agua por quelación, coordinación, formación de complejos, y enlaces de hidrógeno (Fu *et al.*, 2019). Considerando que la cáscara del fruto suele desecharse y sólo ocasionar más contaminación y producción de microorganismos y hongos (Cohen, 2009) es una buena alternativa aprovecharlo para el tratamiento de agua.

4.2 Método general de extracción del coagulante natural

De acuerdo con Lasteros Patilla (2017), la técnica de extracción por solvente es la más antigua y la más utilizada. Esta técnica de extracción por solvente tiene la capacidad de realizar las extracciones en una muestra líquida o sólida con el mínimo esfuerzo, donde los procedimientos de extracción para obtener coagulantes a partir de origen vegetal son casi iguales para todas las especies.

En la siguiente figura se muestran los pasos de obtención de coagulantes naturales a partir de fuentes vegetales:

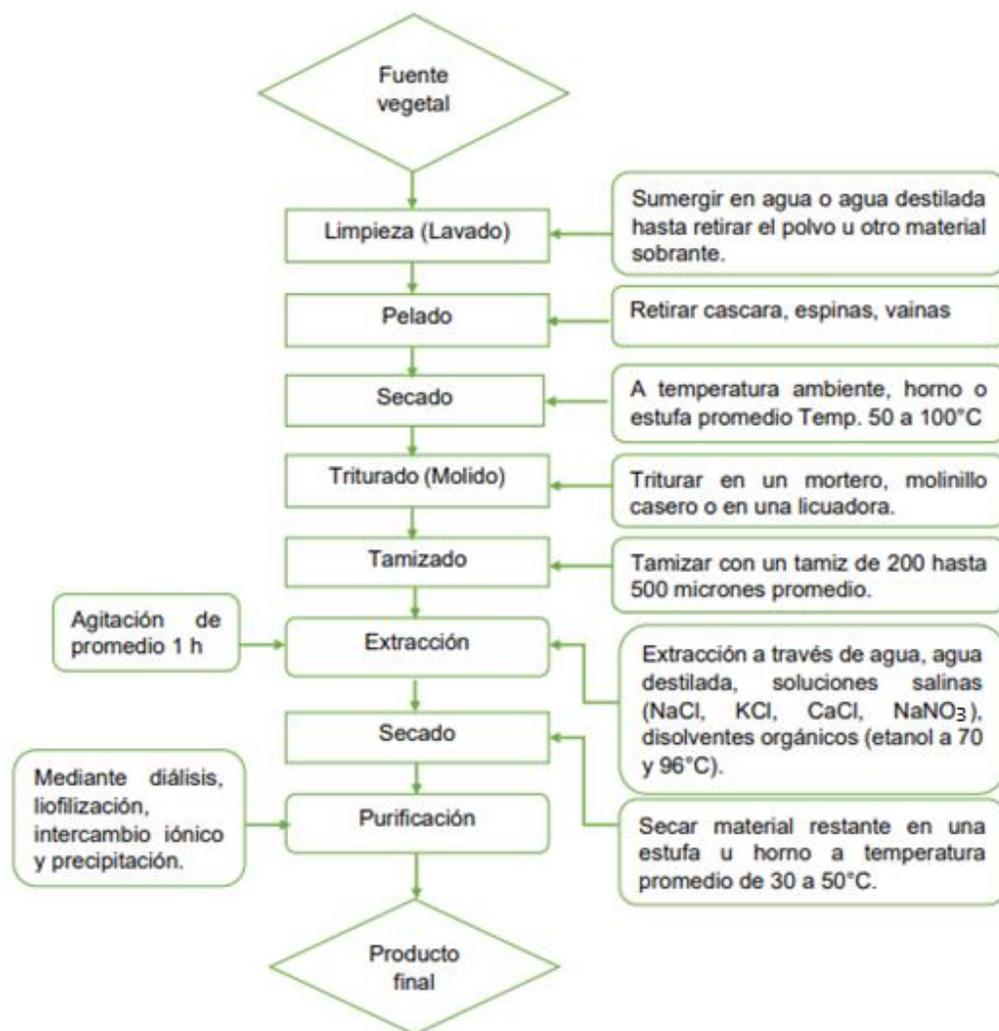


Figura 4.11 Proceso general de extracción de coagulante a partir de fuentes vegetales (Lasteros Patilla, 2017).

4.3 Coagulantes compuestos

Diversos estudios indican que en realidad vale la pena desarrollar la utilización de materiales de origen natural en el tratamiento de agua en lugar del comercial. Sin embargo, la aplicación de coagulantes naturales en sí como tratamiento primario no es suficiente en muchas ocasiones debido las limitaciones que aún poseen (Espinosa y Zuluaga, 2018).

Las tecnologías emergentes y los estudios sobre su actividad coagulante han ayudado a que estas condiciones limitadas se reduzcan y puedan llegar a alcanzar el desempeño de los coagulantes químicos. Alternativamente los coagulantes de origen natural se pueden utilizar comúnmente como coagulantes junto con los compuestos químicos sintéticos, siendo un auxiliar en el proceso de coagulación (González, 2016).

El uso de la mezcla de coagulantes, también denominado el coagulante dual, puede reducir la dosis de producto químico, minimizando así el efecto toxicológico y ambiental. La sustitución de coagulante químico por material natural se puede aplicar para reducir el impacto negativo y simplificar el proceso (Kumar Neethu y Devi, 2017).

El coagulante compuesto es fabricado combinando dos tipos de coagulantes como un reactivo, premezclando el coagulante, a través de ciertas condiciones de trabajo. La operación con coagulante compuesto es más conveniente ya que abrevia la práctica del tratamiento y es eficaz desde una perspectiva financiera, además de disminuir el daño al ambiente (Nimesha *et al.*, 2022).

Por otra parte, también exhiben una buena estabilidad, mejor que el coagulante por sí mismo ya que el aumentar el tamaño molecular, se favorece la capacidad de agregación. Eso se supone que mejora la capacidad de formación de puentes entre los coagulantes coloidales de alto peso molecular se encuentran más eficazmente (Haydar y Aziz, 2009; Nimesha *et al.*, 2022), debido a una intrínseca relación entre las propiedades del flóculo bajo diversos mecanismos de coagulación. Es probable que el puente de polímero que ocurra cuando el polímero y la partícula en el interior tienen similares cargas, conduce a fortalecer los flóculos y el tamaño lo que mejora el rendimiento (Hemapriya *et al.*, 2015).

4.4 Impacto ambiental

Actualmente se sabe que la contaminación del agua resulta de todas las actividades humanas y ha tenido consecuencias graves que han causado millones de muertes cada año, sobre todo en países en desarrollo con mayor limitación a la tecnología

que permita su purificación, por lo tanto es necesario desarrollar y aplicar nuevos tratamientos elementales para la remediación del agua (Schweitzer y Noblet, 2018).

Los agentes coagulantes más usados son sales como sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ y de hierro, así como polímeros sintéticos (Wang *et al.*, 2002) y aunque estos productos químicos son bastante eficaces en la coagulación y floculación de las partículas que provocan la turbiedad, además de colorantes y sólidos en suspensión, sus costos de adquisición, cantidad disponible además del daño ambiental y en la salud no lo hacen una alternativa viable (Thakur y Choubey, 2014) y es lo que ha incitado a que se realicen investigaciones de otras alternativas más aceptables.

De acuerdo con las sugerencias del Comité de la Organización Mundial de la Salud en muchos países, en especial en los desarrollados, han eliminado los coagulantes sintéticos como las poliacrilamidas de las plantas de tratamiento de agua potable debido a sus características tóxicas (Bravo, 2017).

En contraste con los coagulantes químicos, los coagulantes naturales de origen vegetal son seguros, respetuosos del medio ambiente, más accesibles para los países menos desarrollados y con menores costos asociados tanto pre como post-tratamiento ya que se ha encontrado que los coagulantes naturales pueden generar no sólo un volumen mucho más pequeño de lodos de hasta cinco veces más bajos, sino también con un valor nutricional más alto de lodos sin riesgo de toxicidad (Bravo, 2017; Mohamed *et al.*, 2014), reduciendo la inversión por importación de coagulantes sintéticos, los cuáles muchas veces no son suficientes para satisfacer la cantidad demandada.

4.5 Análisis económico

Los coagulantes cumplen un rol de suma relevancia en el proceso de tratamiento de agua, por lo que su adquisición para la etapa de coagulación es un gasto importante. De acuerdo con datos de la SEMARNAT en el 2014 el volumen de descarga de origen industrial era de 211.40 m³/s mientras el volumen aproximado de agua anual depurada es de 3,380,678 m³ generándose aproximadamente 500

toneladas de lodo, lo que equivale a un volumen de 550 m³. El costo en 2012 de retirar y gestionar una tonelada de lodo era de 26.07 USD (SEMARNAT, 2015b).

En la tabla 4.1 se muestran los precios promedio calculados a partir de las ofertas mostradas en una página de comercio en línea de India (IndiaMART) para los distintos coagulantes expuestos anteriormente.

Tabla 4.1 Precios promedio actuales de los distintos coagulantes (IndiaMART, 2021).

Coagulante	Precio (USD/ kg)
<i>Moringa Oleifera</i>	5.39
<i>Strychnos potatorum</i>	0.94
<i>Opuntia ficus indica</i>	1.35
<i>Jatropha Curcas</i>	0.67
<i>Carica papaya</i> (semillas)	0.81
<i>Tamarindus indica</i> (semillas)	6.66
<i>Musa paradisiaca</i> (polvo)	1.33
Al ₂ (SO ₄) ₃	0.16
FeSO ₄	0.13
FeCl ₃	0.22

*Tipo de cambio al 2021, 1 USD= 21.48 MXN

Por lo que se puede observar, el costo actual de algunos de los coagulantes de origen natural es más costoso en contraste con el de los coagulantes convencionales; por otra parte, el precio de ciertos coagulantes como la Moringa es considerablemente más alto que el de los sintéticos. Aunque, también es importante considerar la inversión necesaria para gestionar los residuos que se producen en la etapa de coagulación y la cantidad de lodos, siendo ahí donde los coagulantes de origen natural presentan una gran ventaja frente a los otros, además de la dosis que es necesaria aplicar al efluente, donde suelen ser más bajas las dosis de los coagulantes naturales.

Bahrodin *et al.* (2021) menciona que en tan solo un plazo de 6 años, el precio de los coagulantes comerciales ha incrementado un 67%, lo que podría significar una disminución en cuanto a accesibilidad y rentabilidad en un futuro cercano.

Tabla 4.2 Dosis óptimas de los distintos coagulantes para remoción de turbiedad (<600 UNT) (Aguirre *et al.*, 2018; Amran *et al.*, 2021; Andía, 2000; Bodlund, 2013; Hernández *et al.*, 2013; Mokhtar *et al.*, 2019; Ramírez y Jaramillo Peralta, 2016).

Coagulante	Dosis (mg/L)
<i>Moringa oleifera</i>	60 – 70
<i>Strychnos potatorum</i>	15 – 25
<i>Opuntia ficus indica</i>	250
<i>Jatropha curcas</i>	80 – 90
<i>Carica papaya</i>	50 – 200
<i>Tamarindus indica</i>	60 – 100
<i>Musa paradisiaca</i>	50 – 100
Al ₂ (SO ₄) ₃	80 – 150
FeSO ₄	60 – 100
FeCl ₃	80

4.6 El papel de los coagulantes orgánicos en la Ingeniería Verde

4.6.1 La Ingeniería Verde

La Ingeniería Verde se refiere al diseño, uso y comercialización de procesos y productos que cumplen con ser económicamente viables a la vez que se minimiza la generación de contaminantes y el riesgo para la salud y el ambiente (Gómez, 2015). Está basada en doce principios que funcionan como una guía para adoptar la metodología en el diseño de un proceso o producto, estos se enlistan a continuación (Zimmerman y Mihelcic, 2012):

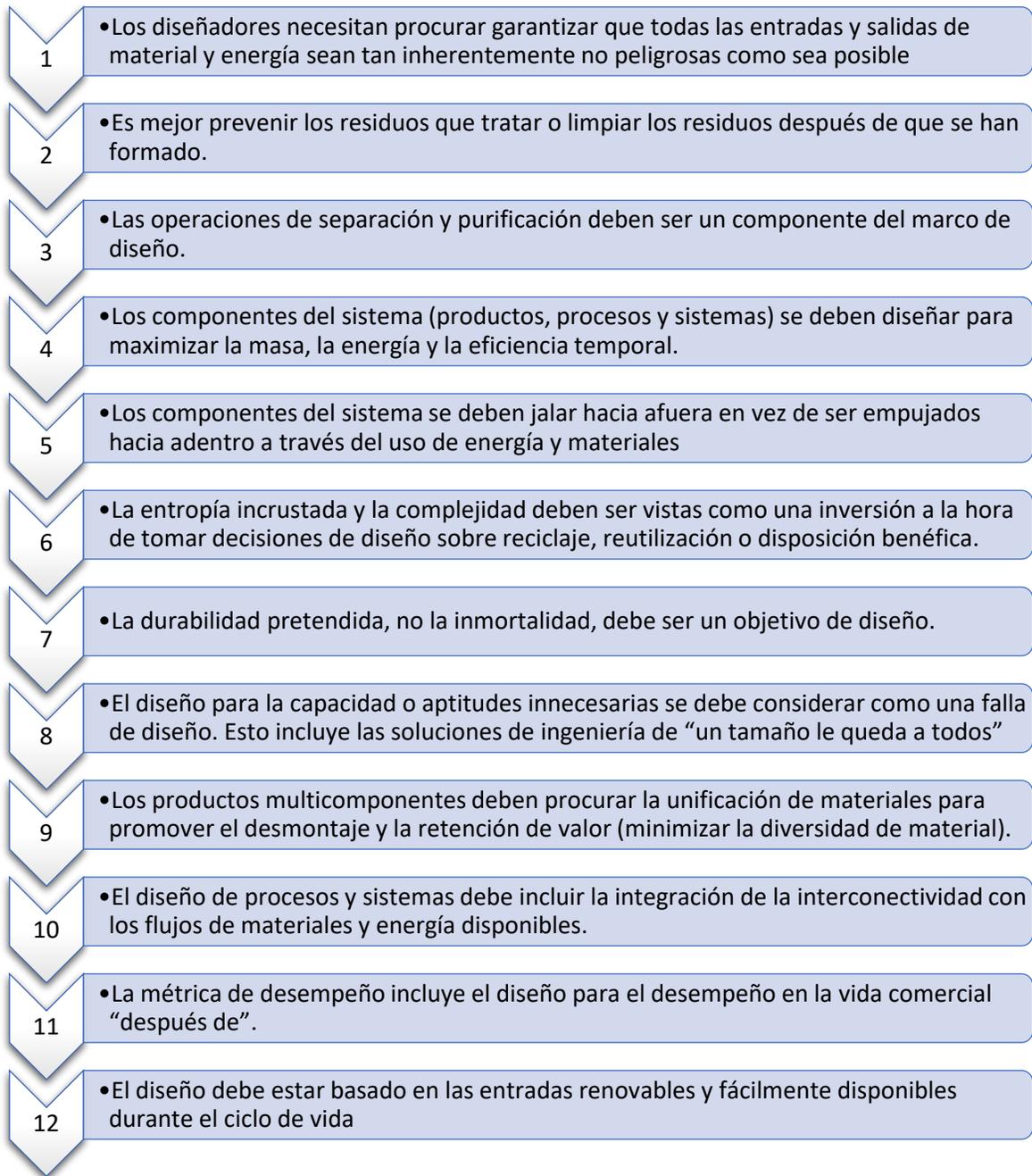


Figura 4.12 Principios de la Ingeniería Verde (Zimmerman y Mihelcic, 2012).

Estos principios proporcionan una base para el entendimiento de la Ingeniería Verde a través de técnicas que se pueden utilizar para hacer más sustentables las soluciones de ingeniería, por lo que deben considerarse no como reglas o leyes que no pueden romperse, sino como un conjunto de lineamientos que pueden considerarse en términos de criterios de diseño sustentable y que, si se siguen,

pueden guiar a avances útiles en términos de retos de sustentabilidad y diseño mejorado para un amplio rango de problemas de ingeniería (González, 2016).

Se puede decir que la Ingeniería Verde surgió como extensión de la Química Verde solo que con un alcance más amplio, siendo su principal objetivo aplicarse en la industria en general y en todas las fases de manejo de un producto de consumo (Gómez, 2015).

4.6.2 Los coagulantes de origen natural y la Ingeniería Verde

La purificación y remediación del agua sigue siendo un desafío gigantesco para los ingenieros, ya que aumenta continuamente la presión para proporcionar agua potable a los consumidores. Sin embargo, se debe tener cuidado para evitar productos químicos en el tratamiento, que podrían resultar tóxicos (Ortega, 2015). Una de las etapas de mayor peso en el tratamiento del agua para consumo humano es la clarificación mediante coagulación y floculación para eliminar partículas coloidales, proceso para el cuál suelen usarse sustancias denominadas coagulantes, los cuáles resultan ser muy eficientes para la remoción de contaminantes, pero representan un riesgo a la salud y al ambiente por sus propiedades tóxicas (López, 2018).

Recientemente se han desarrollado estrategias de uso eficiente del agua que cumplen con los principios de la Ingeniería Verde en el marco de producción más limpia buscando generar procesos más limpios y eficientes como también la disminución de los vertimientos producto de los procesos productivos en las compañías, generando ahorros económicos y minimizando el impacto ambiental. Entonces como alternativa para lograr la sostenibilidad del proceso de coagulación en el tratamiento de agua han surgido los coagulantes de origen natural, estos cumplen con ser eficientes al mismo tiempo que son amigables con la salud y el ambiente (Hemapriya *et al.*, 2015).

Capítulo 5. Casos de aplicación de los coagulantes naturales

Como se ha mencionado anteriormente el uso de coagulantes en el tratamiento de aguas residuales es un proceso antiguo, surge desde hace miles de años y se ha desarrollado a lo largo de los siglos hasta que se logró una aplicación sofisticada de los procesos de coagulación durante el siglo pasado, cuando el cloruro férrico y el sulfato de aluminio se utilizaban ampliamente como coagulantes en plantas de tratamiento de aguas residuales (Gautam y Saini, 2020). La historia del uso de coagulantes naturales es bastante larga, pero se sabe que los polímeros orgánicos naturales se han utilizado durante más de 2000 años en India, África y China como coagulantes efectivos y coagulantes en aguas de alta turbiedad, siendo bastante accesibles al poder fabricarse a partir de semillas, hojas y raíces de plantas (Asrafuzzaman *et al.*, 2011).

En la actualidad el agua es sin duda el elemento más vital entre los recursos naturales y en muchos países en desarrollo, el acceso a agua limpia y segura es un tema crucial. Anualmente más de seis millones de personas mueren a causa de la diarrea causada por el agua contaminada (Ramírez y Jaramillo Peralta, 2016).

Los países en desarrollo pagan un alto costo para importar productos químicos para el tratamiento del agua superficial, siendo los productos químicos comúnmente utilizados sustancias orgánicas e inorgánicas sintéticas que en la mayoría de los casos son costosas ya que se requieren en dosis más altas y no muestran rentabilidad, muchos de los productos químicos también están asociados con problemas ambientales y de salud humana por lo que el uso de coagulantes de origen natural surge como una opción viable (Thakur y Choubey, 2014). A continuación, se muestran algunas de las zonas donde se han llevado a cabo investigaciones enfocadas en el desarrollo de coagulantes naturales para el tratamiento de agua.

5.1 Aplicación de coagulantes naturales en México

En México existen especies vegetales que se sabe tienen sus orígenes en el país (*Guazuma ulmifolia*, *Phaseolus vulgaris*, *Zea mays*, *Malvaviscus arboreus*, *Opuntia ficus*) o bien, que están presentes extensamente en el territorio (*Manihot esculenta*, *Tamarindus indica*, *Pithecellobium saman*, *Hylocereus undatus*, *Heliocarpus popayanensis*) haciendo posible pensar que sería accesible y viable su uso para clarificación de agua en el proceso de tratamiento de aguas residuales, donde además de su bajo costo de operación, se reduciría el uso de agentes químicos y disminuiría el impacto ambiental de los mismos (López León *et al.*, 2017).

Morales *et al.* (2009), utilizaron semillas maceradas de *Moringa Oleifera* en solución para reducir la turbiedad en aguas residuales generadas en un rastro, con un porcentaje de remoción de 82% donde también determinó que el tiempo de contacto con coagulantes naturales era menor que con los metálicos.

Velasco *et al.* (2017) analizó la eficiencia de remoción de materia orgánica en agua residual municipal empleando almidón y quitosano por sí mismos y combinados con sulfato de aluminio, obteniendo una dosis óptima de 250 mg/l para el almidón y 360 mg/l para el quitosano. La eficiencia de remoción alcanzada de los coagulantes compuestos fue de 71% turbiedad y 40% DQO para el almidón y 86% turbidez y 46% DQO para el quitosano mientras que sin la sal metálica fue de 10% de remoción de turbiedad para ambos.

Ochoa (2021) empleó mucílago de nopal de poda para el tratamiento de agua proveniente de efluentes de diálisis y hemodiálisis, obteniendo resultados favorables en la remoción de turbiedad, donde el coagulante natural tuvo una eficiencia mayor que el de origen sintético con dosis similares de entre 10 y 30 mg/L.

Otros coagulantes que se han utilizado han sido a partir de cladodios de cactácea y de cáscara de manzana en muestras de agua sintética, siendo eficientes en el proceso de remoción de turbiedad del agua, logrando resultados superiores al 80% con dosis similares al emplear un coagulante metálico de uso comercial (Torres *et al.*, 2017).

En la siguiente tabla se muestran las eficiencias de las especies nativas y de amplia producción en el país que tienen potencial para ser utilizadas para la extracción de coagulantes.

Tabla 5.1 Porcentajes de eficiencia de distintos coagulantes accesibles para México (López León *et al.*, 2017).

Origen	Porcentaje de remoción (%)
<i>Guazuma ulmifolia</i>	50 – 70 de color inicial
<i>Manihot esculenta</i>	94 de remoción de color
<i>Zea mays</i>	89 de remoción de tintes
<i>Opuntia ficus</i>	48 – 91 remoción de turbiedad
<i>Tamarindus indica</i>	76 remoción de turbiedad

5.2 Aplicación de coagulantes naturales en Indonesia

Indonesia es un país tropical conocido por su gran variedad de recursos naturales con limitaciones al acceso a agua potable debido a los altos niveles de contaminación del agua por desechos domésticos, agropecuarios e industriales, lo que obliga a las personas de las zonas rurales a utilizar agua turbia y trae graves consecuencias a la salud, por lo que tomando en cuenta que la agricultura es uno de los principales sectores económicos de Indonesia y genera toneladas de residuos anualmente, los cuales contienen gran cantidad de polifenoles, por lo que se han realizado amplias investigaciones orientadas al uso de estos como coagulantes naturales para tratamiento de agua (Kardono, 2007; Kristianto, 2017).

Aproximadamente el 29% de 190 millones de hectáreas de la superficie terrestre del país es agrícola, además de que Indonesia también es conocida como uno de los productores más destacados de frutas tropicales de la Asociación de Naciones de Asia Sudoriental (ASEAN). Cada una de las especies de estos cultivos consisten en decenas y cientos de subespecies y variedades de las cuales varias pueden ser utilizadas como coagulante natural, y bastantes de ellas aún no han sido probadas (Kristianto, 2017).

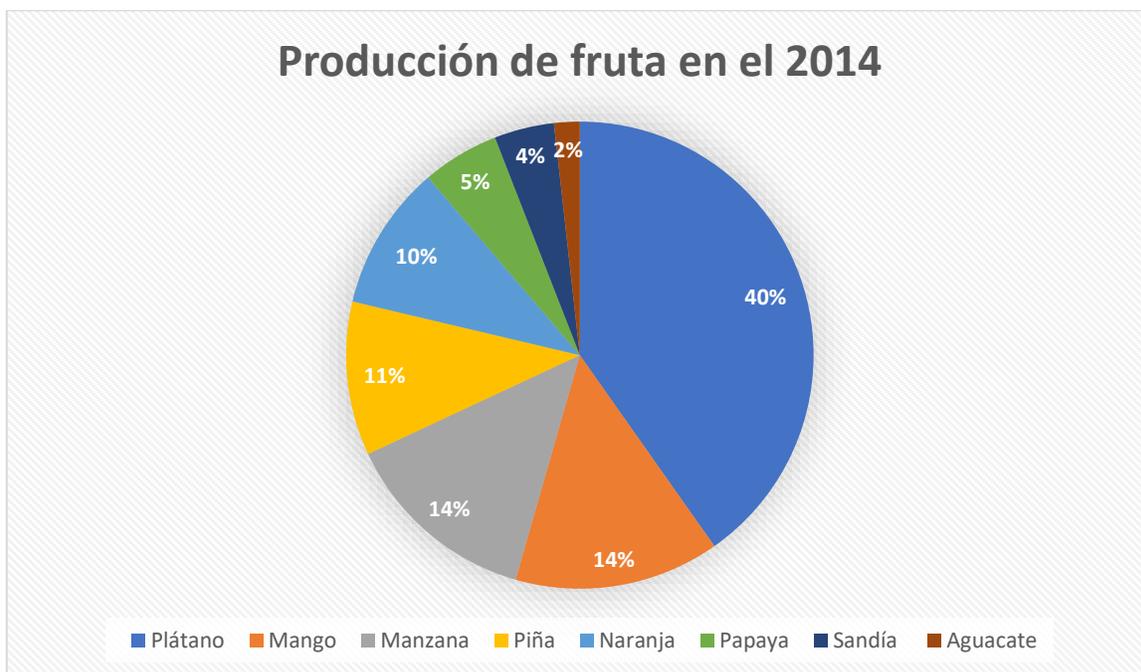


Figura 5.1 Producción de frutas en Indonesia en el 2014 (Kristianto, 2017).

La moringa es fácil de cultivar y es muy accesible en dicho país, por lo que es una alternativa para el tratamiento de agua. Hendrawati *et al.* (2016), hizo uso de ella para la clarificación de agua proveniente de una industria textil para la remoción de colorantes orgánicos, donde con una dosis de 100 mg/L fue posible alcanzar un 98.6% de eficiencia sin alterar la temperatura del agua ni el pH; de igual manera, presentó actividad antimicrobiana, reduciendo en un 80% los valores de *E. coli*. Por otra parte las semillas de moringa han demostrado ser capaces de sedimentar los elementos de metales pesados relativamente altos en el agua para alcanzar el estándar de agua potable (Sudarmin *et al.*, 2019).

Sudarmin *et al.* (2019) aplicó la moringa a muestras de agua de río contaminadas por efluentes de origen doméstico, con lo que encontró que 0.1 gramos de polvo de semilla de Moringa era ideal para purificar 1 litro de agua turbia.

Por otro lado, Prihatinningtyas (2019), empleó lentejas de agua en muestras sintéticas con distintos niveles de turbiedad donde se alcanzaron porcentajes de remoción de hasta 92% con lo que demostró ser eficiente como coagulante y la mayor influencia que tiene el pH en el proceso cuando la turbiedad inicial es baja.

Actualmente se necesitan más estudios de la aplicación a mayor escala, especialmente para obtener una alta eliminación de turbiedad, como se obtiene a escala de laboratorio. Además, la utilización de coagulantes a base de plantas debe considerarse cuidadosamente ya que algunos de los coagulantes potenciales (coadyuvantes de coagulación) pertenecen a la parte comestible de la planta mientras que Indonesia, especialmente en las zonas rurales, sigue teniendo un déficit de alimentos. También se sabe que el 40% de la población de Indonesia sufre de deficiencia de micronutrientes, lo que solo deja desechos de frutas y leguminosas no comestibles como posibles fuentes de coagulantes naturales (Mohamed *et al.*, 2014).

5.3 Aplicación de coagulantes naturales en Colombia

Colombia es un ejemplo latente de América Latina y el Caribe donde se demuestra que no es posible acceder al agua potable para comunidades marginales de escasos recursos económicos y, especialmente, la población rural. Estas poblaciones han tenido que sobrevivir consumiendo agua cruda, la cual contiene contaminantes diversos que deterioran la calidad de vida de sus habitantes, incluso ocasionándoles muertes, especialmente en la población infantil. Las principales causas que impiden el consumo masivo de agua potable son la falta de recursos económicos y el nivel de dificultad de la tecnología, deficiente para este tipo de comunidades (Ramírez y Jaramillo, 2003).

Rodiño-Arguello *et al.* (2015) tomó muestras del río Sinú donde utilizó *Guazuma ulmifolia* y *Moringa oleifera* para remover la turbiedad, obteniendo eficiencias de hasta el 98%. Por otra parte, en otro estudio se evaluó la efectividad coagulante del cactus *Opuntia ficus indica* y del alumbre en la potabilización del agua con muestras tomadas del río Magdalena en Gambote; después de aplicar pequeñas dosis del coagulante, los porcentajes de remoción de turbiedad oscilaron entre 99,80% y 93,25%, estipulando que la mayor remoción de la turbiedad se logró con el alumbre seguido por el coagulante del cactus (Olivero-Verbel *et al.*, 2013).

Tarón-Dunoyer *et al.* (2017), evaluó la utilización del polvo de la semilla de la *Cassia fistula* como coagulante natural en el tratamiento primario de aguas residuales

domésticas. El polvo de semilla de la *Cassia fistula* no afectó los valores de pH, pero si los de alcalinidad total y dureza total para una dosis óptima de 160 mg/L de coagulante; por encontrarse estos resultados en los rangos permitidos para aguas residuales no requirió de la adición de sustancias químicas para ajustar estos valores según lo establecido por la norma colombiana vigente para descarga de aguas residuales.

Con lo anterior, se evidencia la utilidad que tiene el emplear extractos de distintas plantas como coagulantes en el tratamiento del agua para consumo.

5.4 Aplicación de coagulantes naturales en Brasil

La industria de la construcción ha crecido significativamente en los últimos años en Brasil. En 2012, el sector de la construcción representó el 5.7% del producto interno bruto (PIB), manteniendo una tasa de crecimiento del 1.4%, superior a la tasa de crecimiento del PIB nacional (0.9%). Uno de los principales residuos de estas fábricas son las aguas residuales del proceso de producción de hormigón. Estas aguas residuales, producidas principalmente por el lavado de pisos y los camiones mezcladores, tienen una alta concentración de sólidos en suspensión, un pH alto, alta turbiedad y alta alcalinidad (Paula *et al.*, 2016). El sistema de tratamiento debe tener el menor impacto ambiental posible; por lo tanto, el uso de sistemas y técnicas de tratamiento natural, como *Moringa oleifera* como coagulante natural, es una alternativa que se debe considerar.

Moringa oleifera se ha utilizado como coagulante natural en el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales, tanto en la industria cementera como en el tratamiento de agua residual doméstica (Mejía, 2016).

Wolf *et al.* (2015) aplicaron taninos para tratar muestras provenientes de una industria láctea para su clarificación, donde con una dosis de 20 mg/L logró alcanzar valores mayores al 80% de remoción. Bortolatto *et al.* (n.d.), también utilizaron taninos para la reducción de la turbiedad y de color de un efluente proveniente de un matadero de cerdos, donde obtuvieron eficiencias de 72% y 95%, respectivamente.

5.5 Aplicación de coagulantes naturales en India

Se han utilizado como coagulantes naturales materiales de desecho o residuos de actividades agrícolas para no utilizar frutos útiles como alimento; sin embargo, la mayoría de estos coagulantes naturales se han probado en aguas residuales sintéticas. Maurya y Daverey (2018) realizaron un estudio cuyo objetivo es evaluar la actividad coagulante del polvo de cáscara de plátano, jugo de tallo de plátano, polvo de semilla de papaya y polvo de hoja de neem para el tratamiento de aguas residuales municipales.

De dicho estudio se llegó a la conclusión de que, en términos de actividad de coagulante, el polvo de cáscara de plátano es el más efectivo, mientras que el jugo de tallo de plátano tuvo una deficiente actividad de coagulación. Los resultados iniciales indican que la cáscara de plátano como coagulante natural tiene un enorme potencial para el tratamiento de aguas residuales (Maurya y Daverey, 2018).

En otro estudio realizado por Sanghi *et al.* (2006) para el tratamiento de aguas contaminadas por tintas de la industria textil con gomas de semillas *Ipomoea dasysperma* y goma guar de alto peso molecular como coagulantes, se definió que estos eran eficientes para remoción de color con valores entre 70- 75%.

Estos estudios son de gran interés ya que la industria textil en el subcontinente indio y el sudeste asiático es un sector muy grande, lo que representa una alta concentración de desechos provenientes de la industria textil, y convierte a las soluciones ecológicas en una necesidad.

Potencialmente, si el color pudiera eliminarse del efluente mediante coagulación/floculación, el agua residual podría reutilizarse varias veces, siendo biodegradable y segura para la salud humana (Sanghi *et al.*, 2006).

5.6 Aplicación de coagulantes naturales en Honduras

La degradación de las cuencas por fenómenos naturales y antropogénicos ha llevado a Honduras a un estado de alerta en la calidad de sus fuentes de agua en zonas donde procesos progresivos de deterioro elevan los niveles de turbiedad especialmente en época de lluvias, acarreando diferentes contaminantes y poniendo en riesgo la salud de sus habitantes, por lo que Honduras necesita aplicar métodos de tratamiento y desinfección eficientes, baratos y de fácil aplicación (Núñez, 2007).

Es por lo anterior que se propone la idea de *Moringa oleifera* como coagulante, siendo una especie de fácil acceso que se cultiva en distintas regiones del país. Tenorio *et al.* (2008) realizaron un estudio con muestras de agua del río Neteapa el cual abastece el casco urbano del municipio de Morocelí y con semillas de *Moringa oleifera* provenientes de la zona sur de Honduras. Los resultados obtenidos indicaron que en niveles bajos de turbiedad (0-166 UNT), la semilla de *Moringa oleifera* alcanza una eficiencia de hasta 52%, tendiendo a incrementar la turbiedad si es agregada en cantidades mayores de las requeridas. Esto se debe a la adición de materia orgánica al agua.

Por otra parte, el coagulante de la semilla puede alcanzar una eficiencia de hasta 98.32% en niveles altos de turbiedad (332-500 UNT) debido a la rápida activación del coagulante con las partículas coloidales en suspensión (Núñez, 2007). El $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ es el coagulante comercial más utilizado en las plantas de tratamientos de Honduras, y tiene una eficiencia de 98% en reducción de turbiedad para los niveles altos; con la semilla de *Moringa oleifera* como coagulante auxiliar (aplicada en un 10% de su dosis óptima) puede alcanzarse una eficiencia del 99% en los mismos rangos (Aguilar, 2002).

5.7 Aplicación de coagulantes naturales en Perú

En Lima se vierten 1,036,800 millones de m³ /día de aguas residuales produciendo una carga orgánica de 867,500 ton/año de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), seguido de Chimbote que vierte 14,688 m³ /día y 1,900 ton/año de DBO. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática, en el 2018 la industria textil generó una producción manufacturera del 10.8% que representó el 1.0% del PIB nacional; este sector genera una alta contaminación al ambiente, ya que en su sistema de producción utilizan grandes cantidades de agua dependientemente de los procesos y los equipos que utilizan. En el proceso de teñido con colorante se emplea de 100 a 150 de litros/kg de colorante y en la tinción de 125 a 170 litros/kg de producto (Terrel, 2019).

La *Moringa oleífera* en combinación con otros coagulantes metálicos dio como resultado la remoción de 95.60% de turbiedad en combinación con aluminio y un 98.32% la mezcla de *Moringa oleífera* con cloruro de sodio; estos resultados son prometedores, pero requiere mayor investigación.

Las semillas de *Moringa oleífera* han reflejado alta eficiencia en ensayos realizados con efluentes textiles; el método de prueba de jarras llegó a remover hasta un 82% de los contaminantes y en otros estudios la remoción de los colorantes artificiales y tintes superan el 90%; ésta es una alternativa potencial para el uso en el tratamiento de efluentes de origen textil y garantizar la calidad del agua para su reuso en el marco de la sostenibilidad y la gestión de los recursos hídricos (Núñez, 2007).

5.8 Aplicación de coagulantes naturales en China

Zhang *et al.* (2006) utilizó coagulante de cactus para tratar el agua extraída de una granja de agua residual de Wuhan, donde la turbiedad inicial del agua era 70 UNT y la dosis óptima de coagulación del cactus era de aproximadamente 50 mg/L, y la eficiencia de eliminación de la turbiedad alcanzó aproximadamente el 94%, por lo que el cactus podría considerarse una buena alternativa como coagulante.

El cactus también se utilizó para tratar el agua de mar de alta turbiedad tomada de una bahía en el sureste de China. La turbiedad inicial del agua de mar era 980 UNT, el pH fue 8.12 y la DQO de 5.40 mg/L. La calidad del agua de mar fue comparativamente buena (Zhang *et al.*, 2006).

De acuerdo con Jahn (2001), se han utilizado semillas de *Carica papaya*, *Feronia limonia*, *Mangifera indica*, *Persea americana*, semillas y vaina de polen de *Phoenix dactylifera*, *Prunus armeniaca*, *Tamarindus indica*, las cáscaras de *Citrus sinensis* y el follaje de *Hylocereus undatus* como coagulantes en China, donde los porcentajes de remoción de turbiedad han sido mayores al 80%.

5.9 Futuro de los coagulantes naturales

Los coagulantes naturales son conocidos por su eficacia para reducir la turbiedad. Para entender más acerca de ellos se han realizado amplios estudios cuyo fin es comprender mejor el mecanismo de coagulación involucrado en cada uno de los coagulantes de origen vegetal donde la agregación de partículas coloidales que conduce a la clarificación del agua podría ser el resultado de uno o más mecanismos de coagulación. Se han tenido limitaciones en la determinación del componente químico exacto responsable de inducir las aglomeraciones de partículas, siendo extremadamente difícil debido a la complejidad del proceso; sin embargo, se cree que es debido a las proteínas presentes en su estructura (Choy *et al.*, 2014).

Si bien los coagulantes de origen vegetal revisados podrían ser considerados como posibles alternativas a los coagulantes químicos, varias cuestiones, como la viabilidad y el abastecimiento de las plantas, pueden ser un desafío, al igual que su almacenamiento; como ciertas plantas y frutas son estacionales, la disponibilidad de estos coagulantes a base de plantas en todo el año podría causar incertidumbre; sin embargo, en países ricos en vegetación podrían considerarse varias alternativas a utilizar de acuerdo con su disponibilidad. Las partes de los coagulantes como el follaje y la vaina de polen también serían difíciles de recopilar para aplicaciones que requieran consumos masivos en tiempo real. Quizás, los coagulantes a base de plantas que están disponibles anualmente con actividades de coagulación

considerables pueden considerarse para aplicaciones a escala industrial en especial en países en desarrollo (Gautam y Saini, 2020; Nimesha *et al.*, 2022).

A pesar de que se ha estudiado el desempeño de los coagulantes naturales en las etapas primaria y secundaria del proceso de tratamiento de agua, se requiere mayor investigación en su aplicación en la etapa terciaria y en el proceso de desinfección. Por otra parte, se han demostrado los grandes beneficios que trae consigo el uso de dichos coagulantes en la salud y el ambiente; sin embargo, aún existen barreras técnicas, económicas y sociales que impiden su comercialización, habiendo actualmente un enorme esfuerzo por tratar de evitarlas a través de la modificación de los coagulantes y síntesis de coagulantes compuestos (Nimesha *et al.*, 2022).

Aún hay información limitada y pocos avances en el aspecto técnico y comercial de los coagulantes, por lo que se requiere mayor investigación y desarrollo en esa área, esperando llegar a hallazgos prometedores que apoyen su implementación en mayor proporción.

Capítulo 6. Discusión

El agua es un recurso indispensable para realizar las actividades diarias y para la evolución de la vida en el planeta. Con el crecimiento poblacional también se han incrementado los niveles de contaminación en los recursos hídricos, especialmente en países en desarrollo con carencias tecnológicas donde se tiene más dificultad en abastecer con suficiente agua potable a las comunidades, siendo eso lo que provoca que sus habitantes tengan que consumir agua de mala calidad cuyo impacto a la salud es muy grave y provoca miles de muertes anualmente.

Por otro lado, se ha determinado que a pesar de que el agua puede degradar su calidad por vías naturales, es mucho mayor la ocasionada por causas antropogénicas, donde los contaminantes que representan una mayor amenaza para la salud pública son las sustancias químicas y biológicas, cuya eliminación es más compleja. Para garantizar que el agua sea adecuada para consumo humano es importante procurar que los niveles de contaminantes se mantengan dentro de los límites permisibles establecidos en la normatividad de cada territorio.

Al investigar las zonas más contaminadas nacional e internacionalmente, se encontró que los ríos son los cuerpos de agua más afectados, principalmente por descargas industriales. En México, con el paso del tiempo, han ido disminuyendo los sitios que poseen recursos hídricos con excelente calidad, siendo la parte central del país donde se tienen mayores niveles de polución.

A pesar de que existe gran variedad de contaminantes que afectan la composición del agua, los coloides se consideran de suma relevancia ya que debido a su tamaño microscópico se dificulta su eliminación, por lo que la coagulación/floculación es imprescindible dentro del tratamiento, siendo su objetivo la desestabilización coloidal para la formación de un conglomerado que facilite su separación.

En el tratamiento de agua la etapa de coagulación/floculación es la más importante, ya que influye en la eficiencia de las posteriores, y si se realiza un proceso deficiente podría alterar la calidad del agua resultante e influir directamente en los costos además de ser perjudicial para la salud e incumplir con la normatividad establecida.

Los coagulantes que se encargan de la aglomeración de las partículas y la formación de los flóculos suelen ser de origen sintético, sin embargo, en años recientes se ha determinado que los residuos que dejan están asociados a enfermedades como el Alzheimer además de que, debido a la elevada demanda es complicado abastecer lo suficiente y por lo tanto no todos tienen acceso a los mismos. Es por ello que se buscan alternativas viables cuyo impacto en la salud y el ambiente sea menor, sin perder la eficiencia en la etapa de tratamiento, además de ser rentables y de fácil obtención; es así como surgen los coagulantes de origen natural los cuales poseen amplios beneficios para el cuidado del ambiente y mitigación del daño a la salud que pueden ocasionar los residuos tóxicos generados por los comerciales, contribuyendo a hacer de este proceso uno más seguro y ecológico. Con lo anterior se define que la implementación de los coagulantes de origen natural también aportaría a la Ingeniería Verde al hacer más sustentable la coagulación/floculación, minimizando los residuos sin perder la rentabilidad y eficiencia.

Otra diferencia entre los coagulantes naturales y los convencionales es el mecanismo a través del cual desestabilizan las partículas coloidales. Mientras las sales metálicas y polímeros sintéticos pueden presentar cuatro mecanismos diferentes que describen la interacción coloide-electrolito, los de origen natural suelen actuar sólo por adsorción y neutralización de cargas debido a la naturaleza de las proteínas contenidas en su estructura, cuya carga positiva es atraída por la carga negativa de las partículas contaminantes formando los flóculos que posteriormente precipitan.

Los coagulantes de origen vegetal se han utilizado desde la antigüedad para la clarificación de agua para consumo humano, y actualmente son los que más se han aplicado en aguas crudas y de efluentes industriales, especialmente en la reducción de la turbiedad donde han demostrado una alta eficiencia comparable con la de los de origen sintético. Es una alternativa viable debido a su fácil obtención y que pueden extraerse de residuos agrícolas que ya no son útiles para el consumo humano como alimento, por lo que se estará aprovechando un recurso que muchas

ocasiones solo se desecha y genera contaminación en el suelo y el crecimiento de microorganismos que generan enfermedades.

Además de poseer una eficiencia comparable a los coagulantes de origen comercial, los extraídos de plantas y vegetales necesitan dosis menores para reducir la turbiedad, por lo que serían más accesibles para los territorios donde se requiere la importación de los compuestos sintéticos que en muchas ocasiones no pueden satisfacer la demanda total debido a las grandes cantidades que se deben aplicar en el tratamiento de agua.

Aunque se tienen muchas ventajas respecto a los coagulantes sintéticos, existen limitaciones también, ya que hace falta implementar regulaciones a las normativas que los contemplen para su uso a nivel industrial, además de las deficiencias técnicas que aún se tienen para producirlos en mayor cantidad. Sin embargo, con el incremento de las investigaciones orientadas a su empleo como coagulantes en el proceso de coagulación/floculación se plantean como una opción viable en un futuro para sustituir a los convencionales, o bien funcionar como auxiliares en el tratamiento de agua, lo que disminuiría la cantidad necesaria de sustancias químicas sintéticas que se usan en la actualidad y por lo tanto su impacto negativo en los ecosistemas.

Otra desventaja de los coagulantes naturales es el aumento de carga orgánica en el efluente tratado, lo que en consecuencia aumentaría los niveles de DBO Y DQO, sin embargo, se ha encontrado que esto puede reducirse si se aplica un proceso de purificación adecuado, por lo que se sigue considerando una alternativa viable.

En los últimos años ha incrementado su uso en algunos países en vías de desarrollo, donde se ha seguido explorando fuentes animales y vegetales nuevas de donde se puedan extraer coagulantes eficientes y que estén disponibles independientemente de la época del año, ya que el almacenarlos no sería una buena alternativa teniendo en cuenta que con el paso del tiempo el coagulante podría entrar en descomposición y modificar su estructura y propiedades originales. También, otra opción podría ser el uso de coagulantes compuestos, donde la

mezcla de los naturales con los inorgánicos tendría un efecto favorable para retrasar la descomposición de este.

Aunque se siguen realizando investigaciones para la aplicación de estos compuestos naturales como coagulantes, gran parte de ellas ha sido enfocada en los más conocidos como *Moringa oleífera*, *Jatropha curcas* y *Opuntia ficus indica* lo que puede ser limitante en algunos lugares donde estas plantas no sean tan accesibles para su implementación, además de considerar que algunas también suelen utilizarse por sus propiedades medicinales, por lo que sería recomendable dar mayor prioridad a descubrir nuevas fuentes vegetales de acuerdo con las que estén disponibles localmente en cada región.

Además de probar con nuevos compuestos que puedan funcionar para el proceso de coagulación/floculación, sería útil emplear agua residual proveniente de efluentes de distintos orígenes y así medir la eficiencia que tienen los diversos compuestos naturales en contraste con las sales inorgánicas frente a contaminantes más complejos de eliminar, como lo puede ser el tratamiento de agua residual de una industria farmacéutica.

Capítulo 7. Conclusiones

Inicialmente se expusieron en un capítulo las principales fuentes de contaminación del agua considerando los parámetros fisicoquímicos más importantes en la determinación de su calidad, encontrándose que a pesar de que los cuerpos de agua pueden contaminarse por vías naturales es mucho mayor el daño ocasionado por el humano como resultado de la actividad industrial y doméstica. En general los contaminantes químicos y biológicos son los que representan una mayor amenaza a la salud y su tratamiento es más costoso, por lo que dependiendo del uso que se le vaya a dar al agua se define el tratamiento a seguir para el cumplimiento de la normatividad establecida en México. Más adelante, se identificaron las zonas a nivel nacional e internacional con recursos hídricos más afectados, definiendo que el centro y el norte del país son las regiones con mayor número de sitios con agua de calidad deficiente, mientras que de manera mundial usualmente están ubicadas en el hemisferio oriente, en comunidades de bajos recursos y sobrepobladas.

Posteriormente se investigó acerca del proceso de coagulación/floculación y los distintos mecanismos involucrados en la remoción de contaminantes dispersos en fuentes naturales de agua a través de una revisión de las publicaciones de los últimos 25 años para el reconocimiento de los factores con mayor influencia en la eficiencia del coagulante, con lo que se estableció que la coagulación/floculación es una etapa clave para el éxito de las posteriores operaciones unitarias como son la sedimentación, la filtración y la desinfección y que dentro de los parámetros que tienen mayor importancia se encuentran el pH, la temperatura, la agitación, el tiempo de mezclado y la dosis óptima, donde de acuerdo con la literatura, el pH se contempla como el factor de mayor impacto debido a que afecta la aglomeración de las partículas y si no se controla adecuadamente puede afectar la calidad del agua resultante. Por otra parte, se encontró que los mecanismos predominantes al emplear coagulantes naturales son por formación de puentes y adsorción y neutralización de cargas debido a la naturaleza de las proteínas y polisacáridos contenidos en las plantas.

Asimismo, se explicó la clasificación de los diferentes tipos de coagulantes tanto de origen natural como sintético contraponiendo sus distintas características para la mitigación de los efectos adversos a la salud y el ambiente, hallándose que los países en desarrollo tienen más posibilidades de extraerlos de plantas endémicas a bajo costo y utilizando dosis mucho menores en contraste con las aplicadas de los coagulantes comerciales, además de que los lodos son más amigables con el ambiente y los residuos generados que permanecen en el agua carecen de toxicidad, lo que los hace una opción segura que no daña el bienestar de los seres vivos.

En cuanto a la indagación sobre los beneficios y limitaciones de los coagulantes de origen natural enfatizando en su importancia y contribución a la Ingeniería Verde para su evaluación como una alternativa viable en el tratamiento de agua se puede comentar que una de las ventajas más llamativas es el poder utilizar lo que suele definirse como un residuo orgánico tal como las cáscaras o tallos de frutos y plantas para la extracción de sustancias útiles para la biorremediación, evitando hacer uso de solventes tóxicos y en su lugar aplicar procesos mecánicos y el uso de agua únicamente. De igual manera, en el ámbito económico pueden resultar más rentables a largo plazo.

Como resultado de mencionar los hallazgos más sobresalientes derivados de pruebas de coagulación-floculación sobre los coagulantes investigados previamente partiendo de investigaciones reportadas en distintos países se halló que la mayoría de las pruebas encontradas que se han realizado con los coagulantes de origen natural han sido a escala laboratorio debido a las limitaciones técnicas que aún se tienen, siendo la *Moringa oleífera* el que ha sido estudiado con mayor profundidad, contemplándose como una opción que ha dado resultados positivos y comparables en el tratamiento de agua a la eficiencia de remoción de contaminantes que se tiene con los materiales sintéticos en países en desarrollo como México, Perú, Colombia y Honduras, por lo que se plantea viable continuar con la búsqueda de nuevos coagulantes naturales, además de los que ya han sido explorados, que hagan posible expandir su uso en la clarificación de agua de diversos orígenes.

Referencias

- Abidin, Z. Z., Ismail, N., Yunus, R., Ahamad, I. S., Idris, A. (2011). A preliminary study on *Jatropha curcas* as coagulant in wastewater treatment. *Environ Technol.*, 32(9), 971–977. Tomado de <https://doi.org/10.1080/09593330.2010.521955> [Consultado el 6 de junio de 2021].
- Aguilar, M. (2002). Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación. España: Universidad de Murcia. 21-42.
- Aguirre, S. E., Piraneque, N. V., Cruz, R. K. (2018). Sustancias naturales: Alternativa para el tratamiento de agua del río Magdalena en Palermo, Colombia. *Inf. Tecnol.*, 29(3), 59–70. Tomado de <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000300059> [Consultado el 20 de mayo de 2021].
- Ahmed, I., Habib, U., Hai A., Khan, A. U. (2016). Analysis and treatment of tannery wastewater by using combined filtration and coagulation treatment process. *B. Life and Environ. Sci.*, 53(3), 179-183. Tomado de <https://ppaspk.org/index.php/PPAS-B/article/view/327> [Consultado el 12 de mayo de 2021].
- Alazaiza, M., Albahasawi, A., Ali, G., Bashir, M., Nassani, D., Al Maskari, T. (2022). Application of natural coagulants for pharmaceutical removal from water and wastewater: A review. *Water*, 14(2), 140.
- Alfayate, J. M., González, M. N., Orozco, C., Pérez Antonio. (2002). Contaminación ambiental. Una visión desde la química. Google Libros. Tomado de <https://books.google.es/books?id=nUoOx-8knyUC> 327 [Consultado el 10 de octubre de 2021].
- Aliaga, S. (2010). Aplicación del proceso Fenton y coagulación-floculación para la regeneración de aguas depuradas. Tesis de Química industrial. Escuela universitaria de ingeniería técnica industrial de Zaragoza. España. 30–40.
- Amran, A. H., Zaidi, N. S., Muda, K., Bahrodin, M. B., Loan liew W. (2021). Deshelled *Carica papaya* seeds as natural coagulant for improvement quality of river water. *Sains Malays.*, 50(6), 1521–1529. Tomado de <https://doi.org/10.17576/jsm-2021-5006-02> [Consultado el 12 de mayo de 2021].
- Amuda, O. S., Amoo, I. A. (2007). Coagulation/flocculation process and sludge conditioning in beverage industrial wastewater treatment. *J. Hazard Mater.*, 141(3), 778–783. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.044> [Consultado el 12 de mayo de 2021].
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación. Perú: Sedapal, 1–44. Tomado de http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154 [Consultado el 3 de octubre de 2021].
- Arias-Hoyos, A., Hernández-Medina, J. L., Castro-valencia, A. F., Sánchez-Peña, n. e. (2017). Tratamiento de aguas residuales de una central de sacrificio: uso del polvo de la semilla de la *M. oleífera* como coagulante natural, *Rev. Bio. Agro*, 15(SPE), 29–39. Tomado de <https://doi.org/10.18684/BSAA> [Consultado el 13 de mayo de 2021].
- Asrafuzzaman, M., Fakhrudin, A. N. M., Hossain, M. A. (2011). Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants. *ISRN Microbiol.*, 1–6. Tomado de

<https://doi.org/10.5402/2011/632189> [Consultado el 3 de octubre de 2021].

- Ayangunna, R. R., Giwa, S. O., Giwa, A. (2016). Coagulation-flocculation treatment of industrial wastewater using tamarind seed powder. *Int. J. Chemtech Res.*, 9(5), 771–780.
- Azuero, A., Jaramillo-Jaramillo, C., San Martin, D., D'Armas, H. (2016). Análisis del efecto antimicrobiano de doce plantas medicinales de uso ancestral en Ecuador. *Cienc. Unemi.*, 9(20), 11–18. Tomado de <http://ojs.unemi.edu.ec/index.php/cienciaunemi/article/view/342> [Consultado el 3 de octubre de 2021].
- Bagul, M. B., Sonawane, S. K., Arya, S. S. (2018). Bioactive characteristics and optimization of tamarind seed protein hydrolysate for antioxidant-rich food formulations. *Biotech.*, 8(4), 218. Tomado de <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1240-0> [Consultado el 30 de noviembre de 2021].
- Bahrodin, M., Zaidi, N., Hussein, N., Sillanpää, M., Prasetyo, D., Syafiuddin, A. (2021). Recent advances on coagulation-based treatment of wastewater: transition from chemical to natural coagulant. *Curr. Pollution Rep.*, 7, 379–391. Tomado de <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00191-7> [Consultado el 28 de noviembre de 2021].
- Banchón, C., Baquerizo, R., Muñoz, D., Zambrano, L. (2016). Coagulación natural para la descontaminación de efluentes industriales. *Enfoque UTE*, 7(4), 111–126. Tomado de <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n4.118> [Consultado el 28 de noviembre de 2021].
- Babarao, T.D., Verma, S. (2015). Coal Washery Waste Water Treatment using Natural Coagulants and Chemical Precipitation. *Int. J. Sci. Res.*, 6 (14), 1877-1881.
- Betancur C., B., Jiménez G., D.M., y Linares, B.G. (2012). Potencial zeta (zeta) como criterio de optimización de dosificación de coagulante en planta de tratamiento de agua potable. *DYNA*, 79(175), 166–172.
- Bodlund, I. (2013). Coagulant protein from plant materials : Potential water treatment agent. Instituto Real de Tecnología. Estocolmo. 8-20. Tomado de <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:575557/FULLTEXT01.pdf> [Consultado el 12 de noviembre de 2021].
- Bortolatto R., Lenhard D. C., Genena A. K. (2016). Treatment of low COD wastewater from slaughterhouse with natural coagulant based on tannins. *Int. Tech. Symposium*, 1-6.
- Bosch, J. R. (1999). La calidad de las aguas. *Revista de Obras Publicas, España*, 146(3388), 103–104.
- Bravo, M. A. (2017). Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales. Tesis de Química. Facultad de Ciencias y educación. Colombia. 25-80. Tomado de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5609/1/BravoGallardoMonicaAlejandra2017.pdf> [Consultado el 4 de julio de 2021].
- Brenes, R., Rojas, L. F. (2005). El agua: sus propiedades y su importancia biológica. *Acta Académica*, 37, 167–196. Tomado de <http://revista.uaca.ac.cr/index.php/actas/article/view/407> [Consultado el 15 de mayo de 2021].
- Caldera, Y., Laguna Granadillo, K. W., Millán Laguna, E. D. J. (2020). Eficiencia del

- coagulante *Opuntia ficus indica* en aguas con alta turbidez y pH básico. *Rev. de Ing. Invención*, 1(1), 11–26. Tomado de <https://doi.org/10.33996/rini.v1i1.93> 407 [Consultado el 15 de mayo de 2021].
- Carpinteyro-Urban, S., Mier, M., Torres, L. (2012). Can vegetal biopolymers work as coagulant-flocculant aids in the treatment of high-load cosmetic industrial wastewaters?. *Wat. air and soil poll.*, 223, 4925-4936. Tomado de <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1247-9> [Consultado el 8 de mayo de 2021].
- Chambi-Hancco, Z. (2018). Tratamiento de aguas residuales de lavanderías por el proceso de coagulación-floculación y adsorción. Tesis de Ingeniería Química. Universidad Nacional del Altiplano. Perú. 16-30.
- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E., Ramanan, R. N. (2014). Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Res. J. Environ. Sci.*, 26(11), 2178–2189. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.024> [Consultado el 8 de agosto de 2021].
- Chulluncuy, C. N. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, 29, 153–224. Tomado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/MANUALI/TOMOII/seis.pdf%5Cnhttp://cdam.minam.gob.pe:8080/bitstream/123456789/109/5/CDAM0000012-5.pdf> [Consultado el 11 de agosto de 2021].
- Cohen, R. (2009). Global issues for breakfast : the banana industry and its problems. *SCQ, Cohen Mix*, 1–4. Tomado de <https://www.scq.ubc.ca/global-issues-for-breakfast-the-banana-industry-and-its-problems-faq-cohen-mix/> [Consultado el 24 de agosto de 2021].
- De Souza, M. T. F., Ambrosio, E., De Almeida, C. A., De Souza Freitas, T. K. F., Santos, L. B., De Cinque Almeida, V., Garcia, J. C. (2014). The use of a natural coagulant (*Opuntia ficus-indica*) in the removal for organic materials of textile effluents. *Environ. Monit. Assess.*, 186(8), 5261–5271. Tomado de <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3775> [Consultado el 9 de octubre de 2021].
- Delgado, E. S. P. (2016). Eficiencia del coagulante natural a partir de la semilla de *Jatropha curcas* para aguas crudas evaluando variables fisicoquímicas del agua. Tesis de Ingeniería ambiental. Universidad de Cundinamarca-seccional giradot. Colombia. 27-42.
- Deshmukh, B. S., Pimpalkar, S. N., Rakhunde, R. M., Joshi, V. (2013). Evaluation performance of natural *strychnos potatorum* over the synthetic coagulant alum, for the treatment of turbid water, *Int. J. Innov.*, 2(11), 6183–6189.
- Domínguez Gual, M. (2022). La contaminación ambiental, un tema con compromiso social. *Rev. P+L*. 10(1), 9-21. Tomado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S190904552015000100001 [Consultado el 20 de abril de 2021].
- Effen, M. A. (2010). Health risks caused by mining pollution and their impact on children., *sciELO, EPA*, 1–21. Tomado de <File:///C:/SciELO/Serial/Rbcst/V12n27/Body/V12n27a05.Htm> [Consultado el 22 de octubre de 2021].
- Effendi, H., Hariyadi, S. (2017). *Tamarindus indica* seed as natural coagulant for traditional gold mining wastewater treatment. Department of Aquatic Resources Management,.

35(3), 330–333. Tomado de <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2017.330.333> [Consultado el 30 de noviembre de 2021].

- Emilia, J., Ss, C., Anantharaj, R., Ambedkar, B., Dhanalakshmi, J., June, M., June, M. (2017). Treatment of synthetic turbid water using natural tamarind seeds at atmospheric conditions. *Res. J. Pharm., Biol. Chem.*, 2017(352), 352–359.
- Espinosa, R., Zuluaga, S. (2018). Evaluación de la capacidad de dos coagulantes naturales para la remoción de cargas contaminantes en el efluente final de la empresa textil Inruuzz S.A.S con respecto al coagulante comercial sulfato de aluminio. Universidad El Bosque. Colombia. Tomado de <https://repositorio.unbosque.edu.co/handle/20.500.12495/3319> [Consultado el 8 de julio de 2021].
- Evenson, C. (2021). The top 5 most polluted waters in the world — RTD. Canadá. Documentary channel. Tomado de <https://rtd.rt.com/stories/the-top-5-most-polluted/> [Consultado el 10 de julio de 2021].
- Fernández, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, 11(3), 147–170.
- Fu, Y., Meng, X. J., Lu, N. N., Jian, H. L., Di, Y. (2019). Characteristics changes in banana peel coagulant during storage process. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 16(12), 7747–7756. Tomado de <https://doi.org/10.1007/s13762-018-02188-0> [Consultado el 18 de octubre de 2021].
- Fuentes Molina, N., Molina Rodríguez, E. J., Ariza, C. P. (2016). Coagulantes naturales en sistemas de flujo continuo, como sustituto del $Al_2(SO_4)_3$ para clarificación de aguas. *Rev. P+L*, 11(2), 41–54. Tomado de <https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a4> [Consultado el 24 de agosto de 2021].
- Fúquene, D. M., Yate, A. V. (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Ecapma*, 1(1), 1–7. Tomado de <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/workpaper/article/view/2771/2857> [Consultado el 2 de agosto de 2021].
- Gaikwad, V. T., Munavalli, G. R. (2019). Turbidity removal by conventional and ballasted coagulation with natural coagulants. *Appl. Water Sci.*, 9(5), 1–9. Tomado de <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1009-6> [Consultado el 13 de diciembre de 2021].
- García-Mata, R., González-Machorro, M. F., García-Sánchez, R. C., Mora-Flores, J. S., González-Estrada, A., Martínez-Damian, M. Á. (2013). El mercado del plátano (*Musa paradisiaca*) en México, 1971-2017. *Agrociencia*, 47(4), 399–410. Tomado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952013000400008&lng=es&nrm=iso&tlng=es [Consultado el 24 de agosto de 2021].
- García, B. (2007). Metodología de extracción *in situ* de coagulantes naturales para la clarificación de agua superficial. Tesis de master en seguridad industrial y medioambiente, Universidad Politécnica de Valencia. España. 11-15. Tomado de http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12458/TesisdeMaster_BEATRIZGARCIA_FAYOS.pdf?sequence=1 [Consultado el 3 de agosto de 2021].
- Gautam, S., Saini, G. (2020). Use of natural coagulants for industrial wastewater treatment. *Glob. J. Environ. Sci.*, 6(4), 553–578. Tomado de <https://doi.org/10.22034/gjesm.2020.04.10> [Consultado el 14 de noviembre de 2021].

- Gómez, J. (2015). Ingeniería Verde: Doce principios para la Sostenibilidad. Ingeniería Química, 175(458), 168–175.
- Gómez, N. (2005). Remoción de materia orgánica por coagulación-floculación. Tesis de Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. 24–31.
- González, M. (2016). Tratamiento del agua. España. Enexio. Tomado de <https://www.tratamientodelagua.com.mx/coagulantes-para-tratamiento-de-agua/> [Consultado el 9 de julio de 2021].
- Guzmán, L., Villabona, A., Tejada, C., García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: Una revisión. Rev. U.D.C.A., 16(1), 252-262.
- Haydar, S., Aziz, J. A. (2009). Coagulation – flocculation studies of tannery wastewater using combination of alum with cationic and anionic polymers. J Hazard Mater., 168(2-3), 1035–1040. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.140> [Consultado el 2 de diciembre de 2021].
- Hemapriya, G., District, P., Nadu, T., District, P., Nadu, T. (2015). Textile effluent treatment using *Moringa oleifera*. Int. J. Innov. Res, 4(4), 385–390.
- Hendrawati, Y. I. R., Rohaeti, E., Effendi, H., Darusman, L. K. (2016). The use of *Moringa oleifera* seed powder as coagulant to improve the quality of wastewater and ground water. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 31, 1-10. Tomado de <https://doi.org/10.1088/1755-1315/31/1/012033> [Consultado el 13 de diciembre de 2021].
- Hernández, B., Mendoza, I., Salamanca, M., Fuentes, L., Caldera, Y. (2013). Semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante en aguas con alta turbiedad., Rev. Cienc. Nat. Agrop., 3(1), 91-96.
- Izquierdo Flores, A. M., García, F. (2015). Determinación de la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio aplicado en la planta de tratamiento de agua de la central termoeléctrica “El Descanso”. Tesis de Ingeniería ambiental. Universidad de Cuenca, Ecuador. 30-53.
- Jahn, S. (2001). Drinking water from Chinese rivers: challenges of clarification. J. Water Supply: Res. Technol. - AQUA, 50(1), 15-27. Tomado de <https://doi.org/10.2166/aqua.2001.0002> [Consultado el 22 de septiembre de 2021].
- Kardono. (2007). Condition of Water Resource in Indonesia and. *Jai*, 3(2), 111–119.
- Kristianto, H. (2017). The potency of Indonesia native plants as natural coagulant: a mini review. Water Conserv. Sci. Eng., 2(2), 51–60. Tomado de <https://doi.org/10.1007/s41101-017-0024-4> [Consultado el 14 de julio de 2021].
- Kumar Neethu S, Devi, S. P. (2017). The surprising health benefits of papaya seeds: A review. J.Pharmacogn.Phytochem., 6(1), 424–429. Tomado de <https://www.researchgate.net/publication/327745162> [Consultado el 21 de octubre de 2021].
- Larios, E. (2007). Estudio electrocinético de la líquidos y sólidos mediante técnicas de impedancia y modulación de la capacitancia. Tesis de maestría en Electroquímica. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica. México. 24–30.
- Lasteros Patilla, I. (2017). Revisión sistemática de la aplicación de coagulantes naturales de origen vegetal en el tratamiento de aguas residuales industriales. Tesis de

- Ingeniería ambiental. Universidad Andina del Cusco. Perú. 5-24. Tomado de http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Consultado el 3 de noviembre de 2021].
- Lee, C., Robinson, J., Chong, M. (2014). A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Saf. Environ. Prot.*, 92(6), 489-508. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.04.010> [Consultado el 6 de abril de 2022].
- Leone, A., Spada, A., Battezzati, A., Schiraldi, A., Aristil, J., Bertoli, S. (2015). Cultivation, genetic, ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology of *Moringa oleifera* leaves: An overview. *Int. J. Mol. Sci.*, 16(6), 12791–12835. Tomado de <https://doi.org/10.3390/ijms160612791> [Consultado el 20 de junio de 2021].
- López León, S., Matias Cervantes, C., Matías-Pérez, D. (2017). Vegetable coagulants as alternative for treatment of wastewater in Mexico. *J. Negat. No Posit. Results*, 2(12), 687–694. Tomado de <https://doi.org/10.19230/jonnpr.1650> [Consultado el 28 de junio de 2021].
- López, M. (2018). Evaluación del uso de la cactácea *Opuntia ficus-indica* como coagulante natural para el tratamiento de aguas. Tesis de Ingeniería ambiental. Universidad Nacional Agraria. Perú. 3-29. Tomado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3541> [Consultado el 13 de octubre de 2021].
- Machorro, J. C. (2020). México vigilará la contaminación de los ríos en tiempo real. España. EFE:Verde.Tomado de <https://www.efeverde.com/noticias/mexico-desarrolla-plan-vigilancia-la-contaminacion-los-rios-tiempo-real/> [Consultado el 22 de julio de 2021].
- Martín, C., Martín, G., García, A., Fernández, T., Hernández, E. (2018). Potenciales aplicaciones de *Moringa oleifera*. Una revisión crítica. *Pastos y Forraje*, 36(2), 137–149.
- Mascarós, J. (2013). Tratamiento físico-químico y Jar-Test. Trabajo de Master en Ingeniería hidráulica y medio ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España. 1–101.
- Maurya, S., y Daverey, A. (2018). Evaluation of plant-based natural coagulants for municipal wastewater treatment. *Biotech*, 8(1), 77. Tomado de <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1103-8> [Consultado el 9 de diciembre de 2021].
- Mejía, P. W. (2016). Uso de la *Moringa oleifera* Lam (Moringaceae) como coagulante natural para el tratamiento primario de aguas residuales domésticas. Tesis de Ingeniería ambiental. Universidad César Vallejo. Perú. Tomado de <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3225922> [Consultado el 15 de diciembre de 2021].
- Mohamed, R., Rahman, A., Kassim, M. (2014). *Moringa oleifera* and *Strychnos potatorum* seeds as natural coagulant compared with synthetic common coagulants in treating car wash wastewater: Case study 1. *Asian J. Appl. Sci.*, 02(05), 2321–0893. Tomado de www.ajournalonline.com [Consultado el 27 de septiembre de 2021].
- Mokhtar, N. M., Priyatharishini, M., Kristanti, R. A. (2019). Study on the effectiveness of banana peel coagulant in turbidity reduction of synthetic wastewater, *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, 6(1), 82-90. Tomado de <https://doi.org/10.15282/ijets.v6i1.2109> [Consultado el 4 de septiembre de 2021].
- Morales, F.D.; Méndez N., R., Tamayo D., M. (2009). Tratamiento de aguas residuales de

- rastros mediante semillas de *Moringa oleifera* Lam como coagulante. Trop. Subtrop. Agroecosystems, 10(3), 523-529. Tomado de <https://www.redalyc.org/pdf/939/93912996021.pdf> 2109 [Consultado el 2 de octubre de 2021].
- Mountain Empire Community College (2010). Colloids and coagulation. Water and wastewater distance learning. Estados Unidos. Tomado de <https://water.me.vccs.edu/courses/env211/lesson9.htm> [Consultado el 4 de junio de 2021].
- Nimesha, S., Hewawasam, C., Jayasanka, D. J., Murakami, Y., Araki, N., Maharjan, N. (2022). Effectiveness of natural coagulants in water and wastewater treatment. Global J. Environ. Sci. Manage, 8(1), 101–116. Tomado de <https://doi.org/10.22034/gjesm.2022.01.08> [Consultado el 12 de diciembre de 2021].
- NOM-001-SEMARNAT-2021.(2022). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México.
- Núñez, E. (2007). Validación de la efectividad de la semilla de *Moringa oleifera* como coagulante natural del agua, destinada al consumo humano, Morocelí, Honduras. Tesis de Ingeniería en desarrollo socioeconómico y ambiente. Universidad Zamorano. Honduras. 5-10. Tomado de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/522/1/IAD-2007-T013.pdf> [Consultado el 16 de agosto de 2021].
- Nwanisobi, G. (2018). Treatment of refinery and petrochemical wastewater using banana peel as a natural coagulant. Organic & Medicinal Chem IJ., 7(5), 8–10. Tomado de <https://doi.org/10.19080/OMCIJ.2018.07.555725> [Consultado el 1 de noviembre de 2021].
- Ochoa, G. (2021). Uso del mucílago de nopal como una alternativa para el tratamiento del agua residual proveniente de la hemodiálisis y diálisis. Tesis de maestría en Ingeniería ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 30-56.
- Ojeda, L. (2012). Determinación de la eficiencia de las características coagulantes y floculantes del *Tropaeolum tuberosum*, en el tratamiento del agua cruda de la planta de puengasí de la Epmaps. Tesis de Ingeniería en biotecnología de recursos naturales. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador. 1–100. Tomado de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf> [Consultado el 8 de octubre de 2021].
- Olivero-Verbel, R. E., Mercado-Martínez, I. D., Montes-Gazabón, L. E. (2013). Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus-indica*. Rev. P+L, 8(1), 19–27.
- Olortegui, F. (2020). Determinación de la velocidad óptima de sedimentación de flóculos formados con coagulante sulfato de aluminio tipo “A” de la planta de tratamiento de agua potable, Moyobamba. Tesis de Ingeniería sanitaria. Universidad Nacional de San Martín. Perú. 1–82.
- Ortega, L. (2015). La hidrosfera: contaminación. CTMA. Tema 5. 1–13. Tomado de http://roble.pntic.mec.es/lorg0006/dept_biologia/archivos_texto/ctma_t5_hidrosfera_contaminacion.pdf [Consultado el 19 de octubre de 2021].
- Owa, F. W. (2014). Water pollution: sources, effects, control and management. Int. Lett.

- Nat. Sci., 8, 1–6. Tomado de <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/ILNS.8.1> [Consultado el 5 de julio de 2021].
- Paula, H. M., Ilha, M. S. de O., Andrade, L. S. (2016). Coagulantes químicos e o extrato de semente de *Moringa oleifera* para o tratamento da água residuária de concreto. *Sci. Technol.*, 38(1), 57–64. Tomado de <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v38i1.25699> [Consultado el 9 de octubre de 2021].
- Peyravi, M., Jahanshahi, M., Tourani, H. (2020). Analytical methods of water pollutants detection. *Inorganic pollutants in water*. Elsevier. 97-103. Tomado de <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818965-8.00006-8> [Consultado el 17 de agosto de 2021].
- Prihatinningtyas, E. (2019). Removal of turbidity in water treatment using natural coagulant from *Lemna perpusilla*. *IOP Conference Series: Environ. Earth Sci.*, 308(1), 1-6.
- Raju, T. D., Reji, A. K., Rheem, N., Sasikumar, S., Vikraman, V., Shimil, C. P., Sneha, K. M. (2018). Role of *Moringa oleifera* and tamarind seed in water treatment. *Int. J. Eng. Res.*, 7(4), 454–462.
- Ramírez, A. H., Jaramillo Peralta, J. (2016). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), 136. Tomado de <https://doi.org/10.18359/rfcb.1303> [Consultado el 19 de julio de 2021].
- Ríos, A. (2014). *Musa paradisiaca*. Banco de imágenes de CONABIO. Gobierno de México. Tomado de [http://bdi.conabio.gob.mx/fotoweb/archives/5023-Plantas/Plantas/ARS00580/Musa paradisiaca.jpg.info](http://bdi.conabio.gob.mx/fotoweb/archives/5023-Plantas/Plantas/ARS00580/Musa%20paradisiaca.jpg.info) [Consultado el 23 de noviembre de 2021].
- Rodiño-Arguello, J. P., Feria-Díaz, J. J., de Jesús Paternina-Urbe, R., Marrugo-Negrete, J. L. (2015). Sinú River raw water treatment by natural coagulants. *Revista Facultad de Ingeniería*, 2015(76), 90–98. Tomado de <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n76a11> [Consultado el 1 de diciembre de 2021].
- Samboni, R. N. E., Carvajal, E. Y., Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Rev. Ing. Inv.*, 27(3), 172–181. Tomado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S01205609200700030009 [Consultado el 19 de junio de 2021].
- Sánchez, V. (2016). Agua contaminada, una amenaza latente en México. México, CienciaMX. Tomado de <http://www.cienciamx.com/index.php/ciencia/ambiente/11179-agua-contaminada-una-amenaza-latente-en-mexico> [Consultado el 4 de julio de 2021].
- Sanghi, R., Bhattacharya, B., Dixit, A., Singh, V. (2006). *Ipomoea dasysperma* seed gum: An effective natural coagulant for the decolorization of textile dye solutions. *J. Environ. Manage*, 81(1), 36–41. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.015> [Consultado el 30 de octubre de 2021].
- Santillán, M. (2013). Beneficios nutritivos y medicinales de la Moringa. México, Ciencia UNAM. Tomado de http://ciencia.unam.mx/leer/261/Beneficios_nutritivos_y_medicinales_de_la_moringa [Consultado el 12 de agosto de 2021].

- Schweitzer, L., Noblet, J. (2018). Water contamination and pollution. *Green Chem.: An Inclusive Approach*, 261–290. Tomado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00011-X> [Consultado el 12 de agosto de 2021].
- SEMARNAT. (2015a). Informe de la situación del medio ambiente en México. Gobierno de México. México. 363–429. Tomado de <https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe15/index.html> [Consultado el 17 de julio de 2021].
- SEMARNAT. (2015b). Volumen de descarga de aguas residuales industriales y municipales. Gobierno de México. México. 20-23. Tomado de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2017/archivos/01_agua/D3_A_GUA07_10.pdf [Consultado el 17 de julio de 2021].
- Shak, K. P. Y., Wu, T. Y. (2014). Coagulation-flocculation treatment of high-strength agro-industrial wastewater using natural *Cassia obtusifolia* seed gum: Treatment efficiencies and flocs characterization. *Chem. Eng. J.*, 256, 293–305. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.093> [Consultado el 22 de agosto de 2021].
- Silva, C. D. D. da, Quispe, D. C., Quispe, Y. C., Pacheco, B. S. R., Reynoso, A. M. S., Puma, L. M. Z., Samanez, C. A. L., Pardo, F. T., Flórez, M. C., Puma, M. M. Z., Lanado, J. F. A., Quispe, Y. Q. (2021). Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. *Tecnol. Quím.*, 38(2), 70–82. Tomado de <https://doi.org/10.22533/at.ed.5672127015> [Consultado el 11 de octubre de 2021].
- Singh, R. M., Gupta, A. (2017). Water pollution-sources , effects and control. *Centro de biodiversidad, India*, 5(3), 1–17.
- Soto Bubern, A. (2007). Coagulación y floculación de contaminantes del agua. *Rev. VirtualPRO*, 1–24. Tomado de <https://www.biblioteca digital de bogota.gov.co/resources/2205324/> [Consultado el 22 de octubre de 2021].
- Suárez, S., Lema, J. M., Omil, F. (2009). Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation–flocculation and flotation. *Bioresour. Technol.*, 100(7), 2138–2146. Tomado de <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2008.11.015> [Consultado el 22 de agosto de 2021].
- Sudarmin, S., Kurniawan, C. (2019). The implementation of chemical project learning model integrated with ethno-stem approach on water treatment topic using kelor (*Moringa oleifera*) seed extract as bio-coagulant. *KnE Soc. Sci.*, 492-501. Tomado de <https://doi.org/10.18502/KSS.V3I18.4740> [Consultado el 22 de agosto de 2021].
- Tarón-Dunoyer, A., Guzmán-Carrillo, L., Barros-Portnoy, I. (2017). Evaluación de la *Cassia fistula* como coagulante natural en el tratamiento primario de aguas residuales. *Orinoquia*, 21(1), 73. Tomado de <https://doi.org/10.22579/20112629.396> [Consultado el 11 de noviembre de 2021].
- Tenorio, E., Núñez, E., Guzmán, R., Pineda, M. (2008). Validación de la aplicación de la semilla de *Moringa oleifera* producida en el sur de Honduras como coagulante natural del agua destinada a consumo humano en la región del Yeguaré, Honduras. *Escuela Agrícola Panamericana*, 0350(47), 36.
- Terrel, G. J. (2019). Uso de las semillas de *Moringa oleifera* lam. como para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Trabajo de investigación de Ingeniería ambiental. Universidad científica del sur. Perú. 2-15.

- Thakur, S., Choubey, S. (2014). Assessment of coagulation efficiency of *Moringa oleifera* and Okra for treatment of turbid water. Arch. Appl. Sci. Res., 6(2), 24–30. Tomado de http://www.researchgate.net/profile/Sonal_Choubey2/publication/278961823_Assessment_of_coagulation_efficiency_of_Moringa_oleifera_and_Okra_for_treatment_of_turbid_water/links/5587e03208ae7bc2f44d6542.pdf [Consultado el 19 de diciembre de 2021].
- Torres, A., De la Peña, L., Gallegos, J., Rodríguez, M., Hernández, F. (2017). Evaluación experimental del poder coagulante de extractos naturales empleados en la clarificación de aguas. Memorias Del XXXVIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ , 111-115. Tomado de [http://productividad.cimav.edu.mx/productividad/adjuntos/expediente/500/ARTICULO CONGRESO.pdf](http://productividad.cimav.edu.mx/productividad/adjuntos/expediente/500/ARTICULO_CONGRESO.pdf) [Consultado el 3 de julio de 2021].
- United Nations Children’s Fund (UNICEF) and World Health Organization. (2018). Drinking water, sanitation and hygiene in schools : Global baseline report 2018. World Health Organization. JMP. 4-20. Tomado de <https://washdata.org/sites/default/files/documents/reports/2018-11/JMPWASHinSchoolsWEBfinal.pdf> [Consultado el 30 de junio de 2021].
- Unnisa, S. A., Bi, S. Z. (2018). *Carica papaya* seeds effectiveness as coagulant and solar disinfection in removal of turbidity and coliforms. Appl. Water Sci., 8(6), 1–8. Tomado de <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0791-x> [Consultado el 30 de junio de 2021].
- Vargas, L. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida- Manual I-Teoría tomo I. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria. Perú. 3-48. Tomado de <http://cdam.minam.gob.pe:8080/handle/123456789/109> [Consultado el 5 de agosto de 2021].
- Villabona, A., Paz, I., Martínez, J. (2013). Characterization of *Opuntia ficus-indica* for using as a natural coagulant. Rev. Colomb. Biotecnol., 15(1), 137–144.
- Wang, Z., Zhang, Z., Lin, Y., Deng, N., Tao, T., Zhuo, K. (2002). Landfill leachate treatment by a coagulation-photooxidation process. Hazard. Mater., 95, 153–159.
- Wolf, G., Schneider R. M., Bongiovani M. C., Morgan Uliana E., García Do Amaral A. (2002). Application of coagulation/flocculation process of dairy wastewater from conventional treatment using natural coagulant for reuse. Chem. Eng. Trans., 43, 2041-2046. Tomado de <https://doi.org/10.3303/CET1543341> [Consultado el 11 de julio de 2021].
- Yadav, K., Kadam, P., Patel, J., Patil, M. (2014). *Strychnos potatorum*: Phytochemical and pharmacological review. Pharmacogn. Rev., 8(15), 61. Tomado de <https://doi.org/10.4103/0973-7847.125533> [Consultado el 16 de octubre de 2021].
- Yimer, A., Dame, B. (2021). Papaya seed extract as coagulant for potable water treatment in the case of Tulte River for the community of Yekuset district, Ethiopia. Environ. Chall., 4(7), 1-7. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100198> [Consultado el 1 de diciembre de 2021].
- Zanin, T. (2021). 9 beneficios del tamarindo y cómo preparar el agua. Tua Saúde. Portugal. Tomado de <https://www.tuasaude.com/es/tamarindo/> [Consultado el 11 de diciembre de 2021].
- Zhang, J., Zhang, F., Luo, Y., Yang, H. (2006). A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment. Process Biochem., 41(3), 730–733. Tomado de <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.08.016> [Consultado el 20 de septiembre de 2021].

2021].

Zimmerman, J. B., Mihelcic, J. R. (2012). Ingeniería Verde. Ingeniería Ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño. 1° Edición, pp. 260-285. Editorial Alfaomega. Estados Unidos.