

**COAGULANTES-FLOCULANTES POLIMÉRICOS DE ORIGEN NATURAL
PARA POTABILIZACION DE AGUA**

**FREDY WLADIMIR RIAÑO MENDEZ
JULIAN ANDRES TARAZONA BARAJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2015**

**COAGULANTES-FLOCULANTES POLIMÉRICOS DE ORIGEN NATURAL
PARA POTABILIZACION DE AGUA**

FREDY WLADIMIR RIAÑO MENDEZ

Ing. Químico

JULIAN ANDRES TARAZONA BARAJAS

Ing. Químico

Monografía para optar al título de Especialista en Química Ambiental

Director

MARIANNY YAJAIRA COMBARIZA MONTANEZ.

Química, PhD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2015

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
1. COAGULANTES-FLOCULANTES POLIMÉRICOS DE ORIGEN NATURAL	13
1.1. ASPECTOS GENERALES.....	15
2. TIPOS DE COAGULANTES-FLOCULANTES NATURALES.....	22
2.1. ALMIDONES.....	23
2.2. QUITINA Y QUITOSAN.	31
2.3. COAGULANTES-FLOCULANTES DE ORIGEN VEGETAL.	39
2.3.1. Semillas de Nirmali (<i>Strychnos potatorum</i>).	40
2.3.2. <i>Moringa Oleífera</i>	43
2.3.3. Cactus.).....	49
2.3.4. Taninos.	57
3. CONCLUSIONES.....	62
BIBLIOGRAFIA.....	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplos de polielectrolitos sintéticos.....	17
Tabla 2. Detalles de almidones catiónicos sintéticos	27
Tabla 3. Principales características y aplicaciones del quitosan.....	34
Tabla 4. Resultado test de jarras para M. oleífera.....	47
Tabla 5. Eficiencia en la reducción de la turbidez utilizando diferentes coagulantes y diferentes rangos de turbidez	48
Tabla 6. Parámetros estudiados antes y después del tratamiento de aguas subterráneas con polvo de semilla de Moringa oleífera	49
Tabla 7. Tipos de coagulantes-floculantes naturales usados y estudiados actualmente en el tratamiento de agua.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Histogramas de publicaciones científicas relacionadas con las palabras clave: biofloculantes, biopolímeros y tratamiento de aguas.....	14
Figura 2. Proceso de desestabilización coloidal.....	15
Figura 3. Mecanismo para la formación de flóculos.....	18
Figura 4. Estructuras de polielectrolitos catiónicos: cloruro de Polidialildimetil-amonio (PDADMAC), polímeros a partir de epiclorhidrina y dimetilamina (ECH/DMA), poliacrilamida catiónica (CPAM) y poliacrilamida aniónicas (APAM).....	20
Figura 5. Estructura lineal y ramificada de los polímeros del almidón.	24
Figura 6. Representación esquemática de la síntesis de almidón catiónico.....	26
Figura 7. Resultados de las pruebas Jarras en suspensión de sílice con adición de diversos grados de almidones catiónicos como floculantes.....	28
Figura 8. Resultado test de jarras para suspensión de sílice: a) Adición de almidón (St), almidón injertado con poliacrilamida (St-g-PAM) y almidón catiónico 3 (Cat St3) como floculantes. b) Adición de almidón Cat St3 y floculantes comerciales.....	29
Figura 9. Estructura molecular de la Quitina.....	32
Figura 10. a) Estructura molecular quitosan y b) Relación estructural entre la quitina, el quitosan y el quitano.	33
Figura 11. Representación esquemática de ácido poligalacturónico en solución acuosa.	51
Figura 12. (a) Efecto de la alteración de la dosificación de <i>Latifaria Cactus</i> como coagulante (b) comparación de la eliminación de la turbidez por coagulantes orgánicos (datos para <i>Moringa oleífera</i> (Ndabigengesere y Narasiah, 1996). (c) Comparación de las actuaciones de sulfato de aluminio (♦) y <i>Latifaria Cactus</i> (•).....	52
Figura 13. Efecto de parámetros físico-químicos en la eficiencia de remoción de turbidez, usando <i>Latifaria Cactus</i> para tratar el agua sintética: (a) coagulante de cactus crudo para el tratamiento de agua sintética con diferente turbidez inicial; (b) coagulante cactus prima de 30 y 50 mg / L para el tratamiento de agua sintética con turbidez inicial de 176 NTU y con diferente pH; (c) coagulante cactus crudo de diferentes dosis para el tratamiento de agua sintética con turbidez inicial de 176NTU y bajo diferentes temperaturas; (d) coagulante cactus crudo de 50 mg / L para el tratamiento de agua sintética con turbidez inicial de 176NTU y con diferente alcalinidad).....	54
Figura 14. Comparación de alumbre y polielectrolitos (tanino y AN913) en la eliminación de la turbidez (polielectrolitos usados junto con alumbre.....	59

RESUMEN

TÍTULO: Coagulantes-floculantes poliméricos de origen natural para potabilización de agua *

AUTORES: Fredy Wladimir Riaño Méndez**, Julián Andrés Tarazona Barajas**

Palabras Claves: Biofloculantes, Biopolímeros, Tratamiento de aguas.

DESCRIPCIÓN:

En esta monografía se presenta el análisis de la literatura científica, publicada en bases de datos indexadas desde el año 2000 hasta 2014, relacionada con coagulantes-floculantes de origen natural, obtenidos a partir de fuentes como el almidón, la quitina y algunas especies de plantas como semillas de Nirmali (*Strychnos potatorum*), *Moringa oleífera* y cactus. Dentro del análisis realizado también se incluyen las características químicas, propiedades, y usos de estos compuestos en procesos de coagulación para la potabilización de agua. El empleo de estos coagulantes va en aumento en los países en vía de desarrollo, principalmente porque constituyen una alternativa amigable con el medio ambiente que puede eventualmente, reemplazar materiales inorgánicos polímeros sintéticos que representan un riesgo para el medio ambiente y la salud humana.

Estas sustancias, además, son relativamente económicas, fáciles de extraer y tienen la ventaja adicional de la biodegradabilidad, cuando se comparan con los coagulantes químicos de uso común. Su eficiencia es comparable con coagulantes químicos, para procesos de clarificación de agua natural con alta, media y baja turbidez. La mayoría de estos coagulantes naturales funcionan por medio de un mecanismo de adsorción seguida de neutralización de la carga o el efecto de transición polimérica.

La utilización de estos coagulantes en procesos de potabilización de aguas presenta un avance importante hacia la adaptación de tecnologías sostenibles, ya que su uso no solamente disminuye la toxicidad de los residuos de procesos de potabilización sino que hace uso de recursos renovables y su aplicación está directamente relacionada con la mejora de la calidad de vida de las comunidades.

* Monografía

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Especialización en Química Ambiental.

Director. MARIANNY YAJAIRA COMBARIZA. Química, PhD. D.

ABSTRACT

TITLE: Coagulants- flocculants naturally occurring polymer for water purification*

AUTHORS: Fredy Wladimir Riaño Méndez**, Julián Andrés Tarazona Barajas**

Keywords: Bioflocculants, Biopolymers, Water treatment.

DESCRIPTION:

This paper discusses the analysis of the scientific literature , published in database indexed from 2000 to 2014, related coagulants - flocculants of natural origin , obtained from sources such as starch , chitin and some plant species occurs as seeds Nirmali (*Strychnos potatorum*), Moringa oleífera and cactus. Within the analysis of chemical features, properties, and uses of these compounds in coagulation processes for water treatment are also included. The use of these coagulants is increasing in developing countries, mainly because it is a friendly alternative environment can eventually replace synthetic polymers, inorganic materials that are hazardous to the environment and human health

These substances also are relatively inexpensive, easy to remove and have the added advantage of biodegradability when compared with commonly used chemical coagulants. Its efficiency is comparable with chemical coagulants for clarification processes natural water with high, medium and low turbidity. Most of the natural clotting function through adsorption mechanism followed by charge neutralization or polymeric transition effect.

The use of these coagulants in water purification processes presents a significant step towards the adaptation of sustainable technologies advance, since their use not only reduces the toxicity of the waste water treatment process but makes use of renewable resources and their application is directly relates to improving the quality of life of the communities

* Monograph

** Faculty of Science. School of Chemistry. Specialization in Environmental Chemistry.
Head teacher. MARIANNY YAJAIRA COMBARIZA. Chemistry, PhD.

INTRODUCCIÓN.

Las investigaciones orientadas al desarrollo y caracterización de coagulantes-floculantes, obtenidos a partir de biopolímeros extraídos de plantas, exoesqueletos de algunos animales y polisacáridos de origen bacteriano se consideran en la actualidad fundamentales para la sostenibilidad ambiental de procesos de potabilización y tratamiento de aguas. La característica principal de estos agentes coagulantes-floculantes radica en que su eficacia y su carácter biodegradable pueden reducir potencialmente los impactos negativos de los procesos de potabilización tanto al ambiente como a la salud humana.

La presencia de partículas sólidas muy pequeñas y en suspensión (coloides), sólidos disueltos y la incorporación de sustancias químicas de tipo orgánico e inorgánico, metales y otros compuestos provenientes de actividades domésticas, industriales y agrícolas son las principales fuentes de contaminación de las aguas naturales. Para la remoción de materiales coloidales o en suspensión se utilizan varias tecnologías ya establecidas como intercambio iónico, filtración de membrana, precipitación, flotación, extracción con disolvente, adsorción, coagulación, floculación y métodos biológicos y electrolíticos (Radoiu *et al.*, 2004).

Las unidades de coagulación-floculación en el proceso de potabilización se utilizan para la remoción de sólidos suspendidos y disueltos presentes en las aguas. Durante este proceso la materia orgánica se desestabiliza, por medio de interacciones electrostáticas con sustancias inorgánicas o polímeros sintéticos, para facilitar su aglomeración e inducir la formación de flóculos que se remueven por acción de la gravedad en las unidades de filtración. En el proceso de coagulación floculación se utilizan comúnmente coagulantes inorgánicos comunes como sales de hierro y aluminio. Estos materiales son económicos pero a la vez deben ser usados en grandes cantidades, lo que promueve la formación de volúmenes altos de lodos y altas concentraciones de hierro y aluminio residual en el agua tratada. La presencia de estos metales en aguas, aun en concentraciones bajas puede tener efectos adversos para la salud humana, pues estudios

epidemiológicos asocian la presencia de metales en agua con la aparición de enfermedades del sistema nervioso. Otro tipo de coagulantes son los polielectrolitos poliméricos de origen sintético, que presentan grandes ventajas en cuanto a su inercia natural ante los cambios de pH, alta eficiencia de remoción con dosis baja y fácil manejo en comparación con los usados comúnmente (Singh *et al.*, 2000). Estos materiales, sin embargo, tienen impactos ambientales significativos debido a que no son biodegradables y además sus monómeros están asociados con enfermedades en el ser humano.

Como resultado de lo expuesto anteriormente, existe a nivel técnico-científico un área de investigación muy activa relacionada con la obtención de coagulantes-floculantes biodegradables a partir de polímeros extraídos de fuentes naturales. Estos materiales conocidos como biofloculantes naturales se estudian ampliamente en la actualidad; como resultado en la literatura científica de los últimos años existen numerosas publicaciones sobre su obtención, propiedades, usos y ventajas cuando se comparan con los materiales utilizados tradicionalmente.

En este trabajo de investigación se realiza un análisis bibliográfico sobre la información técnico-científica disponible en bases de datos referenciales relacionada con la obtención, caracterización y evaluación de nuevos floculantes, producidos a partir de biopolímeros de origen natural con aplicabilidad a la potabilización y tratamiento de agua. De esta manera se pondrá en discusión la eficiencia de los coagulantes-floculantes naturales, en términos de ventajas y desventajas, cuando se comparan con los usados tradicionalmente en procesos de coagulación-floculación. Además se establece el grado de madurez de las tecnologías de coagulación-floculación con base en polímeros naturales.

1. COAGULANTES-FLOCULANTES POLIMÉRICOS DE ORIGEN NATURAL

Durante la última década (2004-2014) los coagulantes-floculantes orgánicos obtenidos a partir de polímeros de origen natural han sido el tema de muchas investigaciones. La mayoría de estos trabajos de investigación se centra en la obtención de estos compuestos y en la evaluación de sus características físico-químicas y de su desempeño cuando se comparan con coagulantes sintéticos tradicionales. El historial de publicaciones científicas relacionadas con los biofloculantes naturales ha crecido en los últimos años de forma exponencial, principalmente por su eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos, en procesos de potabilización de agua.

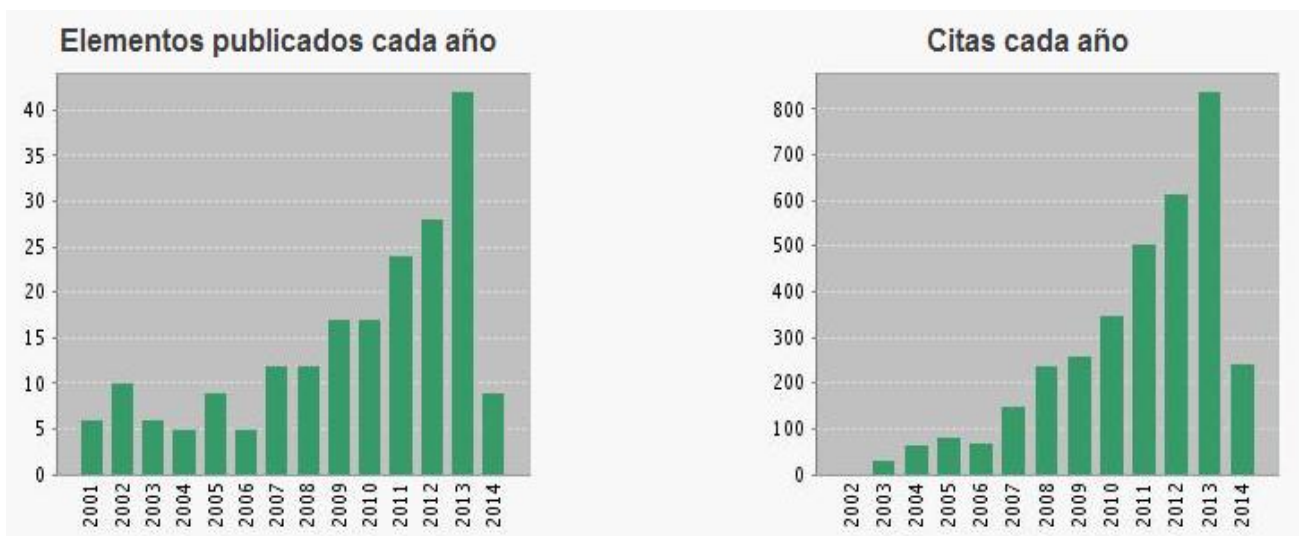
Las investigaciones en el área de biofloculantes se han enfocado en el aislamiento de una amplia gama de estos materiales a partir de fuentes naturales. Por ejemplo muchos se obtienen a partir de tallos, hojas y semillas de algunas especies vegetales (almidón, celulosa, alginatos, goma arábica, inulina, carrageninas entre otros); a partir de microorganismos (biopolímeros intra- y extra-celulares) y directamente del exoesqueleto de algunos crustáceos (quitosan y quitina). Otra área de investigación activa se relaciona con el estudio de los mecanismos de coagulación inducidos por estos materiales de forma que se tenga una comprensión completa de su uso y comportamiento en los procesos de potabilización de agua. Finalmente el uso de coagulantes naturales representa un paso esencial en el desarrollo de tecnologías respetuosas con el medio ambiente debido a que por ser compuestos de origen natural presentan alta biodegradabilidad y su uso no genera problemas de contaminación secundarios.

La dinámica en la producción de información y las citas sobre estos compuestos se puede observar consultando diversas bases de datos entre las cuales se destacan el *CRCnetBASE*, *ScienceDirect*, *Web of Science*, *Scopus* y *Google Scholar* entre otras. La consulta de estas herramientas electrónicas permite obtener información detallada, cuantificada y reciente en forma de

artículos científicos, patentes, *reviews* y material suplementario relacionado con potabilización y tratamiento de agua, polímeros naturales y biofloculantes. Para la búsqueda bibliográfica se utilizaron las siguientes palabras clave: Biofloculantes (Biofloculants), Biopolímeros (Biopolymers), y Tratamiento de aguas (Water treatment).

En la Figura 1 se muestra la tendencia actual de publicaciones científicas y citas de artículos por cada año durante la última década, tomando como referencia los trabajos de investigación en biofloculantes para potabilización de agua. Además, la dinámica de la información científica publicada refleja un crecimiento exponencial en el número de publicaciones y citas en función del tiempo. Esto demuestra que las investigaciones en torno a coagulantes-floculantes obtenidos a partir de polímeros de origen natural es un tema fundamental y que actualmente está en auge.

Figura 1. Histogramas de publicaciones científicas relacionadas con las palabras clave: biofloculantes, biopolímeros y tratamiento de aguas.



Fuente. <http://apps.webofknowledge.com/>

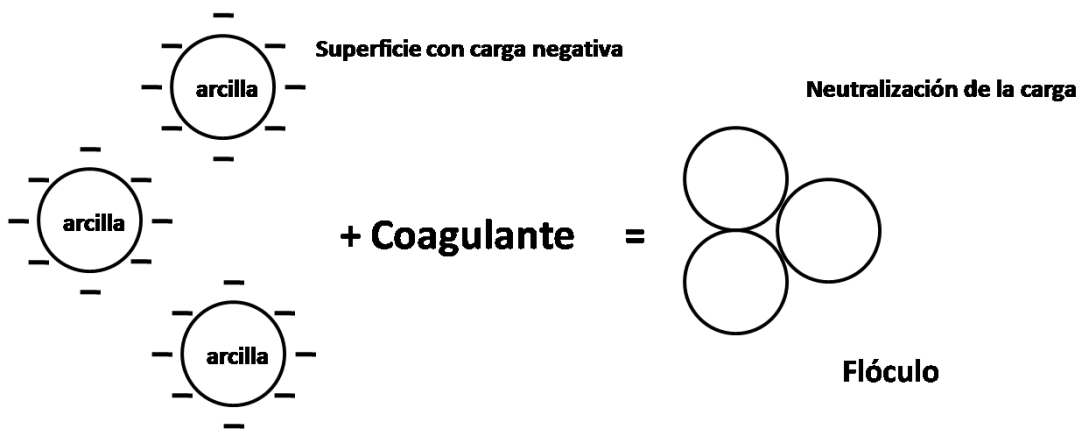
1.1. ASPECTOS GENERALES.

La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas de una suspensión coloidal, por reducción o neutralización de las fuerzas que las separan, para formar pequeñas masas llamadas microfloculos. Esta desestabilización se logra utilizando productos con alta densidad de carga iónica llamados coagulantes.

Generalmente se distinguen dos tipos de coagulantes: los inorgánicos y los orgánicos. Históricamente, los coagulantes metálicos inorgánicos, como las sales de Hierro y Aluminio, han sido los más utilizados en la potabilización de agua.

La coagulación con estas sustancias inorgánicas se produce directamente por neutralización de la carga y, específicamente por adición de cationes de hierro o de aluminio que interactúan con las cargas negativas asociadas a la presencia de materia orgánica natural en suspensión (*Natural Organic Matter-NOM*) (Ciencia Abierta, 2007). Este tipo de coagulación se denomina coagulación sencilla; en la Figura 2 se observa esquemáticamente el proceso.

Figura 2. Proceso de desestabilización coloidal.



Fuente: Los autores

Convencionalmente, la coagulación se ha realizado con sales de metales, entre las que se destacan el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$), sulfato ferroso ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), sulfato férrico (FeSO_4) y cloruro férrico (FeCl_2) (Matilainen *et al.*, 2010). Aunque estas sustancias tienen la ventaja de actuar como coagulantes-floculantes simultáneamente, porque forman especies hidratadas complejas

cargadas positivamente como el $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ y el $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, también tienen el inconveniente de ser muy sensibles a cambios de pH.

Dentro del grupo de coagulantes inorgánicos, se destaca el sulfato de aluminio (alumbre), que es el coagulante químico más utilizado para la clarificación del agua porque remueve la materia orgánica en suspensión entre un 90 y 99% al ser utilizado en condiciones óptimas (Miller *et al.*, 2008). Sin embargo, la concentración de aluminio residual en el agua tratada puede ser fácilmente asimilada por el hombre, con potenciales consecuencias negativas a largo plazo.

Sus efectos se asocian con varias formas de cáncer, Alzheimer y enfermedades óseas (Gurdián y Coto, 2011; Donato *et al.*, 2006). Una concentración de aluminio superior a 0,1 mg/L en agua para consumo humano puede ser un factor de riesgo, especialmente para el síndrome de Alzheimer (Parra *et al.*, 2011). Además, el alumbre genera grandes cantidades de lodos que no pueden ser utilizados como biosólidos porque impactan negativamente los suelos y el agua debido a su ecotoxicidad (Miller *et al.*, 2008; Yin, 2010).

Dentro del grupo de coagulantes inorgánicos también se han usado coagulantes pre-hidrolizados basados en hierro y aluminio, llamados floculantes poliméricos inorgánicos (PFIs). Estas especies efectúan la hidrólisis, independientemente de las condiciones del proceso durante el tratamiento. Se incluyen dentro de estos el clorhidrato de aluminio, cloruro de polialuminio, cloruro de sulfato de polialuminio, cloruro de silicato de polialuminio y formas de cloruro de polialuminio con polímeros orgánicos. Las formas de hierro incluyen sulfato de poliférrico y sales férricas con polímeros. También hay mezclas de aluminio-hierro polimerizadas. (Matilainen *et al.*, 2010; Shiet *et al.*, 2009; Wanga *et al.*, 2007; Katalin *et al.*, 2000; Liua y Chinb, 2009).

Las principales ventajas de los coagulantes inorgánicos pre-polimerizados están relacionadas con la capacidad de funcionar de manera eficiente a diferente temperatura y pH. Adicionalmente, cuando se usan en procesos de potabilización se requieren en dosis más bajas, se producen menos residuos (lodos) y se reducen los iones cloruro y sulfato residuales (Matilainen *et al.*, 2010; Katalin *et al.*,

2000). A pesar de estas ventajas, el uso de coagulantes inorgánicos poliméricos ha sido también cuestionado.

Otro tipo de coagulantes-floculantes usados en el proceso de potabilización de agua son los polímeros. Este tipo de compuestos formados por la unión de unidades químicas llamadas monómeros, presentan una amplia gama de compuestos solubles en agua, y cuyas macromoléculas tienen la capacidad para desestabilizar la materia orgánica en suspensión y producir la floculación.

Estos polímeros comúnmente se conocen como polielectrolitos debido a que contienen grupos eléctricos ionizables. Se clasifican de acuerdo con la carga iónica de sus macroiones como catiónicos (cargados positivamente), aniónicos (cargados negativamente) y no iónicos (sin carga) (Richter, 2009; Libanius, 2008). La Tabla 1 muestra algunos ejemplos de polielectrolitos según la distribución formal de carga.

Tabla 1. Ejemplos de polielectrolitos sintéticos

TIPO	GRUPO FUNCIONAL	EJEMPLO
CATIÓNICO	Amina	Clorhidrato de polietilenamina
	Cuaternaria	Polidialildimetilamonio (PDADMAC)
ANIÓNICO	Carboxílicos	Ácido metacrílico
	Sulfónico	Polivinilo sulfonato
NO IÓNICO	Polialcohol	Alcohol polivinílico
	Amida	Poliacrilamida

Fuente: Los autores

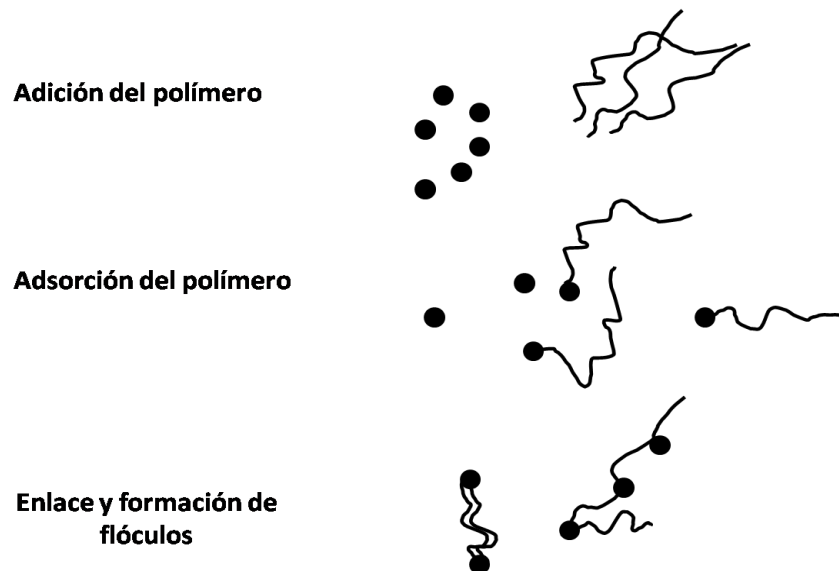
En la potabilización de agua, se usan polímeros de naturaleza catiónica como coagulantes primarios, mientras que los polímeros aniónicos y no iónicos se usan como ayudantes o floculantes-coagulantes (Lee *et al.*, 1998). Para el proceso de coagulación los polielectrolitos catiónicos que se utilizan pueden ser de alto o bajo peso molecular, solubles en agua, y que interactúan con el NOM (*Natural Organic Matter*) en suspensión y provocan su coagulación. Además contienen en la

estructura grupos de amonio cuaternario ionizables (por ejemplo, carboxilo, amino o sulfónico). Esta última característica hace que la carga formal positiva se mantenga presente durante el proceso de coagulación independientemente del nivel de pH.

El mecanismo de acción de estos polímeros involucra su adsorción sobre la superficie de las partículas coloidales con carga negativa, la reducción del potencial de la superficie y la precipitación del material. La coagulación por este tipo de mecanismo es generalmente más eficiente que la coagulación inducida por cationes metálicos. En este proceso la desestabilización de la suspensión coloidal se da por la utilización de largas cadenas poliméricas, y se desarrolla en dos pasos principales: la iniciación del floc y el crecimiento de este. Esto implica la formación de puentes químicos entre partículas de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional y porosa. Así se formaría, mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un floculo suficientemente grande y pesado como para sedimentar (Ciencia Abierta, 2007; Libanius, 2008)

En la Figura3 se describe gráficamente el mecanismo de floculación asociado al uso de polímeros como floculantes-coagulantes.

Figura 3. Mecanismo para la formación de flóculos

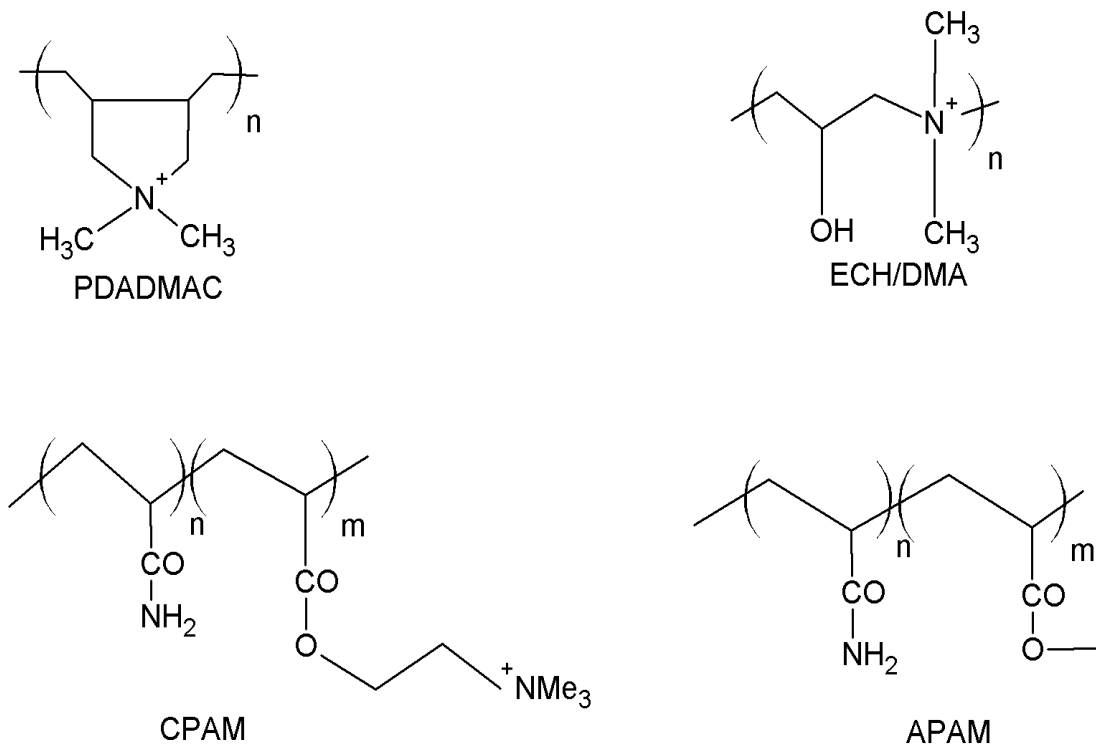


Fuente: Los autores, adaptado de: (Richter, 2009)

Entre los polímeros catiónicos más comunes se encuentran las poliacrilamidas y sus derivados (por ejemplo el cloruro de polidialildimetil-amonio - PDADMAC), poliacrilamidas catiónicas (CPAM) y polímeros a partir de epiclorhidrina y dimetilamina (ECH / DMA). También se ha sintetizado polímeros catiónicos que tienen grupos sulfonio o fosfonio. Estos últimos adquieren propiedades catiónicas en medios ácidos y se basan en poliaminas que contienen grupos amino primario, secundario o terciarios, o mezclas de ellos. (Bolto y Gregory, 2007). Como polielectrolitos aniónicos se destacan la poliacrilamida aniónica, los polímeros de ácido carboxílico de alto peso molecular y algunos derivados de poliacrilamidas (por ejemplo poliacrilamida parcialmente hidrolizada en medio básico).

Las estructuras químicas de algunos de los polímeros catiónicos se muestran en la Figura. 4.

Figura 4. Estructuras de polielectrolitos catiónicos: cloruro de Polidialildimetilamónio (PDADMAC), polímeros a partir de epiclorhidrina y dimetilamina (ECH/DMA), poliacrilamida catiónica (CPAM) y poliacrilamida aniónicas (APAM).



Fuente: Los autores, adaptado de: (Bolto y Gregory, 2007)

Dentro de las características más importantes de los floculantes poliméricos, además de su fácil manejo y excelente solubilidad en el agua, se destacan su alto peso molecular, lo que implica mejores propiedades de agregación y densidad de carga (*Charge Density-CD*). Los polielectrolitos inducen formación de flóculos con mejores características en términos de tamaño y fuerza de enlace. Por estas razones son eficientes y producen menor volumen de los lodos, poco aumento de la carga iónica del agua tratada y son más resistentes a los cambios de pH que los coagulantes convencionales (Matilainen *et al.*, 2010; Tzoupanos y Zouboulis, 2011; Renault *et al.*, 2009).

A pesar de las múltiples ventajas que ofrecen los polielectrolitos, su uso ha sido cuestionado debido a la contaminación que generan. El problema radica en los reactivos químicos residuales que no reaccionan durante la producción de las

unidades de monómero (epiclorhidrina, formaldehído y dimetilamina), monómeros residuales (acrilamida, etilenimina y trimetilolmelamina) y subproductos de reacción de los polímeros con el agua (Bolto y Gregory, 2007; Renault *et al.*, 2009). Además, la mayoría de los floculantes de alto peso molecular son recalitrantes. Por ejemplo las poliacrilamidas sintéticas, ácidos poli-acrílicos y ácidos sulfónicos de poli-estireno y sus derivados no son fácilmente biodegradables, generan problemas de contaminación secundarios, afectan la salud humana por ser potentes carcinógenos y neurotóxicos y tienen efecto negativo en la flora y fauna. (Chakrabarti *et al.*, 2008; Brostow *et al.*, 2009; Ho *et al.*, 2010).

Frente al problema generado por el uso de coagulantes-floculantes inorgánicos y polielectrolitos de naturaleza sintética, numerosos productos biológicos han sido recientemente propuestos y estudiados. Algunos polímeros naturales como coagulantes y floculantes son eficientes y pueden sustituir el uso de materiales convencionales. Estos productos se conocen como "biofloculantes" e incluyen biopolímeros (almidones, quitosan, celulosa, gomas, alginatos. etc.) y polisacáridos producidos por microorganismos como bacterias, hongos y levaduras (Singh *et al.*, 2000; Salehizadeh y Shojaosadati, 2001 Deng *et al.*, 2005; Renault *et al.*, 2009).

Entre las características de los polímeros naturales, además de su fácil disponibilidad y solubilidad se destacan su eficiencia y biodegradabilidad (Chakrabarti *et al.*, 2008; Xing *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2011). Además debido a su origen natural, en la mayoría de los casos pueden ser ingeridos y tolerados por los organismos (Esquivel, 2004; Fuentes *et al.*, 2011), no generan riesgo toxico para el ser humano y el costo de fabricación es menor en comparación con el costo de adquisición de coagulantes-floculantes convencionales (Gurdián y Coto, 2011; Yin, 2010). También presentan ventajas importantes cuando son empleados como coagulantes-floculantes en el proceso de potabilización de agua. Por ejemplo se usan en bajas proporciones (1-5 ppm), forman flóculos más grandes y fuertes, mejoran la sedimentación, los lodos generados durante la floculación son

biodegradables y sus estructuras químicas pueden ser modificadas (Lachhwani., 2005).

En la siguiente sección se describe con más detalle los tipos, fuentes de obtención, modificación y mecanismos de acción de los polímeros naturales estudiados y usados actualmente como coagulantes -floculantes.

2. TIPOS DE COAGULANTES-FLOCULANTES NATURALES

Los coagulantes naturales, también conocidos como biofloculantes, son sustancias solubles en agua que actúan de manera similar a los coagulantes sintéticos aglomerando (coagulando) partículas coloidales en suspensión, facilitando su deposición por aumento de peso y por desestabilización de la carga superficial que las mantiene en suspensión. Algunos de estos coagulantes también poseen propiedades antimicrobianas, de modo que también reducen el contenido de microorganismos capaces de causar enfermedades. Su origen natural garantiza la seguridad para los seres humanos y la biodegradabilidad de los lodos producidos. Por esta razón los coagulantes naturales constituyen un eslabón fundamental para el desarrollo de tecnologías de tratamiento de agua que sean amigables con el medio ambiente.

Los biofloculantes se extraen directamente de ciertas plantas y animales, o se producen como derivados modificados de materiales naturales. De acuerdo con su estructura química pueden ser polisacáridos, proteínas, lípidos, lipoproteínas y lipopolisacáridos, entre otros. Dentro de los biofloculantes más estudiados se encuentran principalmente algunos polisacáridos derivados de plantas como los almidones y la celulosa; de animales como la quitina, el quitosan y los alginatos; y de bacterias y hongos como el xantano, curdlan, pululano y ácido hialurónico producidas por bacterias y hongos.

Muchos de estos biopolímeros son de por sí macromoléculas catiónicas o se pueden modificar fácilmente para producir un polielectrolito catiónico. Algunos de

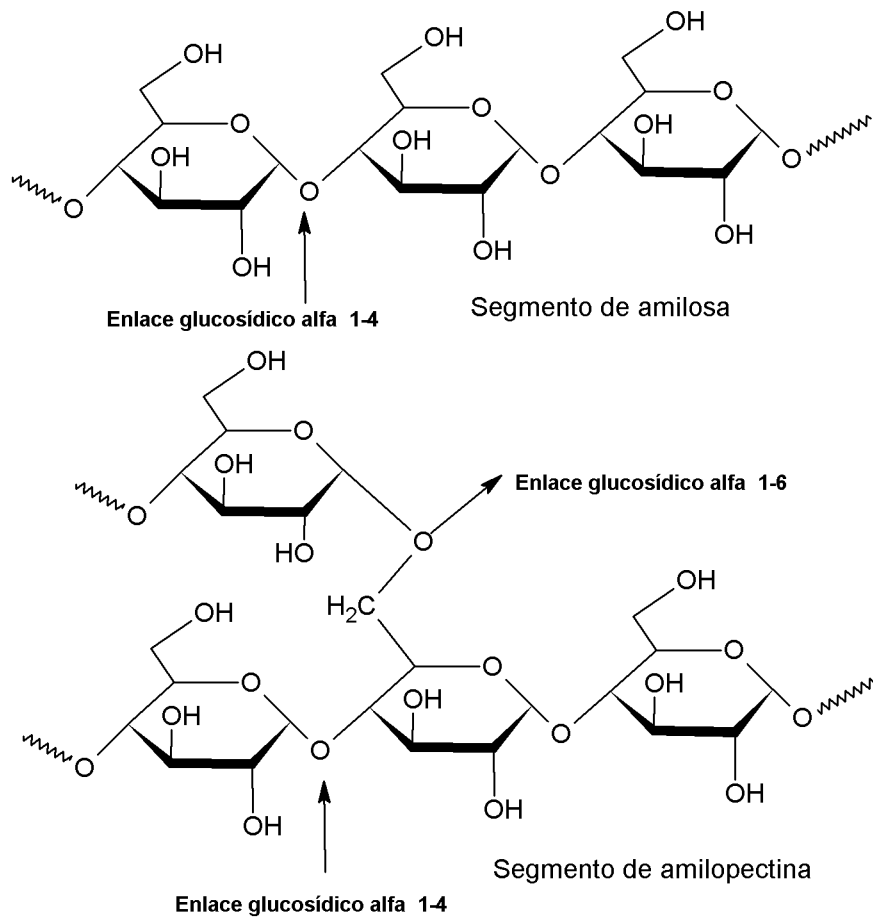
los flocculantes naturales y sus características más importantes se describen a continuación.

2.1. ALMIDONES.

El almidón es uno de los polímeros naturales más abundantes en el mundo. Es aislado de diferentes fuentes y se usa ampliamente como agente natural en los procesos de coagulación-floculación de agua potable, aunque algunos funcionan mejor que otros. (Wei *et al.*, 2008; Tripathy y Ranjan, 2006).

El almidón en su forma cruda es una mezcla de dos polímeros: amilosa (hasta 20%) de estructura lineal y de baja masa molecular (hasta 1000-3000 KDa), así como de amilopectina (hasta 95%) de estructura altamente ramificada y de alta masa molecular (60000-130000 KDa)(Ziółkowska *et al.*, 2011). El almidón se compone de cientos o miles de unidades de repetición-glucopiranosido. Estas unidades están unidas entre sí por enlaces de acetal que se forman entre el átomo de carbono hemiacetal, C₁, de la estructura cíclica de la glucosa en una unidad y un grupo hidroxilo en cualquiera de los átomos en la unidad adyacente C₃ (para la amilosa) o el C₆ (para las unidades de la rama en amilopectina). Este tipo de estructura se produce porque en solución acuosa, la glucosa puede existir en el aldehído acíclico o forma de hemiacetal cíclico, y la última forma es la estructura que se incorporan en el polisacárido. También, la forma cíclica puede existir como uno de dos isómeros, el α-isómero con un grupo OH axial sobre el anillo o el β-isómero con un grupo OH ecuatorial. En el anillo de almidón glucopiranosido está presente en la forma α. La Figura 5 muestra las estructura del almidón en sus dos formas.

Figura 5. Estructura lineal y ramificada de los polímeros del almidón.



Fuente: Los autores

La mayoría de las investigaciones sobre las propiedades coagulantes del almidón se enfocan en su modificación química y en el estudio de su capacidad de adsorción de NOM del agua. Los almidones químicamente modificados se obtienen generalmente por tratamiento de almidón con agentes que pueden reaccionar con grupos hidroxilo o por entrecruzamiento con otros polímeros. Estos almidones modificados tienen propiedades físico-químicas que difieren significativamente del polímero original, y que les permiten su aplicación en procesos de tratamiento de agua.

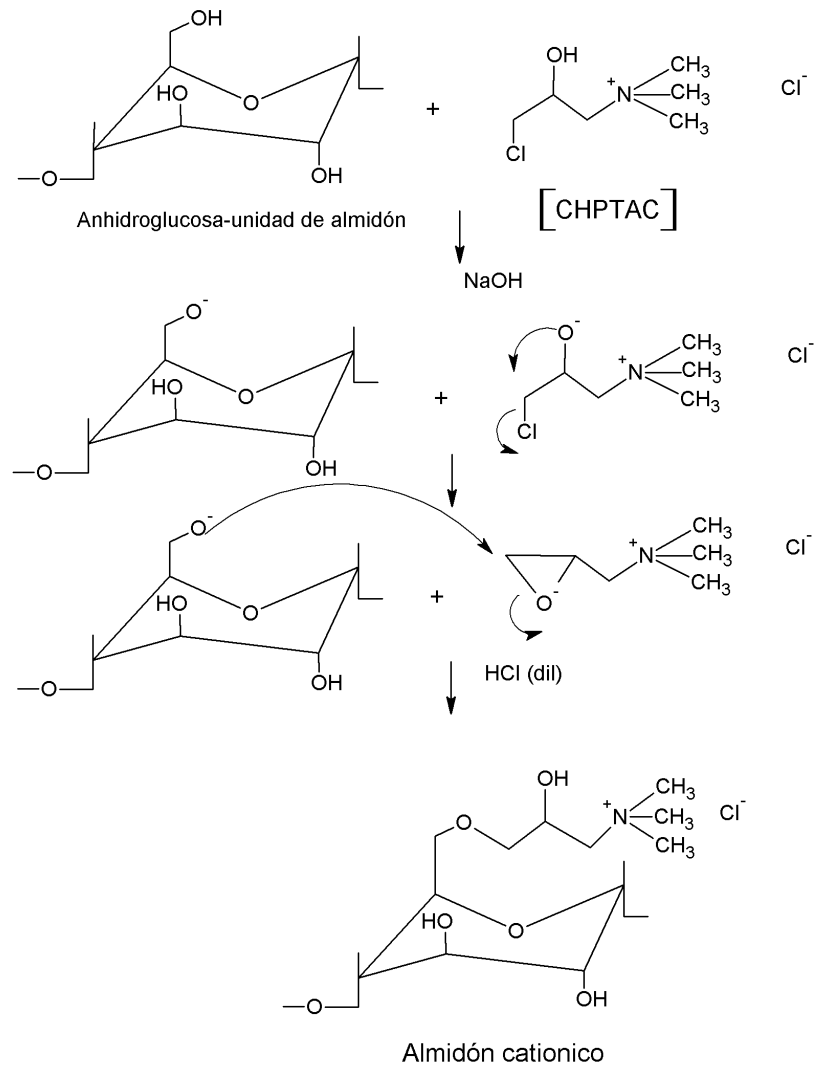
Por ejemplo, Fanta *et al.*, prepararon copolímeros de almidón y poli (cloruro de amonio propiltrimetil 2-hidroxi-3-metacrililo) que se utilizaron como agentes floculantes en suspensiones de sílice de diatomeas (*Snow Floss Celite*) y mineral

magnético de hierro (*Hematita*). Los resultados de las pruebas de laboratorio mostraron que los almidones injertados tienen alta capacidad de floculación en comparación con una poliacrilamida comercial de alto peso molecular (Fanta *et al.*, 1970). Por otra parte Weit *et al.*, demostraron que el copolímero de almidón-g-poliacrilamida tiene buena capacidad de floculación debido a efectos sinérgicos en la floculación (Wei *et al.*, 2008). Muchos copolímeros de injerto de almidón han sido sintetizados y evaluados como floculantes (Pang *et al.*, 2013; Elgadir *et al.*, 2012; Ziółkowska *et al.*, 2011; Ziółkowska y Shyichuk, 2011; Muñoz *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2009; Xing *et al.*, 2005; Singh *et al.*, 2000). Estos copolímeros injertados mostraron aproximadamente la misma acción floculante en comparación con los floculantes poliméricos sintéticos comunes, sin embargo los polímeros catiónicos son más eficientes.

Por otro lado, la introducción directa de un grupo catiónico al almidón le otorga buenas propiedades de floculación. Por ejemplo los almidones catiónicos se pueden preparar por la reacción con diversas sustancias que poseen grupos cargados positivamente tales como amino, imino, amonio, sulfonio o grupos fosfonio. Estos floculantes son eficaces en un amplio intervalo de pH, no son tóxicos, biodegradables y se pueden usar para tratar la materia orgánica e inorgánica en aguas que llevan carga negativa (Nystrom *et al.*, 2003; Pal *et al.*, 2005).

Típicamente la conversión del almidón en su derivado catiónico se da por la reacción del grupo OH primario del almidón en medio alcalino con cloruro N-(3-cloro-2-hidroxipropil) de trimetilamonio (CHPTAC) en base acuosa o disolventes orgánicos. Con esto se logra que el sitio catiónico se una a la cadena del polímero a través de un enlace éter. En el proceso se usa gran cantidad de disolvente, lo que ocasiona contaminación ambiental y, además la longitud de cadena del almidón catiónico es limitada (Wei *et al.*, 2008; Bolto y Gregory, 2007). Los detalles de la reacción se muestran en la Figura 6. También se evaluó la eficiencia de floculación de copolímeros de injerto de almidón y 2-hidroxi-3-metacriloxipropil-trimetil-amonio o mezclas de metacrilato de dimetilaminoetilo (Fanta *et al.*, 1970)

Figura 6. Representación esquemática de la síntesis de almidón catiónico.



Fuente: Los autores, adaptado de: (Pal *et al.*, 2005)

Pal *et al.*, (2005) sintetizaron cuatro almidones catiónicos (Cat St) mediante la incorporación de un monómero catiónico de N-(3-cloro-2-hidroxipropil) trimetil cloruro de amonio (CHPTAC) en la estructura de almidón, en presencia de NaOH. Los autores evaluaron su desempeño como floculantes en términos de reducción de la turbidez de suspensiones de sílice; además los compararon con algunos floculantes comerciales (Magnafloc LT 22 -Mag LT 22, Magnafloc 156- Mag 156, Magnafloc 351 -Mag 351, Rishfloc 226 LV -Rish 226 LV, Rishfloc 440 HV -Rish

440 HV) y un injerto de almidón con poliacrilamida (St-g-PAM). Las características de los almidones catiónicos sintetizados se muestran en la Tabla 2 y los resultados de las pruebas en la Figura 7.

Tabla 2. Detalles de almidones catiónicos sintéticos

POLÍ- MEROS	CANTIDAD DE AGU ¹ (mol)	CANTI- DAD DE CHPTAC (mol)	VOLU- MEN DE NaOH (mol)	TEMPERATU- RA	TIEM- PO (h)	VISCOCI- DAD INTRÍNSE- CA (dL/g)
Cat St1	0,0092	0,0039	0,015	45-50	18	7.5
Cat St2	0,0092	0,0053	0,015	45-50	15	8,0
Cat St3	0,0092	0,0066	0,015	45-50	18	8,8
Cat St4	0,0092	0,0079	0,015	45-50	18	8,2
Almidón						1,25

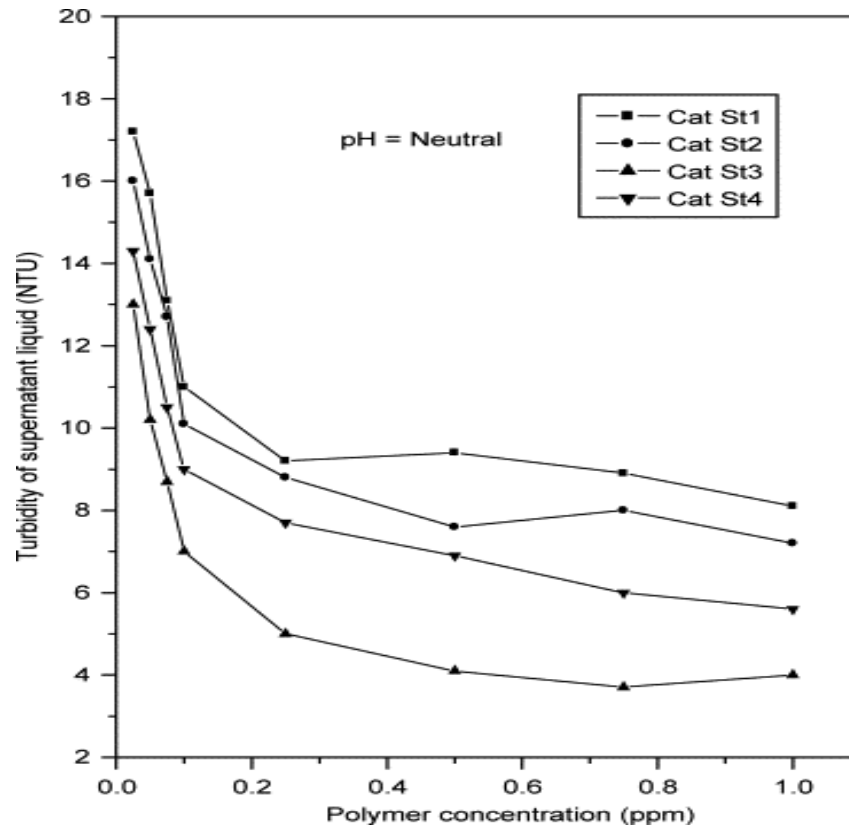
¹ Calculado en base a las unidades de anhidroglucosa (AGU). Una Mol de AGU = 126 g.

Fuente: Los autores, adaptado de: (Pal *et al.*, 2005)

La Figura 7 presenta la relación de turbidez de líquido después de la floculación y la concentración del polímero. Evidentemente el almidón catiónico 3 (Cat St3) tuvo mejor rendimiento en la suspensión de sílice en comparación con los otros. Esto se debe a que el Cat St3 tiene mayor valor de viscosidad intrínseca por lo tanto las cadenas de CHPTAC son más largas. Cuando la cadena polimérica se absorbe en la superficie de las partículas se forman lazos y sus extremos también se absorben en la superficie de otra partícula formando puentes entre ellas. Por lo tanto para que se produzca un enlace eficaz las cadenas de los polímeros deben ser largas para que se puedan extender de la superficie de una partícula a otra. En los demás almidones catiónicos evaluados la cadena de CHPTAC es más corta. Lo anterior demuestra que la incorporación de un agente catiónico en la

estructuraprincipal del almidón permite obtener un agente floculante eficaz para el tratamiento de aguas.

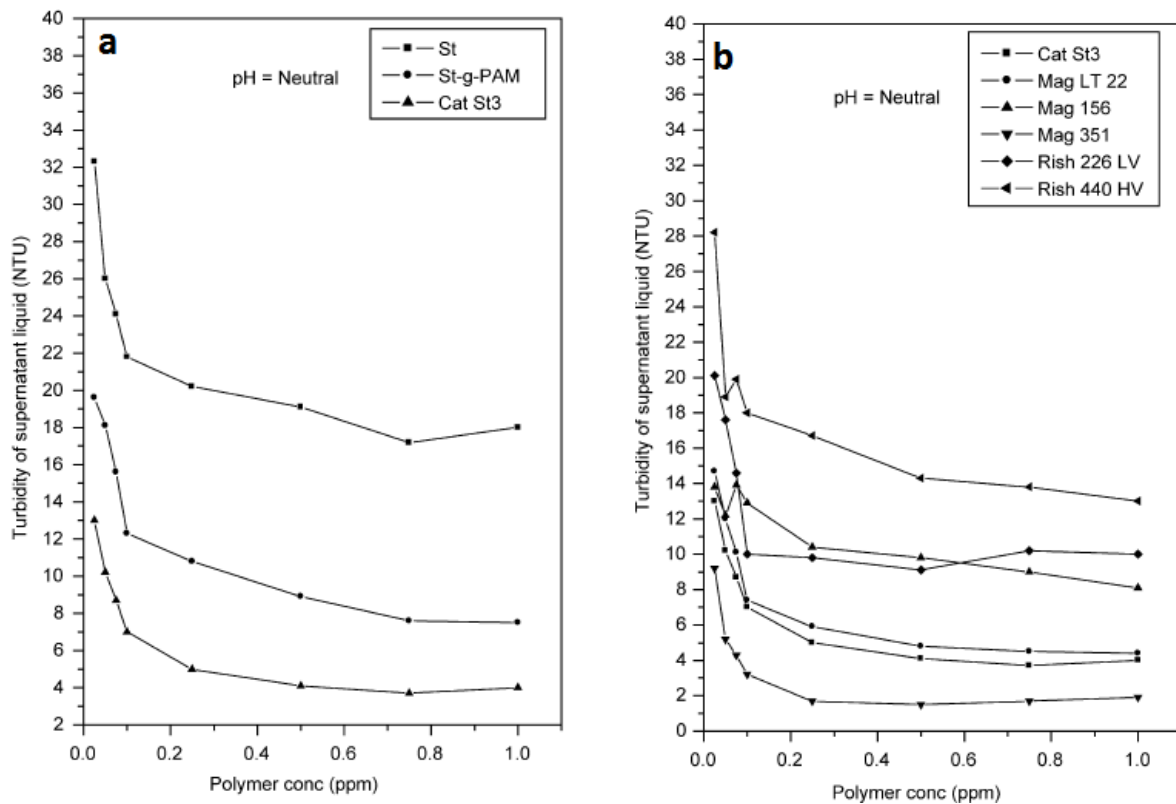
Figura 7. Resultados de las pruebas Jarras en suspensión de sílice con adición de diversos grados de almidones catiónicos como floculantes



Fuente: Tomado de:(Pal *et al.*, 2005)

De otro lado, en relación al rendimiento de floculación del Cat St3 comparado con almidón sin modificar (St) y St-g-PAM, Pal *et al.*, (2005) demostraron que el Cat St3 es mejor floculante en términos de reducción de la turbidez (ver Figura 8a) También cuando se compara la eficiencia de floculación del Cat St3 con varios floculantes comerciales, el floculante comercial Magnafloc 351 (Mag 351) mantiene la turbidez baja para un amplio rango de dosificación de polímero, sin embargo el desempeño del Cat St3 es bueno frente a los demás floculantes comerciales evaluados. La Figura 8b muestra los resultados.

Figura 8. Resultado test de jarras para suspensión de sílice: a) Adición de almidón (St), almidón injertado con poliacrilamida (St-g-PAM) y almidón catiónico 3 (Cat St3) como floculantes. b) Adición de almidón Cat St3 y floculantes comerciales



Fuente: Tomado de: (Pal *et al.*, 2005)

Adicionalmente otros estudios referencian la preparación de almidones catiónicos mediante el procedimiento descrito anteriormente, el estudio de sus propiedades físico-químicas y la evaluación de sus características como floculantes en los procesos de tratamiento de aguas. En general todos los materiales exhiben resultados satisfactorios en cuanto a la eliminación de turbidez de suspensiones modelo de caolín y bentonita (Pang *et al.*, 2013; Elgadir *et al.*, 2012; Ziółkowska *et al.*, 2011; Ziółkowska y Shyichuk, 2011; Muñoz *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2009; Xing *et al.*, 2005).

Otros polímeros naturales que se han utilizado exitosamente en Inglaterra son la hidroxietil celulosa (HEC) y el “Wisprofloc”, derivado del almidón de patata (Schulz y Okun, 1998).

También se han estudiado mezclas de polímeros naturales al igual que almidones catiónicos altamente sustituidos. Por ejemplo You *et al.*, (2009) estudiaron el desempeño de un floculante basado en una mezcla de almidón de maíz y quitosan (CATCS). Las propiedades de floculación fueron evaluadas en una suspensión de caolín en términos de transmitancia, eliminación de los contaminantes orgánicos y sustancias sólidas en suspensión. El rendimiento del CATCS se comparó frente a otros agentes floculantes como almidón catiónico de maíz, quitosan, poliacrilamida y sulfato de hierro. Los resultados evidencian mejor desempeño del floculante CATCS frente a la dosis aplicada y cambios de temperatura y pH.

En relación a los almidones catiónicos altamente sustituidos, Šablevičienė *et al.*, 2005 estudiaron polisacáridos catiónicos preparados a partir de hidrolizados de almidón hidroxietilado y de fécula de patata, para la desestabilización de una dispersión de caolín. Los autores evaluaron la velocidad de sedimentación de la fase dispersa en términos del grado de sustitución (DS), el peso molecular, los grupos amonio cuaternario y dispersión de los almidones catiónicos. Los resultados muestran diferencias entre los dos almidones catiónicos en relación al comportamiento en solución acuosa; por ejemplo los almidones catiónicos obtenidos a partir de almidón hidroxietilado son solubles en agua (*water-soluble cationic starches-SCS*), mientras que los almidones catiónicos obtenidos a partir de almidón de patata forman una dispersión coloidal transparente (*water-dispersible cationic starches-DCS*). En términos de eficiencia de floculación los SCS alcanzaron la eficiencia máxima para valores de DS que varían de 0,28 hasta 0,37 y dosis entre 7,3 y 6,5 mg/g; en tanto que los DCS con valores de DS entre 0,27 y 0,32 y una dosis de 16 mg/g alcanzan la eficiencia máxima. Esto último se debe a que el peso molecular de los DCS es más alto. Por lo tanto el estudio concluye que los DCS son mejores floculantes debido a que su eficiencia es casi dos veces más alta en comparación con los SCS.

Finalmente, la modificación de almidones ha permitido obtener nuevos polímeros con mejores características y propiedades de coagulación y floculación; por lo tanto son más eficaces para la remoción de materia orgánica en suspensión en los

procesos de potabilización de agua y tratamiento de agua residual. Por ejemplo la amilopectina, es un polímero modificado de alto peso molecular y estructura altamente ramificada que se usa como coagulante–floculante para la remoción de NOM y otros contaminantes del agua(Pal *et al.*, 2006).

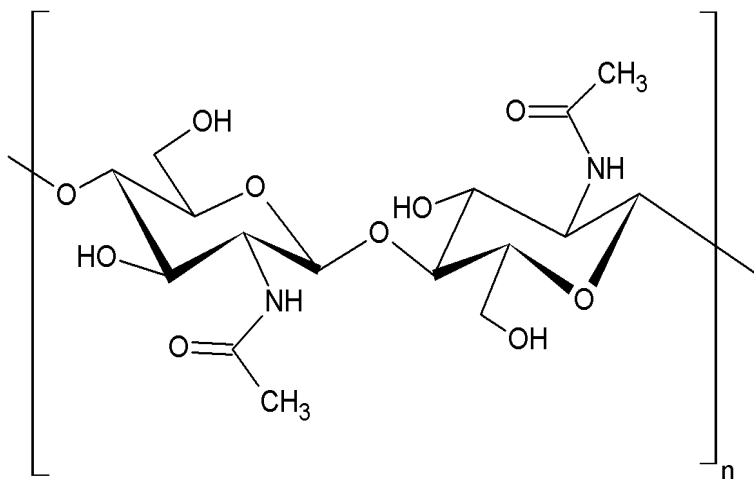
2.2. QUITINA Y QUITOSAN.

La quitina (Figura 9) es el polímero más abundante en la naturaleza después de la celulosa. Está compuesta de unidades de N-acetilglucosamina (N-acetil-D-glucos-2-amina), distribuida al azar y unidas entre sí con enlaces β -1-4 para producir una estructura rígida no ramificada. En la naturaleza existe como microfibrillas cristalinas ordenadas haciendo parte de los componentes estructurales del exoesqueleto de los artrópodos o las paredes celulares de los hongos y levaduras.

Dentro de las características más importantes de la quitina esta su alto peso molecular que la hace insoluble en agua, álcalis diluidos y concentrados, alcohol y en algunos disolventes orgánicos. También, tiene alta densidad carga formal positiva y es empleada como agente de quelación en la remoción de metales disueltos en medios acuosos (Colina *et al.*, 2014; Rinaudo, 2006). Además, por tratarse de un polímero natural es inocuo en el medio ambiente y no genera contaminación secundaria a diferencia de los floculantes y coagulantes convencionales a base de sales de hierro, aluminio y químicos fuertes.

La quitina y sus derivados se usan como agentes coagulantes-floculantes en la eliminación de NOM(*Natural Organic Matter*)y metales pesados en aguas para consumo humano, y precipitación de algunos residuos aniónicos y captura de contaminantes como el DDT y PCB's en tratamiento de aguas residuales (*Great Vista Chemicals*)

Figura 9. Estructura molecular de la Quitina



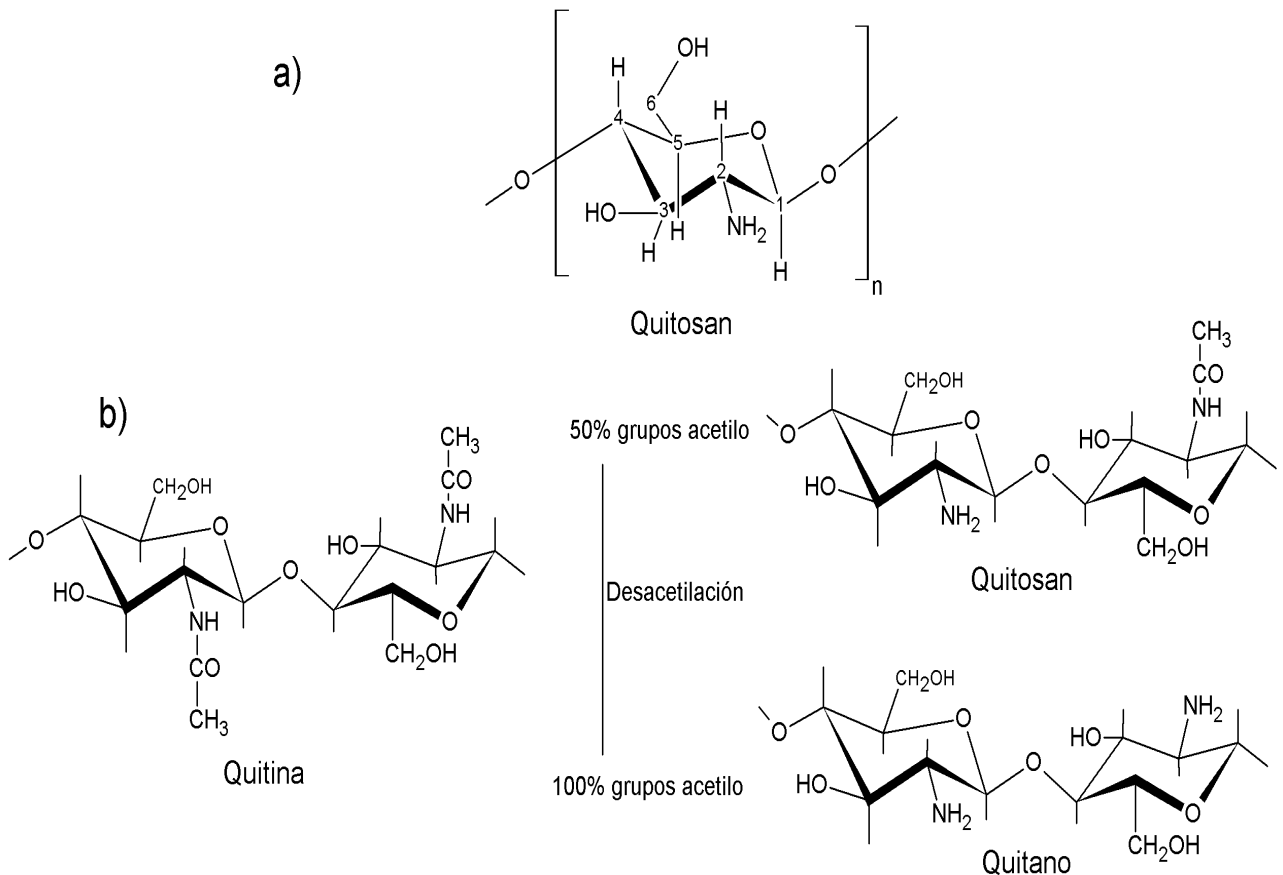
Fuente: Los autores

Entre los derivados más comunes de la quitina se destaca el quitosán por sus múltiples propiedades y aplicaciones industriales.

El quitosán es un polímero natural de alto peso molecular, compuesto de cadenas distribuidas aleatoriamente: unidades desacetiladas de β-(1-4) D-glucosamina y unidades acetiladas de N-acetil-D-glucosamina. La estructura molecular del quitosán (Figura 10a) presenta un grupo amino (C₂) y dos grupos hidroxilo (C₃ y C₆). Se obtiene por desacetilación de la quitina (N-acetilglucosamina) con soluciones ácidas y básicas (NaOH o KOH) y altas temperaturas (>100°C).

La desacetilación completa de la quitina produce un material totalmente soluble en medio ácido conocido como quitano. Cuando la desacetilación del material de partida es incompleta se crea una mezcla de cadenas que tienen distintas proporciones de unidades β(1-4)-2-acetamido-2-desoxi-D-glucosa y β(1-4)-2-amino-2-desoxi-D-glucosa. La relación del número de cadenas producidas depende de las condiciones de reacción, por lo tanto se generan materiales con distintas propiedades conocidos como quitosán. Las estructuras químicas del quitano y el quitosán se muestran a continuación: (Figura 10).

Figura 10.a) Estructura molecular quitosan y b) Relación estructural entre la quitina, el quitosan y el quitano.



Fuente: Los autores

Dentro de las características más importantes del quitosan se destaca su solubilidad en medios ácidos y soluciones neutras y la presencia del grupo amino que le otorga densidad de carga positiva. La solubilidad es debida a que durante el proceso de desacetilación la quitina pierde parte de los grupos acetilo para convertirse en quitosan (Dutta *et al.*, 2008; Velásquez, 2006; Renault *et al.*, 2009; Zenga *et al.*, 2008). Además de su eficiencia como quelante, este material puede interactuar con diversos contaminantes, como material suspendido y sustancias disueltas (Guibal, 2004).

Por otra parte, el quitosan es un polímero biodegradable y no tóxico, debido a la acción hidrolítica de algunas enzimas propias del polímero (quitosanasas, lisozimas, pectinasas, lipasas, dextranasas, pancreatina, pepsina y papaina), por lo tanto no

genera impacto negativo o a largo plazo en la salud humana y los ecosistemas. Tiene propiedades que le permiten unirse a algunos metales, con una afinidad mayor o menor y variable en función del pH, fuerza iónica y presencia de otros metales. Además el quitosan es una alternativa viable como coagulante primario en la eliminación de la materia suspendida de aguas residuales de alta turbidez y alta alcalinidad

Varios estudios demuestran que el quitosan es un coagulante-floculante eficaz para tratamiento de aguas, que puede reducir entre 70-98% del material suspendido, y entre 55-80% de la demanda química de oxígeno. Actualmente en Japón se usa quitosan como coagulante-floculante en aproximadamente 50% de las plantas de tratamiento de aguas; otros países asiáticos también lo usan en diversas proporciones. La Tabla 2 resume las características y aplicaciones principales del quitosan.

Tabla 3. Principales características y aplicaciones del quitosan

CARACTERISTICAS
<ul style="list-style-type: none"> • No es toxico • Biodegradable. • Recurso renovable. • Polímero ecológicamente aceptable (eliminando los polímeros sintéticos, con el medio ambiente). • Eficaz contra las bacterias, virus, hongos. • Remoción de contaminantes con capacidad vinculante de contaminantes-pendientes. • Capacidad para formar enlaces de hidrógeno intermolecular. • Capacidad para encapsular. • Formación de sales con ácidos orgánicos e inorgánicos.
APLICACIONES
<ul style="list-style-type: none"> • Floculante para aclarar el agua (agua potable, piscinas) • Reducción de la turbiedad en los efluentes de procesamiento de alimentos • Coagulación de sólidos en suspensión, minerales y suspensiones orgánicas • Floculación de suspensiones bacterianas • Interacciones con moléculas cargadas negativamente • Recuperación de productos valiosos (proteínas ...) • Quelación de iones metálicos • Eliminación de las moléculas de colorante por procesos de adsorción

-
- Ultrafiltración asistida
 - Tratamiento de lodos
 - La filtración y separación
 - Reducción de los olores
-

Fuente: Los autores

Muchos trabajos de investigación se enfocan en evaluar el desempeño del quitosan como agente coagulante-floculante para diferentes aplicaciones: eliminación de NOM (Bolto *et al.*, 2004; Zenget *et al.*, 2008), sustancias húmicas (Bratskaya *et al.*, 2002; Kvinnesland y Odegaard, 2004; Vogelsang *et al.*, 2005; Bratskaya *et al.*, 2004), suspensiones inorgánicas (Roussy *et al.*, 2005; Roussy *et al.*, 2004; Divakaran y Pillai, 2001; Divakaran y Pillai, 2002; Dotto *et al.*, 2013; Jadhav y Mahajan, 2013), moléculas de colorante (Guibal *et al.*, 2006; Guibal y Roussy, 2007; Crini y Batot, 2008; Szygula *et al.*, 2009;) y cationes metálicos (Assaad *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2008) entre otras.

En conjunto los autores demuestran que el quitosan tiene características intrínsecas que favorecen su uso como coagulante en la eliminación de contaminantes en aguas. También establecieron el mecanismo de acción para la desestabilización de las suspensiones coloidales: neutralización de la carga y por la formación de puentes de hidrógeno. Además, debido a la biodegradabilidad del polímero los lodos producidos durante el tratamiento se pueden eliminar fácilmente en comparación con los generados por el uso de coagulantes-floculantes de polímeros sintéticos y de compuestos inorgánicos.

Divakaran y Pillai, (2001) emplearon el quitosan para la eliminación de partículas de caolinita en suspensión, en un rango de pH de 5-9 y turbidez de 10 a 160 NTU. Para una dosis de 1,0 mg/L de polielectrolito, evaluaron la remoción de turbidez en función del cambio de pH y encontraron que el quitosan produce una eliminación apreciable de turbidez en un intervalo de pH de 6,5 y 7,5, sin embargo la máxima remoción (90%) se alcanza a un pH de 7,5, mientras que la caída de turbidez residual alcanza valores por debajo de 5NTU. En función de la concentración de floculante observaron que el quitosan es eficaz con dosis menores a 0,75 mg/L y dosis superiores a 1mg/L, pero la eficiencia máxima se obtuvo con una dosis de

1 mg/L. Además los flóculos producidos son gruesos y se sedimentan rápidamente, el quitosán no es tóxico, es biodegradable y el lodo producido puede ser dispuesto de manera segura fuera de los vertederos. Por su parte Roussy *et al.*, (2005) usaron el quitosán en el tratamiento de suspensiones de bentonita y obtuvieron resultados favorables en cuanto a porcentajes de remoción. Por ejemplo, usando cantidades pequeñas de aproximadamente 0,02 mg/L de quitosán para valores de pH de 5 y 7, lograron la eliminación de casi un 95% de la turbidez (después de una previa sedimentación en ausencia de quitosán). Además los flóculos producidos mostraron buenas características en cuanto a tamaño, estabilidad y velocidad de sedimentación. Los autores proponen además un mecanismo de acción dual para el proceso: neutralización de carga y la floculación por formación de puentes.

En la eliminación de sedimentos de agua de río por floculación, Divakaran y Pillai, (2002) emplearon quitosán en un rango de pH de 4-9. Los autores demostraron que el quitosán reduce de forma eficaz la turbidez del agua con una dosis óptima de 0,5 mg/L, independientemente de la concentración de sedimentos en el agua. También observaron que a concentraciones altas de limo en el agua, el tamaño de los flóculos y velocidad de sedimentación aumentan significativamente. Por otra parte para tratamiento de materiales húmicos del agua, Guibal *et al.*, (2006) demostraron que el quitosán puede ser usado como coagulante primario o como floculante.

Recientemente, Fabris *et al.*, (2010) evaluaron el desempeño del quitosán como coagulante para tratamiento de agua potable. Los resultados demostraron que este biopolímero natural es capaz de remover partículas suspendidas del agua permitiendo disminuir la dosis de cloro necesaria en la etapa de desinfección. También Huang *et al.*, (2000) afirman que por su eficiencia en la coagulación y por no presentar ningún riesgo para la salud humana, el quitosán se considera como un sustituto del alumbre y las poliacrilamidas; además durante los ensayos realizados para la coagulación de partículas coloidales mediante quitosán modificado, determinaron que la dosis óptima (0,3 mg/L) es menor en comparación con la de poliacrilamida reportada en la literatura (0,4 mg/L).

Coagulantes a base de quitosan producen flóculos más grandes de mejor calidad y alta velocidad de sedimentación (Pan *et al.*, 1999).

Por otra parte, para la remoción de color en aguas como tratamiento primario, el quitosan también ha mostrado buenos resultados. Por ejemplo Roussy *et al.*, (2005); Roussy *et al.*, (2005); Roussy *et al.*, (2004); Guibal *et al.*, (2006); Guibal y Roussy (2007) realizaron estudios sobre la capacidad del quitosan para actuar como coagulante de suspensiones de partículas y sustancias disueltas. Estos estudios demostraron que el color puede ser removido por adsorción sobre quitosan en estado sólido y por coagulación-floculación usando quitosan en estado acuoso. Cuando se usa el polímero disuelto la reactividad de los grupos amino se incrementa significativamente. Esto es debido a que el uso de quitosan en estado acuoso mejora la accesibilidad y disponibilidad de sitios activos en comparación con el estado sólido (Guibal y Roussy 2007). La comparación de los valores de saturación para la adsorción y la coagulación-floculación mostraron que la relación molar entre los grupos amino del biopolímero y los grupos sulfónicos de las moléculas de colorante fue mucho mayor cuando se usa quitosan en el estado disuelto (coagulación-floculación) que cuando se usa sólido (adsorción).

El mecanismo de acción asociado al uso de quitosan como coagulante-floculante depende principalmente de la dosis de coagulante y el pH. La dosis óptima de coagulante-floculante está relacionada con la concentración del contaminante, por lo tanto se puede controlar la dosificación del biopolímero mediante la determinación de la concentración de contaminantes de la solución. El efecto del pH está relacionado la adición de protones de los grupos amino del biopolímero, cambios en la conformación de la cadena de las macromoléculas (repulsión de la cadena) y la estructura de los flóculos.

Por ejemplo con soluciones neutras el biopolímero produce flóculos más grandes y más densos. En soluciones ácidas, la conformación de la estructura del biopolímero cambia por la neutralización de la carga positiva del quitosan frente al ion negativo de la solución. Por lo tanto el quitosan se convierte en una cadena

más extendida (más cargada) y por lo tanto produce flóculos más flexibles y más pequeños (Huang *et al.*, 2000).

El peso molecular y la concentración del biopolímero también están relacionados con sus propiedades de coagulación-floculación. Por ejemplo Guibal *et al.*, (2006) demostraron que el peso molecular del quitosan no afecta la coagulación-floculación de los ácidos húmicos. Para el caso de suspensiones de bentonita, Roussy *et al.*, (2005) observaron que el quitosan con peso molecular bajo (< 300000 g/mol) es menos eficaz que el de alto peso molecular (>300000g/mol), aunque la mejora de la eficacia del biopolímero tiende a estabilizarse cuando el peso molecular supera los 100.000 g/mol; esto sugiere que el tamaño de las moléculas de quitosan podría tener un efecto importante en la configuración del quitosan con la interface agua- bentonita. En este contexto, Davydova *et al.* (2000) informaron que el quitosan de bajo peso molecular representa macromoléculas lineales flexibles que pueden sufrir cambios estructurales, mientras que el quitosan de alto peso molecular forma estructuras asimétricas más rígidas cuya conformación no varía significativamente, por lo tanto el quitosan de alto peso molecular tiene una mayor constante de enlace. Posiblemente el quitosan con peso molecular inferior podría haber unido un mayor porcentaje de grupos amino en la superficie de partículas de bentonita, que inhiben la extensión de los "bucles" de polímero en la solución y por lo tanto impiden el contacto entre el quitosan y las partículas de bentonita. En aplicaciones para suspensiones de caolinita realizadas por Divakaran y Pillai, (2001), la influencia del peso molecular no fue muy marcada.

En relación a la forma de acción del quitosan como floculante, los autores han planteado varios mecanismos mediante el cual se lleva a cabo el proceso; se destacan los efectos de parche electrostático y fenómenos de agregación, sin embargo los más comunes son la neutralización de carga y coagulación-precipitación.

Por otra parte, los trabajos de investigación analizados permiten concluir que el quitosan ofrece una alternativa prometedora para la coagulación-floculación en los procesos de potabilización de agua, frente a la utilización de compuestos inorgánicos o polímeros sintéticos.

2.3. COAGULANTES-FLOCULANTES DE ORIGEN VEGETAL.

En la literatura científica se ha referenciado el uso de muchos coagulantes-floculantes de origen vegetal (además del almidón) para tratamiento de aguas, sin embargo entre los más estudiados en los últimos años se destacan las semillas de Nirmali (*Strychnos potatorum*), *Moringa oleífera*, tanino y cactus.

El uso de coagulantes-floculantes de origen vegetal se remonta a la antigüedad, por ejemplo escrituras en sánscrito procedentes de la India y fechadas 40 siglos antes de Cristo, mencionan el uso de las semillas del árbol Nirmali (*Strychnos potatorum*) para clarificar aguas pluviales turbias. Análogamente en Perú, el agua se ha clarificado tradicionalmente con la savia mucilaginoso de “pencas” obtenidas de ciertas especies de cactáceas (Kirchmer *et al.*, 1975); mientras en varios países de África (Chad, Nigeria, Sudán y Túnez) los aldeanos añaden plantas nativas al agua con el fin de reducir la turbiedad, los olores y los sabores desagradables (Jahn, 1979).

Existen también sustancias naturales que pueden usarse como coadyuvantes de coagulación en procesos de tratamiento de aguas; por ejemplo Qudsieh *et al.*, (2008) prepararon un coagulante de poliacrilamida combinado con almidón extraído de la palma de Sagú (*Metroxylunsagu*). Los resultados muestran reducción del 97% en la turbidez de soluciones estándar de caolinita. Nkurunziza *et al.*, (2009) estudiaron las propiedades coagulantes de *Moringa oleífera* como coagulante en el tratamiento de aguas superficiales de alta turbiedad.

Por otra parte, también se han estudiado coagulantes-floculantes de origen vegetal para el tratamiento de aguas industriales. Por ejemplo, Beltrán *et al.*, (2009) emplearon dos agentes coagulantes naturales: taninos y un extracto de la semilla de *Moringa oleífera*. Ambos agentes demostraron altas eficiencias de

remoción de colorantes sintéticos, aunque los autores sugirieron que la concentración del colorante es un factor clave en el desempeño del proceso de coagulación-floculación.

Recientemente Anastasakis *et al.*, (2010) estudiaron el carácter floculante del mucílago de plantas herbáceas de la familia Malvaceae, *Malva sylvestris* (malva) y *Hibiscus esculentus* (okra) frente a la adición de sales de aluminio como coagulante. Los resultados demostraron que el mucílago de okra es más eficiente; con una dosis óptima de 5mg/L alcanza remoción de turbidez de 96–97.3%, mientras que el de malva con una dosis óptima de 12 mg/L redujo la turbidez en un 96.3–97.4%. Ambos mucilagos demostraron ser buenos floculantes en cuanto a remoción de turbidez; sin embargo en las pruebas no se observó disminución en el contenido de carbono orgánico disuelto. Los autores sugieren que la naturaleza orgánica de los floculantes evita la disminución de este parámetro en el agua.

Finalmente en Latinoamérica, se ha realizado mucha investigación sobre las propiedades clarificantes de extractos de nopal mexicano (*Opuntia ficus-indica*), la *Moringa oleífera* y otras especies vegetales.

A continuación se describen con más detalle los biopolímeros estudiados en este campo.

2.3.1. Semillas de Nirmali (*Strychnos potatorum*). El Nirmali (*Strychnos potatorum*) es un árbol de tamaño moderado que se encuentra en el sur y centro de la India, Sri Lanka y Birmania. Su extracto (frutos, semillas y raíces) se utiliza principalmente en la medicina tradicional (Yin, 2010). Adicionalmente las semillas de esta especie vegetal se utilizan para aclarar el agua turbia desde hace más de 4000 años; esto indica que fueron los primeros coagulantes a base de plantas usados y reportados para el tratamiento del agua.

Los extractos de semillas Nirmali son polielectrolitos aniónicos que desestabilizan las partículas en agua por medio de puentes entre partículas. Algunos estudios realizados han establecido que el extracto de semillas también contiene lípidos, hidratos de carbono y alcaloides que contienen grupos superficiales -COOH y OH-

que mejoran la capacidad de coagulación de los extractos (Rajendran *et al.*, 2013;Deshmukh *et al.*, 2013).

Análisis de la composición química del extracto de *Strychnos potatorum* muestra la presencia de un polisacárido, compuesto por una mezcla 1:1,7 de galactomanano y galactano. Los galactomananos se componen de una cadena principal de D-manopiranosilos unidos entre sí por enlaces β -1,4; estas moléculas también contienen además residuos terminales de unidades α -D-galactopiranosil unidas mediante enlaces α 1-6 (Corsaro *et al.*, 1995). Estas sustancias tienen propiedades coagulantes y floculantes capaces de reducir hasta en un 80% la turbidez de suspensiones de modelo de caolín en agua (Adinolfi *et al.*, 1994).

El mecanismo de coagulación asociado con los extractos de la semilla de Nirmali no se ha establecido aún, y se cree que la presencia de muchos grupos $-OH$ unidos a lo largo de las cadenas de galactomanano y galactano proporciona sitios de adsorción débiles que conducen a la formación de interacciones de tipo puente de hidrogeno entre partículas y que logran el efecto coagulante (Rajendran *et al.*, 2013). Por esta razón los extractos de semillas de Nirmali pueden funcionar como un material polimérico coagulante de partículas coloidales, y como coadyuvante de coagulación en la clarificación de agua turbia.

Varios trabajos de investigación han estudiado coagulantes-floculantes obtenidos de extractos de semillas de Nirmali. Por ejemplo Raniy Jadhav, (2012) evaluaron las propiedades coagulantes de tres extractos diferentes de especies vegetales (*Strychnos potatorum*, *Cactus opuntia* y *Coccinia indica*) para la clarificación de agua turbia. Los autores demostraron que los tres extractos fueron eficientes para remoción de turbidez. Para el caso de las semillas de Nirmali se observó una reducción significativa en los valores de turbidez desde 14 NTU hasta 0 NTU.

Deshmukh *et al.*, (2013) compararon la eficiencia de coagulación del extracto de *Strychnos potatorum* con la de un coagulante químico (alumbre) en una suspensión modelo compuesta por arcillas y algas *in-vivo*. Estos autores demostraron que dosis bajas (0,25-3,5 mg/L) de los extractos de las semillas de Nirmali son eficientes cuando se usan para tratar aguas con turbiedades altas

(1000-3000 NTU); mientras que las dosis de alumbre son más elevadas y varían desde los 2-220 mg/L. Además se obtuvieron reducción en la turbidez de 94,08 % y 99,70 % con *Strychnos potatorum* y alumbre respectivamente.

Por su parte Jadhava y Mahajan, (2013) estudiaron el comportamiento de la coagulación-floculación con extractos de semillas de Nirmali, goma de Okara y el mucílago aislado de los frutos deKundururu (*Coccinia indica*). Los experimentos se realizaron con agua turbia sintética, para diferentes valores de turbidez y pH. Los resultados muestran que los extractos de Kunduru, goma Okara y semillas de Nirmali tienen buenas propiedades floculantes en aguas de alta turbidez. Además el cambio en el pH del agua tratada es poco, y la calidad en el tamaño de los flóculos producidos es buena.

De igual forma para aguas con diferentes grados de color, turbidez y contenido microbiano Sarawgi *et al.*,(2009) estudiaron el efecto del polvo de semilla de Nirmali. Lograron porcentajes de reducción en la absorbancia (medida de la turbidez) entre 82-98% y reducción de la carga microbiana heterotrófica del 99%. Además demostraron la no toxicidad de la semilla para las concentraciones ensayadas.

Otros estudios comparan el comportamiento de las semillas de Nirmali, maíz, *Moringa oleífera* con el alumbre como coagulante convencional. Raghuwanshi *et al.*, (2002)reportaron como dosis optimas 25 y 15 mg/L de semillas de Nirmali y maíz respectivamente para el tratamiento de agua turbia, y la turbidez del filtrado alcanzó valores por debajo de 0,2 NTU, mientras que el alumbre con una dosis de 45 mg / L logró niveles de turbidez superiores 1 NTU. El comportamiento de las semillas de *Moringa oleífera* y maíz como coadyuvantes de coagulación es comparable al del alumbre.

De otro lado Maruthi *et al.*, (2013) estudiaron el potencial de las semillas de Nirmali en una superficie sólida y como biosorbente en la eliminación de metales y agentes patógenos. Obtuvieron resultados satisfactorios con porcentajes de remoción cercanos al 80% y la inhibición de número de Coliformes.

Rajendran *et al.*, (2013) citaron otras investigaciones, en las cuales también se evaluó el comportamiento de las semillas de Nirmali como coagulantes en diferentes suspensiones. Los resultados son similares a los de otras investigaciones, por lo tanto el uso de extractos de semillas de Nirmali como agentes coagulantes-floculantes puede ser una alternativa sustentable en el tratamiento de agua para consumo humano.

2.3.2. *Moringa Oleífera.* *Moringa oleífera* es una planta tropical cuyas semillas contienen aceite y harina comestibles (Nabigengesere *et al.*, 1995). Una fracción cercana al 1% del contenido proteico de las semillas está constituida por proteínas catiónicas activas de alto peso molecular. Estas proteínas otorgan propiedades coagulantes a la *Moringa oleífera* y permiten neutralizar y precipitar NOM (*Natural Organic Matter*) del agua al igual que lo hacen los coagulantes convencionales (Foidl *et al.*, 2001).

Las propiedades y mecanismos de acción asociados al uso de semillas de *Moringa oleífera* como coagulante han sido estudiados por muchos autores. Por ejemplo Ndabigengesere *et al.*, (1995) sugieren que los agentes activos que actúan como coagulantes catiónicos son proteínas diméricas con alto peso molecular (12-14 kDa) y punto isoeléctrico entre 10 y 11. Además el mecanismo de coagulación asociado está dado por adsorción y neutralización de carga. Por su parte Gassenschmidt *et al.*, (1995) a partir de las semillas de *Moringa oleífera*, por extracción con una solución tampón de fosfato y Cromatografía de Intercambio catiónico, aislaron la proteínas que actúan como floculantes. Además mediante electroforesis en gel de poliacrilamida con dodecilsulfato sódico (SDS-PAGE-*sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis*) determinaron que la masa molecular de la proteína es 6,5 kDa con punto isoeléctrico por encima de pH 10. La actividad floculante de la proteína está asociada a parches de carga, debido al bajo peso molecular y alta densidad de carga. De igual forma Ghebremichael *et al.*, (2005) extrajeron y caracterizaron la proteína floculante de *Moringa oleífera*.

Plantearon como agente floculante una proteína catiónica con masa molecular inferior a 6,5 kDa y punto isoeléctrico mayor que 9,6.

La mayoría de los trabajos de investigación coinciden en que el agente activo es una proteína catiónica, pero podría haber más agentes coagulantes no identificados en la *Moringa oleífera* con un grado menor en la capacidad de coagulación. Rodríguez *et al.*, (2005) emplearon solventes como agua, tolueno y propanona para extraer los componentes activos de la *Moringa oleífera*; aislaron las proteínas catiónicas a través de Cromatografía de Intercambio catiónico usando una matriz de tipo aniónico y evaluaron sus propiedades floculantes de las proteínas obtenidas mediante análisis estadístico.

En relación con su desempeño, la *Moringa oleífera* además de destacarse por su buena capacidad de coagulación-floculación, es biodegradable, no tóxica y no afecta significativamente el pH y la conductividad del agua tratada. Los lodos producidos durante el tratamiento son inocuos y su volumen es menor (entre cuatro y cinco veces) que los lodos producidos por la coagulación con Sulfato de Aluminio (Bhatia *et al.*, 2007). Todas estas características y propiedades han sido la base fundamental para nuevos trabajos de investigación enfocados principalmente al uso de la *Moringa oleífera* como coagulante-floculante en la potabilización y tratamiento de agua.

Otros autores han propuesto la modificación de *Moringa oleífera* para el mejoramiento de la interacción electrostática y la neutralización de carga en sistemas acuosos. Por ejemplo, mediante la protonación o adición de cationes bivalentes (Ca^{2+} y Mg^{2+}) se aumenta significativamente el efecto coagulante de los extractos de *Moringa oleífera*. Esto se ha investigado con suspensiones de caolín en las que los cationes añadidos posiblemente adsorben los componentes activos para formar una estructura similar a una red insoluble y capturar partículas de caolín (Okuda *et al.*, 2001).

Investigaciones más recientes se enfocan en la evaluación de la capacidad de coagulación-floculación de *Moringa oleífera* para la eliminación de turbidez, microbios y metales. Por ejemplo estudios comparativos de *Moringa oleífera* y

sulfato de aluminio para el tratamiento de suspensiones de caolín demostraron que *Moringa oleífera* es una alternativa viable como coagulante en el tratamiento de agua potable (Ndabigengesere *et al.* 1998). También Folkard *et al.*, (1993) usaron *Moringa oleífera* como coagulante primario para aclarar agua de río en un sistema de tratamiento a escala piloto. La fuente de agua usada mostró una turbidez relativamente constante de 1000 NTU durante el período de prueba. Con dosis de coagulante de 100 mg/L obtuvo más del 90% en eliminación de turbidez en la etapa de sedimentación. Después de la filtración, la turbidez se redujo por debajo de 1NTU.

Así mismo McConnachie *et al.*, (1999) determinaron el potencial de *Moringa oleífera* como coagulante dentro de un contacto floculación-filtración (CFF) de planta piloto para aguas crudas de baja turbidez (<50 NTU). En este sistema el coagulante se dosifica inmediatamente antes de la entrada al lecho de arena. Con este sistema y el uso de *Moringa oleífera* los resultados mostraron reducción de la turbidez hasta valores menores de 1 NTU después de la filtración y una tasa de filtración hasta de 10 m³/m²/h. Por otra parte, la dosis de semillas de *Moringa oleífera* requerida es relativamente baja (<25 mg/L) y los tiempos de funcionamiento del filtro son apropiados para que la planta opere de forma eficiente.

En otro estudio, las semillas de *Moringa oleífera* se evaluaron como coagulante primario a escala real en una planta de tratamiento de agua. La prueba se hizo durante 7,5 horas con un flujo de 60 m³/h y una dosis de coagulante de 75 mg /L. La turbidez de entrada fue más de 325 NTU y la salida del filtro consistentemente por debajo de 2 NTU(Sutherland *et al*, 1994). De igual forma en Venezuela *Moringa oleífera* se usó como coagulante en la potabilización de aguas crudas de la planta de tratamiento Alonso Ojeda en Maracaibo. Estudiaron parámetros como la turbidez, color, pH y alcalinidad para agua con valores de turbidez comprendidos entre 7 y 49 NTU. Los resultados indican que para dosis de 10 y 20 ppm el extracto acuoso de *Moringa oleífera* utilizado en el proceso de coagulación remueve la turbidez desde 49, 29, 20, 15, 11 y 7 NTU a valores iguales o por

debajo de los establecidos por las Normas de Calidad del Agua de Venezuela (5 NTU)(Mendoza *et al.*, 2000).

En Honduras también se realizó un estudio sobre la validación de la efectividad de la semilla de *Moringa oleífera* como coagulante natural del agua destinada al consumo humano. En este estudio Núñez, (2007) obtuvo una eficiencia de un 98% usando semillas con cascara y un 93% sin cascara en aguas con turbidez comprendida entre 150 y 500 NTU, aunque funciona mejor para turbidez alta. También para aguas de baja turbidez se empleó *Moringa oleífera* como coagulante. Se evaluó el comportamiento en función del método y el solvente usado en la extracción del componente activo; se obtuvieron porcentajes de remoción del 69% en agua turbia sintética de caolín y usando NaCl como agente extractor. (Gómez, 2010). De igual forma Theodoro y Bergamasco.,(2013) realizaron un estudio sobre la extracción del polímero natural y el uso de este como agente coagulante para la eliminación de turbidez de una suspensión de caolín. Estos autores demostraron que la extracción del polímero con una solución salina natural de BaCl₂ mejora el porcentaje de eliminación de turbidez en un 98,6% y 99,40% del agua con turbidez inicial de 50 y 150 NTU respectivamente. Además los valores de las turbiedades residuales del agua tratada fueron 0.70 y 0.90 NTU para los dos valores de turbidez estudiados.

En la india el extracto de semillas de *Moringa oleífera*, se ha estudiado ampliamente como coagulante natural en el tratamiento de aguas. Los resultados de las investigaciones muestran reducciones de turbidez en el agua del 80 y 99% (Bhatia *et al.* 2007).

También en Colombia Melo y Turriago., (2012) evaluaron la eficiencia de *Moringa oleífera* para la purificación de aguas superficiales. La *Moringa oleífera* removió el 84% de los sólidos suspendidos, pasando de 230NTU a 36NTU en el agua tratada. Esto demuestra una posibilidad viable y eficiente para la aplicación de este floculante natural en el tratamiento de aguas.

Por su parte Ali *et al.*, (2009) extrajo los componentes bioactivos de *Moringa oleífera* y evaluó su capacidad de coagulación-floculación en la remoción de

turbidez para tres aguas de río: valores altos, medios y bajos de turbidez. Los resultados se muestran en la Tabla 4. Las dosis de coagulante son pequeñas y el volumen de lodos producidos es menor. También la turbidez residual para todas las muestras evaluadas es menor que 5 NTU, rango estándar de la organización mundial de la salud (OMS) en términos de agua potable.

Tabla 4. Resultado test de jarras para *M. oleífera*

Turbidez inicial (NTU)	Dosis de coagulante <i>M. oleífera</i> (mg/L)	Turbidez residual	Remoción de turbidez (%)
Bajo (43,9)	0,05	1,99	95,5
Medio (91)	0,15	1,40	98,5
Alto (333)	0,30	2,20	99,3

Fuente: Adaptado de: (Ali *et al.*, 2009)

Por otra parte la *Moringa oleífera* también se ha usado en la remoción de metales. Mas *et al.*, (2013) determinaron en términos de remoción la eficiencia de las semillas de *Moringa oleífera* para la remoción de metales (Ba, Cd, Cu, Fe, Ni, Zn, Cr, Li, Pb, Se) en aguas de baja turbiedad. Con una dosis óptima de 25 mg/L se obtuvo un 87,4% de remoción con turbidez inicial de 40 NTU. Las semillas de *Moringa oleífera* lograron reducir la concentración de los metales Cd, Cu, Zn, Fe y Ni en un 71,4; 75,3; 99,2; 60,8 y 73,0 %, respectivamente.

Recientemente Asrafuzzaman *et al.*, (2013) estudiaron las semillas de *Moringa oleífera*, *Cicer arietinum* y *Dolichos lablab*, como coagulantes naturales para la reducción de turbidez y remoción de Coliformes totales en suspensiones de caolín. Evaluaron el grado de remoción de turbidez en función de la dosis de coagulante para suspensiones con turbidez alta media y baja. Los resultados se muestran en la Tabla 5. En relación con los Coliformes totales, *Moringa oleífera* muestra un 96% de remoción de las unidades formadoras de colonias.

También en la purificación de agua subterránea mediante coagulación-floculación se ha usado *Moringa oleífera* y ciertos parámetros fisicoquímicos como pH,

turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos totales (TS), dureza, cloruros, alcalinidad, acidez, color, Coliformes totales (MPN) y gérmenes (SPC) se han mejorado. Por ejemplo Mangale *et al.*, 2012 afirmaron que las semillas de *Moringa oleífera* actúan como un coagulante natural, floculante, y adsorbente en el tratamiento de las aguas subterráneas. Redujeron los niveles de dureza, turbidez, acidez, alcalinidad y cloruros entre otros, al igual que el contenido de Coliformes y otros agentes microbianos. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 5. Eficiencia en la reducción de la turbidez utilizando diferentes coagulantes y diferentes rangos de turbidez

Coagulante	Dosis (mg/L)	% de reducción de turbidez (*agua de alta turbidez)	% de reducción de turbidez (*agua de media turbidez)	% de reducción de turbidez (*agua de baja turbidez)
<i>Moringa oleífera</i>	50	86.9	65.62	56
	60	87.3	66.45	57.2
	70	89.4	67.29	58
	80	90	68.54	58.8
	90	90.8	68.95	59.2
	100	94.1	69.37	60
<i>Cicer arietinum</i>	50	93.78	74.28	62.58
	60	94.63	74.69	64.51
	70	95.15	79.18	66.12
	80	95.26	81.02	70
	90	95.47	81.42	70.96
	100	95.89	81.63	71.29
<i>Dolichos lablab</i>	50	84.5	65.10	49.71
	60	86	65.91	51.42
	70	86.6	66.73	56.28
	80	87.7	67.55	57.14
	90	88.4	67.75	59.42
	100	88.9	68.16	60.85

* Para *Moringa oleífera* (turbidez alta= 100 NTU, turbidez media = 48 NTU, turbidez baja = 25 NTU); *Cicer arietinum* (turbidez alta =95 NTU, turbidez media = 49 NTU, turbidez baja =31 NTU); *Dolichos lablab* (turbidez alta = 100 NTU, turbidez media = 49 NTU, turbidez baja = 35NTU), y para alta turbidez alumbre fue de 100 NTU

Fuente: Adaptado de:(Asrafuzzaman *et al.*, 2013)

Otros estudios también han referenciado la *Moringa oleífera* como un coagulante-floculante eficiente en la remoción de turbidez del agua: Coagulante alternativo viable y económico en el desarrollo de proyectos para la potabilización de aguas

de comunidades rurales (Espinoza *et al.*, 2013), tratamiento de aguas residuales (Bhuptawata *et al.*, 2007; Beltrán y Sánchez, 2009; Othman *et al.*, 2011; Schmitt *et al.*, 2013) y potabilización de agua (Pritchard¹ *et al.*, 2010; Pritchard² *et al.*, 2010; Silvan *et al.*, 2012; Oloruntade y Afuye, 2013; Carvalho *et al.*, 2014).

También Sánchez, *et al.*, (2013) hacen una revisión y citan otros trabajos de investigación referentes al uso de *Moringa oleífera* como coagulantes- floculantes. Resaltan la efectividad de la *Moringa oleífera* como coagulante en el tratamiento de agua y las nuevas propuestas o estudios que están en desarrollo.

Tabla 6. Parámetros estudiados antes y después del tratamiento de aguas subterráneas con polvo de semilla de *Moringa oleífera*

Parámetro	Antes del tratamiento	Después del tratamiento y varias dosis de <i>M. oleífera</i> (mg/L)			Parámetros estándar OMS/ USPH
		50	100	150	
pH	8	7	7	7,2	6,5-8,5
Turbidez (NTU)	12,4	3,5	3,2	3,1	5
Sólidos totales (mg/L)	812	512	396	394	-
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	712	350	216	212	500
Color	Marrón tenue	incoloro	Incoloro	Incoloro	Incoloro
Acidez (mg/L)	50	50	50	30	-
Alcalinidad (mg/L)	130	90	90	100	200
Cloruros (mg/L)	12	7	7	5	250
Dureza (mg/L)	190	110	110	100	500
SPC/100mL	4X10 ⁵	1X10 ⁵	1X10 ³	1X10 ²	1X10 ⁶
MPN/100mL	1600	115	20	5	Nulo

Fuente: Adaptado de: (Mangale *et al.*, 2012)

2.3.3. Cactus. La aplicación de especies de cactus para el tratamiento del agua es relativamente nueva en comparación con otros coagulantes naturales como semillas de Nirmali o *Moringa oleífera*. El género de cactus más comúnmente estudiada para el tratamiento del agua es *Opuntia* y perteneciente a la familia de las cactáceas. Se conoce comúnmente como "nopal" en México o "tuna" en América del Norte. Este tipo de cactus además de tener buenas propiedades medicinales y de servir como fuente de alimento, también se ha utilizado con éxito como coagulantes naturales (Díaz *et al.*, 1999).

La capacidad de coagulación de cactus *Opuntia* es alta y probablemente se debe a la presencia de mucílago, que es un hidrato de carbono complejo viscoso y almacenado tanto en el interior y exterior del cactus (Sáenz *et al.*, 2004). Por ejemplo para el mucílago de Cactus *Opuntia* se ha encontrado que contiene hidratos de carbono como L -arabinosa, D -galactosa, L -ramnosa, D -xilosa, y ácido galacturónico (Sáenz *et al.*, 2004). Otras investigaciones realizadas afirman que el ácido galacturónico es, posiblemente, el ingrediente activo que proporciona la capacidad de coagulación de *Opuntia*.

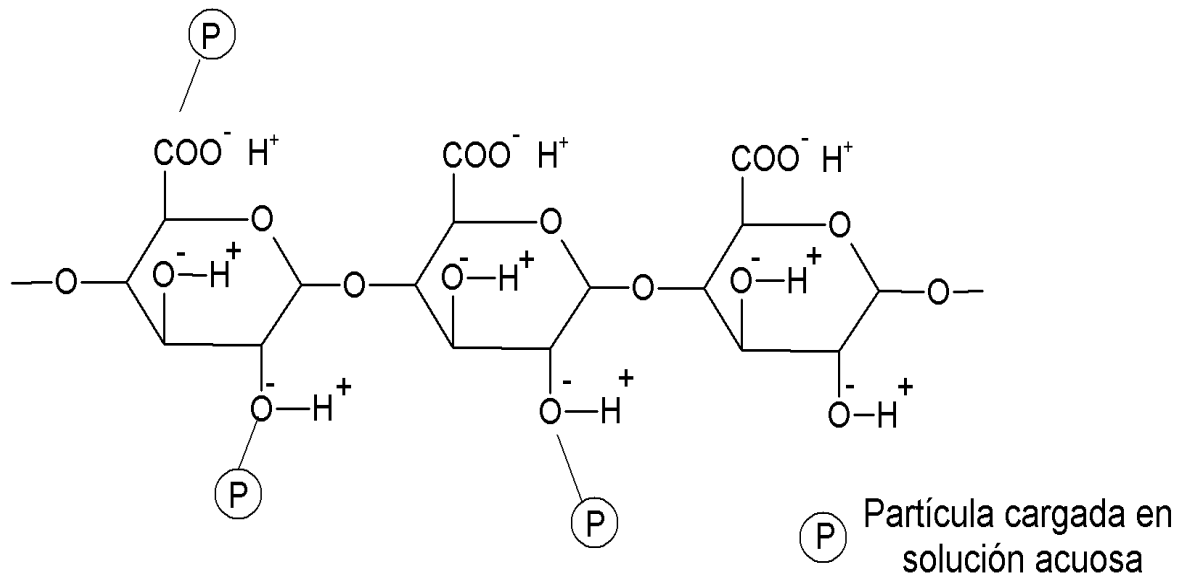
Miller *et al.*, (2008) evaluaron de forma cuantitativa la capacidad de *Opuntia* para la remoción de turbidez de una suspensión de caolín. Los resultados muestran reducción de turbidez de hasta de un 98%. En comparación con los resultados de *Moringa oleífera* descritos anteriormente, los porcentajes de remoción son similares, sin embargo los mecanismos de coagulación representan una diferencia para las dos especies. Además estos autores sugieren que *Opuntia* actúa predominantemente a través de un mecanismo de transición-coagulación de puente; de esta forma las partículas de la solución no entran en contacto directamente entre sí sino que están unidos a un material polimérico que se origina a partir de las especies de cactus.

De otro lado Manunza *et al.*, (1997) determinaron la dinámica molecular en solución acuosa del ácido galacturónico (constituyente principal de pectina en plantas) y plantearon la existencia de este compuesto en forma polimérica -ácido poligalacturónico. Este polímero proporciona un "puente" para la adsorción de partículas. En la Figura 11 se muestra la estructura característica del ácido poligalacturónico y las interacciones moleculares dominantes, asociadas con la adsorción y formación de puentes de hidrogeno en la coagulación.

El ácido poligalacturónico es un polímero aniónico debido a la desprotonación parcial de grupo funcional carboxílico en solución acuosa. La existencia de tales grupos funcionales a lo largo de la cadena del polímero implica que pueda ocurrir quimisorción entre partículas cargadas y el grupo funcional carboxilo (R-COO). También la presencia de grupos-OH a lo largo de su cadena polimérica también

infiere posibles interacciones intramoleculares que pueden distorsionar la linealidad relativa de la cadena (Miller *et al.*, 2008).

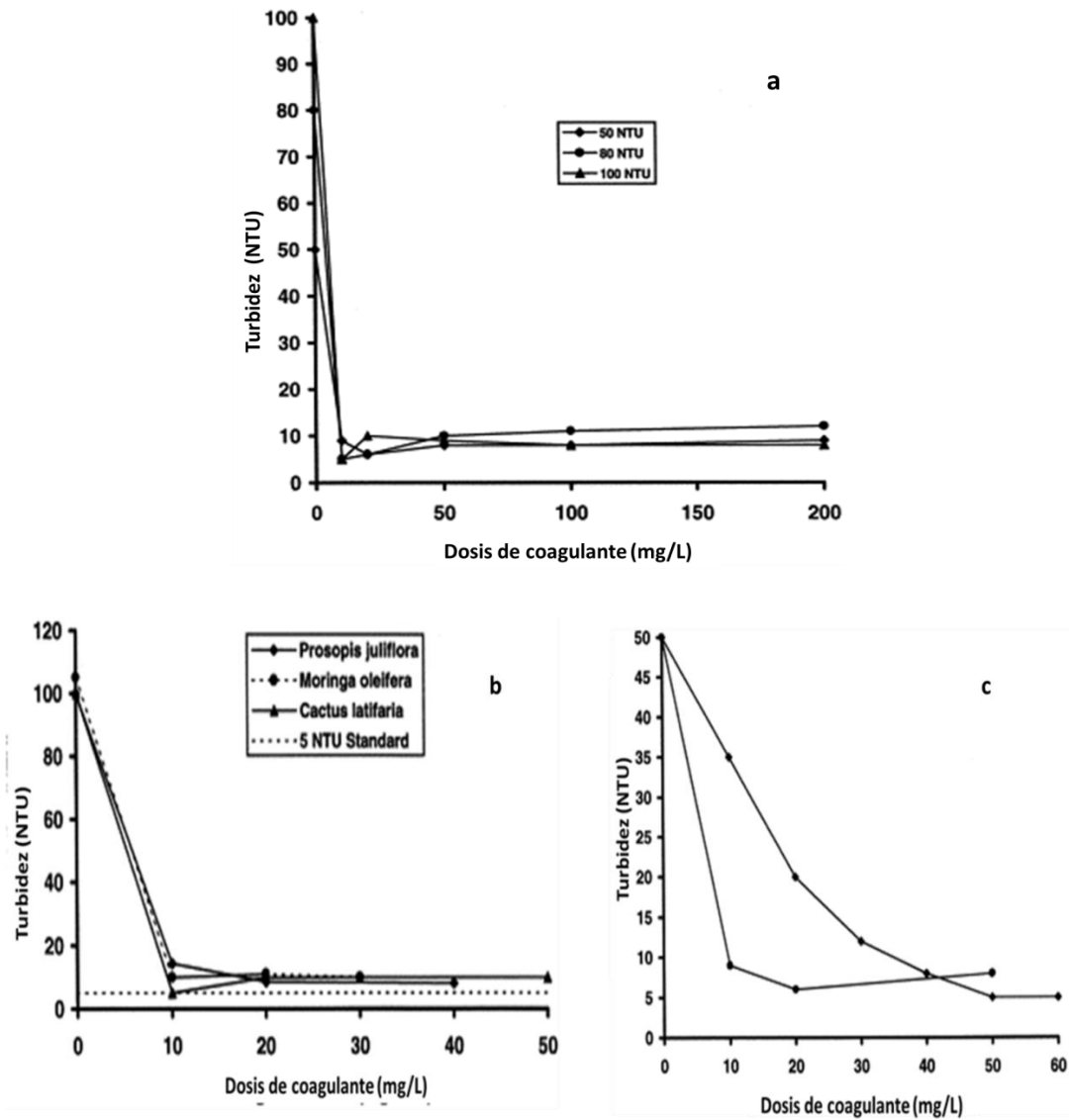
Figura 11. Representación esquemática de ácido poligalacturónico en solución acuosa



Fuente: Los autores, adaptado De: (Miller *et al.*, 2008).

Otras investigaciones han estudiado diferentes tipos de cactus y han evaluado la capacidad coagulante-floculante en la potabilización de agua. Por ejemplo Díaz *et al.*, (1999) estudiaron coagulantes naturales extraídos de *Latifaria Cactus* y las semillas de *Prosopisjuliflora*. Evaluaron el grado de remoción de turbidez en una suspensión de caolín con alto(100-200 NTU) y bajo (30 a 40 NTU) grado de turbidez; ambas especies estudiadas redujeron la turbidez hasta el valor estándar de referencia(5NTU). Los resultados son similares a los obtenidos usando extractos de *Moringaoleífera*. También, los mismos autores compararon el desempeño de *Latifaria Cactus* frente al sulfato de aluminio. Los resultados se muestran en la Figura 12. Para los casos estudiados una dosis de 10-20 mg / L es suficiente para obtener turbidez final menor o igual a10 NTU.

Figura 12. (a) Efecto de la alteración de la dosificación de *Latifaria Cactus* como coagulante (b) comparación de la eliminación de la turbidez por coagulantes orgánicos (datos para *Moringa oleífera* (Ndabigengesere y Narasiah, 1996). (c) Comparación de las actuaciones de sulfato de aluminio (♦) y *Latifaria Cactus* (•)



Fuente: Tomado de: (Díaz *et al.*, 1999)

Las figuras 12b y 12c muestran el comportamiento de *Latifaria Cactus*, *Prosopis juliflora*, *Moringa oleífera* y sulfato de aluminio para remoción de turbidez en función de la dosis aplicada. *Latifaria Cactus* con bajas dosis (10 mg/L), logró

porcentajes de remoción de turbidez superiores al 90% en comparación con otros coagulantes de origen natural y sintético evaluados.

Por otro lado, Zhang *et al.*, 2006 evaluaron el rendimiento de la coagulación con cactus como coagulante macromolecular natural en una suspensión de caolín. Obtuvieron remoción de turbidez aproximadamente del 94% con dosis óptima aproximadamente de 50 mg / L de cactus; la turbidez final alcanzó valores por debajo de 5 NTU. También fueron estudiados los efectos de factores como pH, temperatura y la alcalinidad en la coagulación con cactus. La Figura 12 muestra los resultados de los parámetros evaluados.

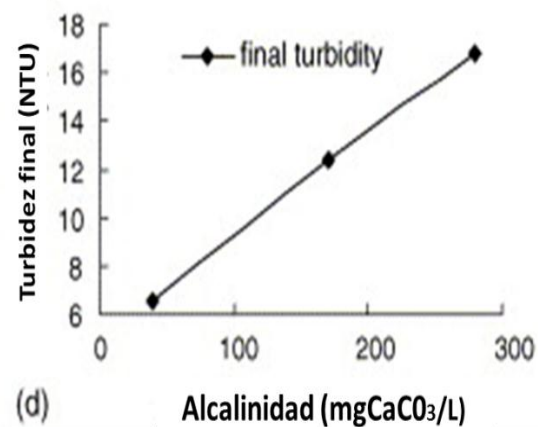
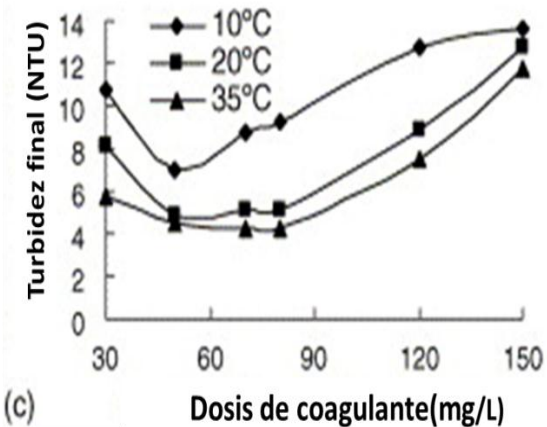
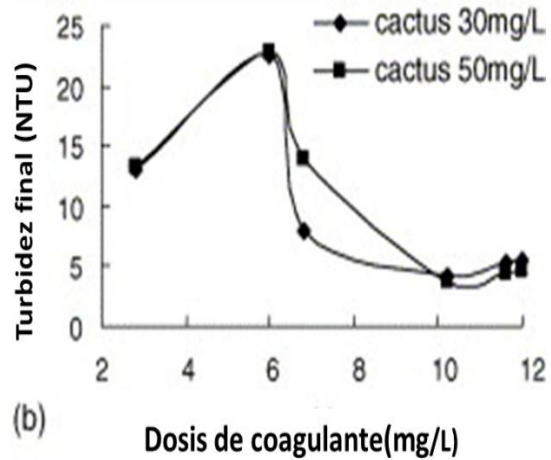
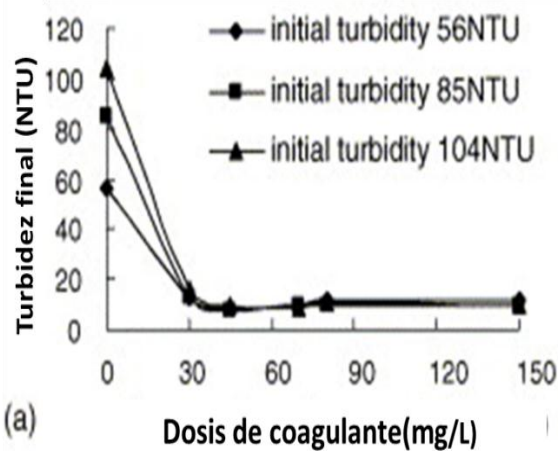
Por su parte Bejerano y Machín., (2000) mediante una investigación realizada en Cuba, resaltan el uso del mucílago del nopal *Opuntia* como coagulante primario en la clarificación de aguas para consumo humano. Las conclusiones de estos investigadores indican que se puede remover más del 90% de la turbidez y 80% de color del agua. También el coagulante natural del nopal *Opuntia* es muy útil en la remoción de Coliformes (Flores *et al.*, 2006).

Martínez *et al.*, (2003) usaron *Cactus lefaria* en la clarificación de aguas superficiales. Este actúa como un coagulante removiendo turbiedad y color. Un año más tarde Almendárez, (2004) a través de un estudio hecho en Nicaragua, en el Lago de Managua “Piedras Azules”, presentó los resultados sobre la efectividad del mucílago del *Opuntia cochinellifera* como coagulante primario del agua del lago para consumo humano. Esta especie de cactus removió el 91% de turbidez del agua.

También Shilpa *et al.*, (2012) evaluaron el desempeño de los coagulantes extraídos de cactus *Opuntia ficus* y de las semillas de *Lablab spp* (frijol Jacinto), para la reducción de turbidez en agua con suspensiones de caolín. Las muestras de agua sintética con una turbidez inicial de 500 NTU fueron tratadas con dosis de 20mg/L en un intervalo de pH de 8 a 10,5; lograron reducir la turbidez hasta valores de 1,3 NTU y 4.3 NTU que corresponden a una eficiencia del 99,74% y 99.14% para cactus y frijol Jacinto respectivamente. Además como complemento de la investigación, las aguas del lago Kuuarahali (India) fueron tratadas con los

mismos coagulantes. Los resultados muestran que se reduce el grado de turbidez de las muestras desde 83 NTU hasta valores de 9.1 NTU y 19 NTU, con porcentajes de remoción del 89,3% y 77.10% para cactus y frijol Jacinto, respectivamente. Los autores concluyen que los coagulantes extraídos de estas dos especies de plantas pueden ser usados para procesos de coagulación-floculación en la potabilización de agua.

Figura 13. Efecto de parámetros físico-químicos en la eficiencia de remoción de turbidez, usando *Latifaria Cactus* para tratar el agua sintética: (a) coagulante de cactus crudo para el tratamiento de agua sintética con diferente turbidez inicial; (b) coagulante cactus prima de 30 y 50 mg / L para el tratamiento de agua sintética con turbidez inicial de 176 NTU y con diferente pH; (c) coagulante cactus crudo de diferentes dosis para el tratamiento de agua sintética con turbidez inicial de 176NTU y bajo diferentes temperaturas; (d) coagulante cactus crudo de 50 mg / L para el tratamiento de agua sintética con turbidez inicial de 176NTU y con diferente alcalinidad).



Fuente: Tomado de: (Zhang et al., 2006)

De otro lado, Jiménez *et al.*, (2012) evaluaron la eficiencia del cactus de la tuna para remover el color en agua de río y agua artificial para el consumo humano. Se comparó su desempeño frente al sulfato de aluminio y un floculante catiónico. De acuerdo a los resultados los extractos de hojas de tuna mostraron actividad como coagulante cuando se evaluaron de forma independiente en agua de río. Se observó además una eficiencia de remoción de color del 94% en agua artificial cuando se aplicó una dosis de 45 mg/L, poco superior al tratamiento convencional: 20 mg/l $Al_2(SO_4)_3$ y 2 mg/l del floculante catiónico con una remoción del 89%. Sin embargo, el agua tratada con tuna dejó un valor de DQO residual del doble (21 mg/l) con relación al tratamiento convencional. En el tratamiento de agua artificial,

la tuna como floculante mostró una remoción de color del 92% y una DQO residual de 31,5 mg/l aplicando a una dosis de 22,5 mg/l y 7 mg/l de $Al_2(SO_4)_3$. La tuna fue poco efectiva para remover el color generado por sustancias húmicas en aguas de baja turbidez y alcalinidad, pero es eficiente como coagulante-floculante en aguas de alta turbidez y alcalinidad.

Pichler *et al.*, (2012) por su parte estudiaron tres extractos diferentes de cactus: extracto gelificante (GE), extracto no gelificante (NE), extracto combinado (GE+NE) (CE) y sulfato de aluminio. Se evaluaron en la remoción de turbidez para suspensiones de caolín. Este estudio demostró que el mucílago extraído de *Opuntia ficus indica* en sus tres formas es mejor floculante en comparación con el sulfato de aluminio. La dosis del extracto gelificado para obtener la misma eficiencia del sulfato de aluminio fue 300 veces más pequeña. Además el GE por ser de naturaleza orgánica es biodegradable. Esta característica es una gran ventaja en comparación con sulfato de aluminio y polímeros sintéticos.

De la misma forma Parra *et al.*, (2011) estudiaron el comportamiento en la clarificación de agua usando coagulante extraído del nopal *Opuntia wentiana*. Obtuvieron porcentajes de remoción de turbidez del agua, que oscilan entre 85,25 y 94,84% antes de la etapa de filtración del proceso de potabilización del agua. Además, finalmente lograron remover entre 91,82 y 98,34% de la turbidez del agua después de llevar a cabo todo el proceso de tratamiento: coagulación, floculación, sedimentación y filtración.

En Colombia en un estudio realizado se comparó la remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando dos coagulantes: sulfato de aluminio y mucílago del nopal *Opuntia ficus indica*. El muestreo de las aguas del río fue realizado en Gambote, Departamento de Bolívar. En este estudio Olivero *et al.*, (2013) determinaron la eficiencia del coagulante en base a los parámetros establecidos en la norma técnica colombiana para agua potable. De acuerdo a los resultados, el agua del río tratada con sulfato de aluminio, cumplió con la norma colombiana para la calidad del agua de consumo humano que acepta 2 NTU como máximo valor de turbidez; sin embargo, el agua tratada con *Opuntia* no cumplió con el

parámetro fijado por la norma. A pesar de esto, el estudio demostró que el mucílago del nopal *Opuntia ficus indica* es útil como coagulante primario porque removió entre 92,39 y 93,25% de la turbidez del agua sin haber simulado la fase de filtración del proceso de potabilización.

Otros estudios también reportan el uso de plantas de la familia Cactaceae como agente coagulante en el proceso de clarificación de agua (Fuentes *et al.*, 2011; Kaz y Virupakshi, 2013)

2.3.4. Taninos. Los taninos son compuestos orgánicos de origen vegetal con estructura polifenólica, se pueden extraer de las partes externas de la planta como cortezas, hojas y frutos (Kedlaya ,1971). Se dividen en dos grupos, los taninos condensados, que son derivados de los flavonoides y los taninos hidrolizables, que son ésteres derivados de un azúcar, usualmente glucosa (Wilson *et al.*1990; Zucker, 1983). Este grupo de moléculas se caracteriza por ser polímeros de tipo aniónico usados como coagulantes-floculantes y coadyuvantes en tratamiento de agua potable y residual. Además ofrecen ventajas para la salud y el medio ambiente en cuanto a la reducción de la cantidad de aluminio residual y de lodos generados frente al tratamiento convencional (Özacar y Sengil., 2000).

Los taninos también se usan como precursores en la producción de nuevos agentes coagulantes-floculantes. Por ejemplo estudios experimentales han sintetizado coagulantes derivados de los taninos a partir de extractos de algunas especies como *Acacia mearnsii*, *Sch. balansae*, *P. pinastery* *C. sativa*. El procedimiento se realiza mediante aminometilación de un carbono activado (ácido) situado junto a un grupo funcional carbonilo en presencia de formaldehído y amoníaco o de una amina primaria o secundaria, y catálisis ácida (Beltrán *et al.* 2011). La modificación de los taninos mejora sus propiedades coagulantes-floculantes; de hecho la cationización de los taninos asegura que la matriz orgánica adquiera carácter catiónico lo que permite la desestabilización de los coloides aniónicos en solución acuosa, la floculación, sedimentación y por

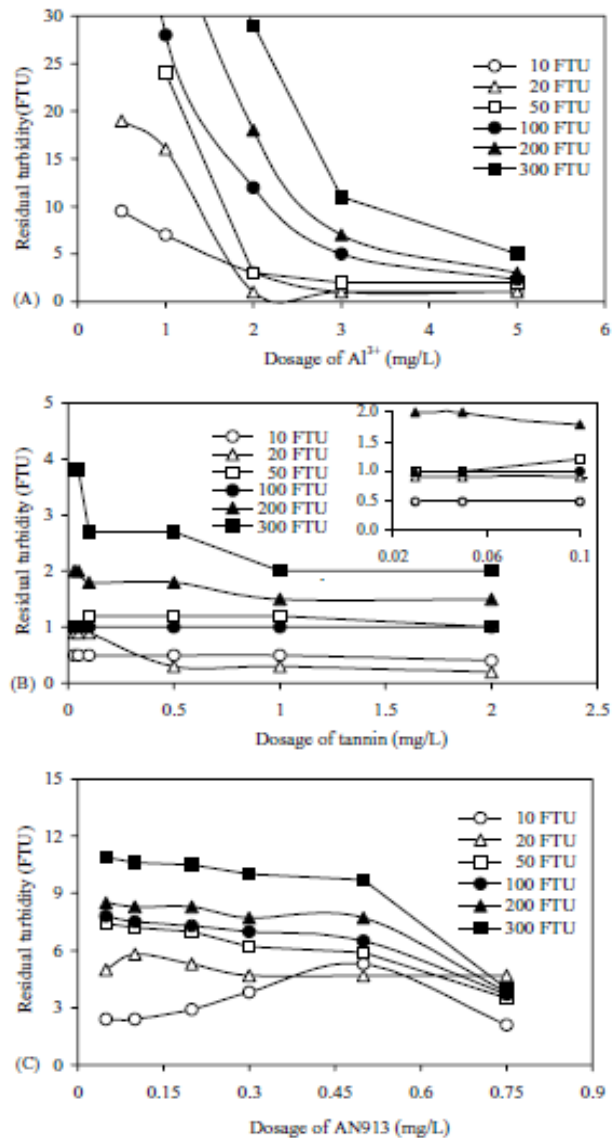
consiguiente la remoción de materia orgánica y otras sustancias de carácter aniónico (colorantes-tenso activos)(Beltrán *et al.* 2011).

Por su parte la empresa TANAC de Brasil estudio el comportamiento de un compuesto comercial obtenido a partir de extractos de del roble y acacia, llamado TANFLOC. Beltrán y Sánchez 2009, evaluaron este compuesto para la clarificación de agua residual; el TANFLOC tuvo una eficiencia similar a la del alumbre, con una remoción de la turbidez del 100% en función de la dosis de producto agregado. Además un 50% en DBO₅ y DQO. De igual forma Sánchez *et al.*, (2010a) probaron un coagulante a base de extracto de *Mimosa púdica* modificado. Los ensayos se realizaron para cuatro tipos de agua superficial: residual municipal, residuales de industria textil y residuales de lavandería. Se obtuvieron porcentajes de remoción de turbidez entre el 50y 60% con una dosis de coagulante - 2mg/L. También estos mismos autores Sánchez *et al.*, (2010b) estudiaron otro coagulante a base de taninos modificado (SILVAFLOC); logrando porcentajes de remoción de turbidez, aproximadamente del 90% con una dosis de 20 mg/L.

De igual forma Graham *et al.*, (2008) estudiaron el comportamiento y propiedades químicas de un polímero catiónico a base de taninos (TPB), y sugirieron como mecanismo de coagulación la neutralización de carga.

De otro lado Özacar y Sengil., 2000, en una investigación alterna se evaluaron el efecto de los taninos extraídos del árbol de *Valonia Ventricosa.*, de origen Turco en compañía del sulfato de aluminio, con el objetivo de mejorar los procesos de remoción de materia orgánica. Los resultados se muestran en la Figura 14.

Figura 14. Comparación de alumbre y polielectrolitos (tanino y AN913) en la eliminación de la turbidez (polielectrolitos usados junto con alumbre)



Fuente: Tomado de: (Özacar y Sengil 2000)

Los resultados demuestran que las muestras tratadas con la mezcla de tanino + Al₂(SO₄)₃ reducen significativamente el nivel turbidez, en comparación con la mezcla con AN913 y el Al₂(SO₄)₃. Los autores concluyen que una dosis de 1 mg/L reduce la turbidez hasta un valor de 5 FTU. En otro estudio similar Özacar y Sengil., (2003) y Yin, (2010) para el tratamiento de aguas usaron como coagulante y coadyuvantes de coagulación extractos del alga *Valonia Ventricosa*.

Determinaron que este extracto en combinación con sulfato de aluminio ofrece mejoras las propiedades coagulantes en comparación con los coagulantes convencionales.

Recientemente Beltrán *et al.*, (2011) a partir del extracto de tanino crudo de las semillas de *Acacia mearnsii*, NH_4Cl y formaldehído obtuvieron un coagulante eficaz para la remoción de turbidez en el agua; con pequeñas dosis comprendidas entre 12.5-25 mg/L lograron alcanzar porcentajes de remoción superiores al 90%.

Finalmente en la Tabla 7 se describe de manera general los tipos de coagulantes-floculantes naturales usados y estudiados actualmente en el tratamiento de agua. La información contenida en la tabla es producto de la recopilación de datos de investigaciones realizadas referente al tema principal de la monografía.

Tabla 7.Tipos de coagulantes-floculantes naturales usados y estudiados actualmente en el tratamiento de agua.

COAGULANTE	BIOMOLÉCULA ACTIVA	MECANISMO DE ACCIÓN	DOSIS BIOFLOCULANTE (mg/L)	DOSIS COAGULANTE SINTÉTICOmg/L	% REMOCION DE TURBIDEZ	% REMOCION DE COLOR	% REDUCCION DE CARGA MICROBIANA	REFERENCIA
Almidones	Amilosa - Amilopectina	Neutralización de carga y adsorción	0,2 - 1,0	na	80	na	na	Pal et al.,2005
Quitina-Quitosan	N-acetilglucosamina ; β -(1-4) D- glucosamina y N-acetil-D-glucosamina.	neutralización de carga y la floculación por formación de puentes	1 - 0,75	na	90	na	na	Divakaran y Pillai, 2001
			0,02	na	95	na	na	Roussy <i>et al.</i> , 2005
			0,3	0,4	80	na	na	Pan et al., 1999
<i>Strychnos potatorum</i>	Mezcla 1:1,7 Galactomanano y Galactano	na	0,25 - 3,5	2 - 220	94,08	na	na	Deshmukh <i>et al.</i> , 2013
			na	na	82 -98	na	99	Sarawgi et al., 2009
			na	na	na	na	80	Maruthi et al., 2013
<i>Moringa oleífera</i>	Proteína catiónica de lato peso molecular	Parches de carga	100	na	90	na	na	Folkard <i>et al.</i> , 1993
			25	na	>90	na	na	McConnachie <i>et al.</i> , 1999
			75	na	>90	na	na	Sutherland <i>et al.</i> , 1994
			10-20	na	90	na	na	Mendoza <i>et al.</i> , 2000
			0,05 - 0,15	na	99,3 -95,5	na	na	Ali et al., 2009
			25	na	87,4	na	na	Mas <i>et al.</i> , 2013
Cactus	Ácido galacturónico	Adsorción y formación de puentes de hidrogeno	10-20	na	90	na	na	Díaz <i>et al.</i> , 1999
			50	na	94	na	na	Zhang <i>et al.</i> , 2006
			20	na	89,3	na	na	Shilpa <i>et al.</i> , 2012
			45	20	na	94	na	Jiménez et al., 2012
Taninos	na	Adsorción, neutralización de carga y formacion de puentes	2	na	50-60	na	na	Sánchez <i>et al.</i> , 2010a
			20	na	90	na	na	Sánchez <i>et al.</i> , 2010b
			1	5	90	na	na	Ózacar y Sengil., 2000
			12,5-25	na	90	na	na	Beltrán <i>et al.</i> , (2011)

na- Datos no disponibles

Fuente: Los autores

3. CONCLUSIONES.

- El uso de coagulantes naturales derivados de fuentes naturales, se considera como una tecnología importante y sostenible que se ha estudiado recientemente, porque representa una mejora significativa de la calidad del medio ambiente y de vida de las comunidades en vía de desarrollo. Además su disponibilidad es amplia y se preparan sin metodologías complejas.
- De forma general, en términos técnicos estos coagulantes naturales son altamente eficaces para la potabilización de aguas con turbidez alta, media y baja. Sin embargo, su rendimiento está sujeto a las características físico-químicas del agua y al mecanismo de coagulación asociado para cada coagulante. Por lo tanto debe ampliarse la investigación en el tema, que permita dilucidar de forma clara las interacciones de estos coagulantes-floculantes con las partículas coloidales del agua.
- La Moringa oleífera es uno de los coagulantes de origen vegetal más investigados para aplicaciones en la potabilización y tratamiento de aguas residuales, aunque también está en auge algunas especies de Cactus. Ambos coagulantes han mostrado resultados prometedores, sin embargo poco se conoce acerca de su diversificación y aplicación a gran escala.
- A pesar de que también se han estudiado otras especies de plantas para los procesos de coagulación-floculación, el papel de los polímeros extraídos aún no está muy bien establecido. La influencia de las variaciones en las características químicas y estructura del polímero en el rendimiento ha sido estudiada hasta ahora sólo de forma superficial.
- Como punto de partida, otras investigaciones deben prestar mucha atención a otras plantas que contienen agentes activos que pueden usarse como coagulantes. Por ejemplo el ácido galacturónico.

BIBLIOGRAFIA.

- Adinolfi, M., Corsaro, M., Lanzetta, R., Parrilli, M., Folkard, G., Grant, W., Sutherland, J. 1994. Composition of the coagulant polysaccharide fraction from *Strychnos potatorum* seeds. *Carbohydrate Research*. 263 (1):103–11.
- Ali, E., Muyibi, S., Salleh, H., Salleh, M., Alam, M. 2009. *Moringa oleifera* seeds as natural coagulant for water treatment. Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC. 13(1):163-168.
- Alméndarez, N. 2004. Comprobación de la efectividad del coagulante (cochifloc) en aguas del Lago de Managua “Piedras Azules”. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 5(1): 46-54.
- Anastasakis, K., Kalderis, D. Diamadopoulos, E. 2010. Flocculation behavior of mallow and okra mucilage in treating wastewater. *Desalination*. 61(2):786-791.
- Asrafuzzaman, M., Fajrudin, ANM., Hossain, MA. 2011. Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants. *International Scholarly Research Network*. 2011:1-6.
- Assaad, E., Azzouz, A., Nistor, D., Ursu, A., Sajin, T., Miron, D., Monette, F., Niquette, P., Hausler, R. 2007. Metal removal through synergic coagulation–flocculation using an optimized chitosan–montmorillonite system. *Applied Clay Science* 37(3-4):258–274.
- Bejerano, J., Machín, D. 2000. Estudio preliminar del uso de coagulantes naturales (tunas y sábila) en la clarificación de agua para consumo humano. Tesis. Facultad de Ingeniería Química. Instituto Superior Politécnico “José A. Echevarría”. La Habana, Cuba.
- Beltrán, J., Sánchez, J., Dávila, M. 2011. Optimization of the synthesis of a new coagulant from a tannin extract. *Journal of hazardous materials*. 186(2):1704-1712.
- Beltrán, J., Sánchez, J., Delgado, A., Jurado, C. 2009. Removal of alizarin violet 3R (anthraquinonic dye) from aqueous solutions by natural coagulants. *J. Haz.Mater. (JHM)*. 170 (1):43-50.

- Beltrán, J., Sánchez, J., Gómez, M., 2010. New coagulant agents from tannin extract: preliminary optimization studies. *Chem. Eng. J.* 162(3):1019-1025.
- Beltrán, J., Sánchez, M. 2009. Removal of sodium lauryl sulphate by coagulation/flocculation with *Moringa oleifera* seed extract. *Journal of Hazardous Materials.* 164(2–3):713–719.
- Bhatia, S., Othman, Z., & Ahmad, A. L. 2007. Pretreatment of palm oil mill effluent (POME) using *Moringa oleifera* seeds as natural coagulant. *Journal of Hazardous Materials.* 145 (1):120-126.
- Bhuptawata, H., Folkard, G., Chaudharia, S. 2007. Innovative physico-chemical treatment of wastewater incorporating *Moringa oleifera* seed coagulant. *Journal of Hazardous Materials.* 142(1-2):477–482.
- Bolto, B y Gregory, J. 2007. Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research.* 41 (11): Pages 2301–2324
- Bolto, B., Dixon, D., Eldridge, R. 2004. Ion exchange for the removal of natural organic matter. *Reactive and Functional Polymers.* 60: 171–182.
- Bratskaya, S., Avramenko, V., Sukhoverkhov, S., Schwarz, S. 2002. Flocculation of Humic Substances and Their Derivatives with Chitosan. *Colloid Journal.* 64 (6):681–685.
- Bratskaya, S., Schwarz, S., Chervonetsky, D. 2004. Comparative study of humic acids flocculation with chitosan hydrochloride and chitosan glutamate. *Water Res.* 38 (12):2955-61.
- Brostow, W., Lobland, H., Pal, S., Singh, R. 2009. Polymeric flocculants for wastewater and industrial effluent treatment. *Journal of Materials Education* 31 (3-4): 157 - 166 (2009).
- Carvalho, M., Pereira, F., Nishi, L., Ferri, P., Cardoso, K., Marquetotti, A., Bergamasco, R. 2014. Improvement of the coagulation/flocculation process using a combination of *Moringa oleifera* Lam with anionic polymer in water treatment. *Environmental Technology.* 35(17):2227-2236.

- Chakrabarti, S., Banerjee, S., Chaudhuri, B., Bhattacharjee, s., Dutta, BK. 2008. Application of biodegradable natural polymers for flocculated sedimentation of clay slurry, *Bioresour Technol.* 99 (8): 3313–3317.
- Chakrabarti, S., Banerjee, S., Chaudhuri, B., Bhattacharjee, S., Dutta, B.K. 2008. Application of biodegradable natural polymers for flocculated sedimentation of clay slurry. *Bioresour Technol.* 99(8): 3313–3317.
- Colina, M., Ayala, A., Rincón, D., Molina, J., Medina, J., Ynciarte, R., Vargas., Montilla, B. 2014. Evaluación de los procesos para la obtención química de quitina y quitosano a partir de desechos de cangrejos. Escalaploto e industrial. *Revista Iberoamericana de Polímeros.* 15(1): 21-43.
- Corsaro, M., Giudicianni, I., Lanzetta, R., Marciano, C., Monaco, P., Parrilli, M. 1995. Polysaccharides from seeds of *Strychnos* species. *Phytochemistry* 39(6): 1377–1380.
- Crini, G., Badot, P. Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature. *Prog. Polym. Sci.* 33 (4):399–447.
- Davydova, V.N., Ermak, I.M., Gorbach, V., Drozdov, A.L., Solov'eva, T.F. 2000. A comparative study of the physicochemical properties of chitosans of different polymerization degree in neutral aqueous solutions. *Biofizika* 45(4), 641–647.
- Denga, S., Yua, Gang., Tingb, Y. 2005. Production of a bioflocculant by *Aspergillus parasiticus* and its application in dye removal. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces.* 44 (4):179–186.
- Deshmukh, B., Pimpalkar, S., Rakhunde, R., Joshi, V. 2013. Evaluation Performance of Natural *Strychnos Potatorum* over the Synthetic Coagulant Alum, for the Treatment of Turbid Water. *IJRSET.* 2(1):6183-6189.
- Diaz, A., Rincon, N., Escorihuela, A., Fernandez, N., Chacina, E., Forster, C. 1999. A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela. *Process Biochemistry.* 35(3–4): 391–395.

- Divakaran, R., Pillai, V. 2001. Flocculation of kaolinite suspensions in water by chitosan. *Water Research*. 35(16):3904–3908.
- Divakaran, R., Pillai, V. 2002. Flocculation of river silt using chitosan. *Water Research* 36(9):2414–2418.
- Donato, N., Navarro, R., Ávila, M. y Mendizábal, E. 2006. Obtención de sulfato de quitosan y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de suspensiones coloidales aniónicas de caolinita. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 7(3).
- Dotto, G., Rosa, G., Moraes, M., Weska, R., Pinto, L. 2013. Treatment of chitin effluents by coagulation–flocculation with chitin and aluminum sulfate. *Journal of Environmental Chemical Engineering* Volume. 1(1–2):50–55.
- Dutta, P., Dutta, J., Tripathi, V. 2008. Chitin and chitosan: Chemistry, properties and applications. *Journal of Scientific & Industrial Research*. 63(1):20-31.
- Elgadir, M., Akanda, J., Ferdosh, S., Mehrnoush, A., Karim, A., Takahiro N., Sarker, Z. 2012. Mixed Biopolymer Systems Based on Starch. *Molecules*. 17(1): 584-597.
- Espinoza, J., Serrano, W., Flórez, O., Arévalo, C. 2013. Alternativa para la potabilización del agua en zonas rurales. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*. 4(2):35-39.
- Fabris, R., Chow, C., Drikas, M. 2010. Evaluation of chitosan as a natural coagulant for drinking water treatment. *Water Sci Technol*. 61(8):2119-2128.
- Fanta, G., Burr, R., Russell, C., Rist, C. 1970. Graft copolymers of starch and poly(2-hydroxy-3-methacryloyloxypropyltrimethyl-ammonium chloride). Preparation and testing as flocculating agents. *Journal of Applied Polymer Science* 14(10):2601–2609.
- Flores, A., Acosta, G., Murillo, B., Trejo, R., Arreola, J. 2006. Evaluación preliminar de la reserva del nopal (*Opuntia* spp) en la región Laguna-Chihuahua. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. 2(5):191-196.

- Foidl, N., Makkar, H. P. S., Becker, K. 2001. The potential of *Moringa oleifera* for agricultural and industrial uses. *The MiracleTree: The Multiple Attributes of Moringa*. 45-76.
- Folkard, G., Sutherland, J., Grant, W. 1993. Natural coagulants at pilot scale. In *Water, environment and management; proceedings of the 18th WEDC Conference* (pp. 51-4). WEDC.
- Gassenschmidt, U., Jany, K., Bernhard, T., Niebergall, H. 1995. Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*. 1243 (3):477-481.
- Ghebremichael, K., Gunaratna, K., Henriksson, H., Brumer, H., Gunnell Dalhammar, D. 2005. A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. *Water Research*. 39(11):2338–2344.
- Gómez, R. 2010. Eficiencia del coagulante de la semilla de *Moringa oleifera* en el tratamiento de agua con baja turbidez (tesis de grado). Escuela Agrícola Panamericana .Zamorano, Honduras.
- Graham, N., Gang, F., Fowler, G., Watts, M. 2008. Characterisation and coagulation performance of a tannin-based cationic polymer: A preliminary assessment. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 327(1):9-16.
- GREATVISTA CHEMICALS, Chitin. 2008. Disponible en <<http://www.greatvistachemicals.com/biochemicals/chitin.html>>
- Guibal, E., Roussy, J. 2007. Coagulation and flocculation of dye-containing solutions using a biopolymer (Chitosan). *Reactive and Functional Polymers*. 67(1)33–42.
- Guibal, E., Vooren, M., Dempsey, B., Roussy, J. 2006. Review of the Use of Chitosan for the Removal of Particulate and Dissolved Contaminants. 41 (11): 2487-2514.
- Guibal, E. 2004. Interactions of metal ions with chitosan-based sorbents: a review. *Separation and Purification Technology*. 38 (1):43–74.

- Gurdián, R. y Coto, J. 2011. Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la coagulación-floculación de aguas residuales. *Tecnología en Marcha*. 24 (2):18-26.
- Ho, Y.C., Norli, I., Alkarkhi, A., Morad, N. 2010. Characterization of biopolymeric flocculant (pectin) and organic synthetic flocculant (PAM): A comparative study on treatment and optimization in kaolin suspension. *Bioresour Technol*. 101 (4): 1166–1174.
- Huang, C., Chen, S., Pan, J.2000. Optimal condition for modification of chitosan: a biopolymer for coagulation of colloidal particles. *Water Research*34 (3):1057-1062.
- Jadhav, M., Mahajan, Y. 2013. Investigation of the Performance of Chitosan as a Coagulant for Flocculation of Local Clay Suspensions of Different Turbidities. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 17(2):328-334.
- Jadhava, M., Mahajan, Y.2013. A comparative study of natural coagulants in flocculation of local clay suspensions of varied turbidities. *Journal of Civil Engineering and Technology*. 1(1): 26-39.
- Jahn, S.1979. African plants used for the improvement of drinking water. *Curare* 2: 183-199.
- Jeon, J.R., Kim, E.J., Kim, Y.M., MURUJESAN, K., Kim, J.H., CHANG, Y.S. 2009. Use of grape seed and its natural polyphenol extracts as a natural organic coagulant for removal of cationic dyes. *Chemosphere*. 77(8):1090-1098.
- Jiménez, J., Vargas, M., Quirós, N. Evaluación de la tuna (*Opuntia cochenillifera*) para la remoción del color en agua potable. *Tecnología en Marcha*. 25(4):55-62.
- Katalin B., Ildikó B., András B., Vargac, I., Záraya, G.2000. Comparison of polyelectrolytes applied in drinking water treatment. *Microchemical Journal*. 67 (1–3): 271–277.
- Kazi, T., Virupakshi, A. 2013.Treatment of Tannery Wastewater Using Natural Coagulants. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2(8): 4061-4068.

- Kirchner J.C., Arboleda, J., Castro, M. 1975. Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación. Serie Documentos Técnicos 2, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú.
- Kvinnesland, T., Odegaard, H. 2004. The effects of polymer characteristics on nano particle separation in humic substances removal by cationic polymer coagulation. *Water Sci Technol.* 50 (12):185-91.
- Lachhwani, P. 2005. Studies on polymeric bioflocculant producing microorganisms. MSc dissertation, Thapar Institute of Engineering and Technology. Patiala. 15: 335-340.
- Lee, J-W., Liao, P-M., Tseng, D-H., Wen, P-T. 1998. Behavior of organic polymers in drinking water purification. *Chemosphere.* 37 (6): 1045-1061.
- Libanius, M. Fundamentals of quality and water treatment. 2nd ed. Campinas. 2008, Atom Ed, p 444.
- Liua, T-K., Chinb, C-J. 2009. Improved coagulation performance using preformed polymeric iron chloride (PICI). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 339I (1–3): 192–198.
- Lu, D.R., Xiao, C.M., Xu, S.J. 2009. Starch-based completely biodegradable polymer materials. *Express Polymer Letters* 3 (3):366-375.
- Lu, Y., Shang, Y., Huang, X., Chen, A., Yang, Z., Jiang, Y., Cai, J., Gu, W., Qian, X., Yang, H., Cheng, R. 2011. Preparation of strong cationic chitosan-graft-polyacrylamide flocculants and their flocculating properties, *Ind. Eng. Chem. Res.* 50 (12): 7141–7149.
- Mangale, S., Chonde, G., Raut, P. 2012. Use of Moringa Oleifera (Drumstick) seed as Natural Absorbent and an Antimicrobial agent for Ground water Treatment. *Res. J. RecentSci.* 1(3):31-40.
- Manunza, B., Deiana, S., Pintore, M., Gessa, C. 1997. Molecular dynamics study of polygalacturonic acid chains in aqueous solution. *Carbohydrate Research.* 300(1):85–88.
- Martínez, D., Chávez, M., Díaz, A., Chacín, E., Fernández, N. 2003. Eficiencia del Cactus lefaria para uso como coagulante en la clarificación de

aguas. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia. 26 (1): 27-33.

- Maruthi, Y., Dadhich, A., Hossain, K., Jyothsna, A. 2013. Nirmali Seed as a Natural Biosorbent; Evaluation of its Potential for Iron (II) Removal from Steel Plant Effluents and Sewage Disinfecting Capacity. European Journal of Sustainable Development. 2(3):77-84.
- Mas, M., Carrasquero, S., Martínez, D., Mejías, D., Vargas, L. 2013. Eficiencia de las semillas Moringa oleifera como coagulante orgánico en la remoción de metales en aguas de baja turbiedad. Revista Tecnocientífica URU. (5): 27-37.
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M., Sillanpää, M. 2010. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment. Advances in Colloid and Interface Science. 159 (2): 189-197.
- McConnachie, G., Folkard, G., Mtawali, M., Sutherland, J. 1999. Field trials of appropriate hydraulic flocculation processes, Water Research, 33 (6): 1425-1434.
- Melo, J., Turriago, F. 2012. Evaluación de la eficiencia de la utilización de semillas de Moringa oleifera como una alternativa de biorremediación en la purificación superficiales del caño cola de pato ubicado en el sector rural del municipio de Acacias. (tesis de grado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, Villavicencio Colombia.
- Mendoza, I., Fernández, N., Ettiene, G., Díaz, A. 2000. Uso de la Moringa oleifera como coagulante en la potabilización de las aguas. Scientific Journal from the Experimental. 8(2):235-242.
- Miller, S., Fugate, E., Craver, V., Smith, J. and Zimmerman, J. 2008. Toward understanding the efficacy and mechanism of Opuntia ssp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. Environmental Science & Technology. 42 (12): 4274-4279.
- Miller, S., Fugate, E., Craver, V., Smith, J., Zimmerman. 2008. Toward Understanding the Efficacy and Mechanism of Opuntia spp. as a Natural

Coagulant for Potential Application in Water Treatment. *Environ. Sci. Technol.* 42(12):4274–4279.

- Muñoz, E., Moreno, L., Medina, O. 2010. Preparation of polymeric derivative from cassava starch (*manihotesculentacrantz*) and its application as flocculant in waste water treatment. *Ciencia en Desarrollo.* 3 (1):25-34.
- Ndabigengesere, A., Narasiah, K. 1998. Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. *Water Research.* 32 (3):781–79.
- Ndabigengesere, A., Narasiah, K., Talbot, B. 1995. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringaoleifera*. *Water Research.* 29 (2):703–710.
- Ndabigengesere, A., Narasiah, KS. 1996. Influence of operating parameters on turbidity removal by coagulation with *Moringa oleifera* seeds. *Environ Technol.* 17 (10):1103–1112.
- Nkurunziza, T., Nduwayezu, J.B., Banadda, E.N., Nhapi I. 2009. The effect of turbidity levels and *Moringa oleifera* concentration on the effectiveness of coagulation in water treatment. *Water Science and Technology.* 59(8):1551-1558.
- 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 grado). Escuela Agrícola Panamericana .Zamorano, Honduras.
- Nyström, Run. Backfolk, K., Rosenholm, J., Nurmi, K. 2003. Flocculation of calcite dispersions induced by the adsorption of highly cationic starch. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 219(1-3): 55-66.
- Okuda, T., Baes, A., Nishijima, W., Okada, M. 2001. Coagulation mechanism of salt solution extracted active components in *Moringa oleifera*. *Water Research.* 35 (3):830–834.
- Olivero, R., Mercado, I., Montes, L. 2013. Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus-indica*. *Producción + Limpia.* 8(1):19-27.

- Oloruntade, A., Afuye, G. 2013. A case for the use of *Moringa olifera* as a natural coagulant to improve water supply in rural farms in Nigeria. *Academic Research International*. 4(6):530-539.
- Othman, Z., Bhatia, S., Ahmad, A. 2011. Influence of the Settleability Parameters for Palm Oil Mill Effluent (POME) Pretreatment by Using *Moringa Oleifera* Seeds as an Environmental Friendly Coagulant. *Journal of Materials Science and Engineering*. 5(3):332-340.
- Özacar, M., Şengil, I. 2003. Evaluation of tannin biopolymer as a coagulant aid for coagulation of colloidal particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 229, (1–3):85–96.
- Pal, S., Mal, D., Singh, RP. 2005. Cationic starch: an effective flocculating agent. *Carbohydrate Polymers*. 59(4):417-423.
- Pan, J.R., Huang, C., Chuang, Y.-C., Wu, C.-C. 1999. Dewatering characteristics of algae-containing alum sludge. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 150:185 - 190.
- Pang, Y., Ding, Y., Chen, J., Gong, W. 2013. Synthesis and flocculation characteristics of cationic modified corncob: A novel polymeric flocculant. *Agricultural Sciences*. 4(9): 23-28.
- Parra, Y., Cedeño, M., García, M., Mendoza, I., González, Y., Fuentes, L. 2011. Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de *Opuntia Wentiana* (Britton & Rose) / (Cactaceae). *Redieluz*. 1 (1): 27-33.
- Parra, Y., Cedeño, M., García, M., Mendoza, I., González, Y., Fuentes, L. 2011. Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de *Opuntia Wentiana* (Britton & Rose) / (Cactaceae). *Redieluz*. 1(1): 27-33.
- Pichler, T., Young, K., Alcantar, N. 2012. Eliminating turbidity in drinking water using the mucilage of a common cactus. *Water Science & Technology: Water Supply*. 12(2):179-186.
- Pritchard¹, M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A., O'Neill, J. 2010. A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution for

developing countries. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 35(13–14):798–805.

- Pritchard², M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A., O'Neill, J. 2010. A study of the parameters affecting the effectiveness of *Moringaoleifera* in drinking water purification. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 35(13–14):791–797.
- Qudsieh, I.Y., Fakhru, L., Razi, A., Kabbashi, N.A., Mirghani, M.E.S., Fandi, K.G., Alam, M.Z., Muyibi, S.A., Nasef, M.M. 2008. Preparation and characterization of a new coagulant based on the sago starch biopolymer and its application in water turbidity removal. *J. Appl. Polymer Sci.* 109 (5):3140-3147.
- Radoiu, M., Martin, D., Calinescu, I., Iovu, H. 2004. Preparation of polyelectrolytes for wastewater treatment. *J Hazard Mater.* 106 (1):27–37.
- Raghuwanshi, P., Mandloi, M., Sharma, A., Malviya, H., Chaudhari, S. 2002. Improving Filtrate Quality Using Agrobased Materials as Coagulant Aid. *Water Qual. Res. J.* 37 (4): 745–756.
- Rajendran, R., Balachandar, S., Sudha, S., Arshid, M. 2013. Natural coagulants-an alternative to conventional methods of water purification. *Balachandra S, IJPRBS.* 2(1):306-314.
- Rani, C., Jadhav, M. 2012. Enhancing filtrate quality of turbid water incorporating seeds of *Strychnos potatorum*, pads of *Cactus opuntia* and mucilage extracted from the fruits of *Coccinia indica* as coagulants. *J. Environ. Res. Develop.* 7(2):668-674.
- Renault, F., Sancey, B., Badot, P.-M., Crini, G. Chitosan for coagulation/flocculation processes – An eco-friendly approach. 2009. *European Polymer Journal.* 45 (5):1337–1348.
- RICHTER, CA. *Water: Methods and treatment technology*. 1st ed. São Paulo. 2009, Ed Blucher, 333 p.
- Rinaudo, M. 2006. Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science.* 31 (7):603-632.

- Rodríguez, S., Muñoz, R., García, R., Dra., Fernández, S. 2005. Empleo de un producto Coagulante Natural para Clarificar Agua. CENIC Ciencias Químicas. 36. Disponible en <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181620511037>>
- Roussy, J., Vooren, M., Dempsey, B, Guibal. 2005. Influence of chitosan characteristics on the coagulation and the flocculation of bentonite suspensions. *Water Research*. 39(14):3247–325.
- Roussy, J., Vooren, M., Guibal, E. 2005. Influence of chitosan characteristics on coagulation and flocculation of organic suspensions. *J Appl Polym Sci*. 98 (5):2070–2079.
- Roussy, J., Vooren, M., Guibal, E. 2004. Chitosan for the coagulation and flocculation of mineral colloids. *J Dispersion Sci Technol*. 25 (5): 663–677.
- Roussy, J., Vooren, M., Guibal. 2004. Chitosan for the Coagulation and Flocculation of Mineral Colloids. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 25(5): 663-677.
- Roussy, J., Vooren, M., Guibal. 2005. Influence of chitosan characteristics on coagulation and flocculation of organic suspensions. *Journal of Applied Polymer Science*. 98 (5):2070–2079.
- Sableviciene, D., Klimaviciute, R., Bendoraitiene, J., Zemaitaitis, A. 2005. Flocculation properties of high-substituted cationic starches. 2005. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 259(1–3):23–30.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., Matsuhiro B. 2004. Opuntiaspp mucilage's: a functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments*. 57(3):275–290.
- Salehizadeh, H., ShojaoSadati S.A. 2001. Extracellular biopolymeric flocculants: Recent trends and biotechnological importance. *Biotechnology Advances*. 19 (5):371-385.
- Sánchez, J., Beltrán, J., Solera, C. 2010. Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. Pilot plant trials. *Journal of Environmental Management*. 91(10): 2051–2058.

- Sánchez, J., González, M., Beltrán, J. 2010. Surface water treatment with tannin-based coagulants from Quebracho (*Schinopsis molle*). *Chemical Engineering Journal*. 165 (3):851–858.
- Sánchez, Y., Martínez, G., Sinagawa, S., Vázquez, A. 2013. *Moringa oleifera*; Importancia, Funcionalidad y Estudios Involucrados. *Acta Química Mexicana* 5(9):25-30.
- Sarawgi, G., Kamra, A., Suri, N., Kaur, A., Sarethy, I. 2009. Effect of *Strychnos potatorum* Linn. Seed Extracts on Water Samples from Different Sources and with Diverse Properties. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 6 (3):13-17.
- Schmitt, d., Dias, Alves, A., Veit, M., Bergamasco, R., Vieira, A., Klen, M. 2013. Ultrafiltration Combined with Coagulation/Flocculation/ Sedimentation Using *Moringa oleifera* as Coagulant to Treat Dairy Industry Wastewater. *Water Air Soil Pollut.* 224(9):1-10.
- Schulz, C., Okun, D. 1998. Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo. Limusa México. 390.
- Šćiban, M., Klačnja, M., Antov, M., Škrbić, B. 2009. Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. *Bioresource Technology*. 100(24):6639–6643.
- Shi, B., Wei, Q., Wang, D., Zhu, Tang, H. 2007. Coagulation of humic acid: The performance of preformed and non-preformed Al species. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 296 (1–3):141–148
- Shilpa, B., Akanksha, Kavita., Girish, P. 2012. Evaluation of Cactus and Hyacinth Bean Peels as Natural Coagulants. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*. 3(3):187-191.
- Silvan, R., Canepa, J., Hernández, B. 2012. Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 28 (3):229-236.
- Singh, R., Tripathy, T., Karmakar, G., Rath, S., Karmakar, N., Pandey, S., Kannan, K., Jain, S., Lan, N. 2000. Novel biodegradable flocculants based on polysaccharides. *Current Science*. 78 (7) 798-803.

- Singh, R.P., Tripathy, T., Karmakar, G.P., Rath, S.K., Karmakar, N.C., Pandey, S.R., Kannan, K., Jain, S.K., Lan, N.T. 2000. Novel biodegradable flocculants based on polysaccharides. *Curr Science*. 78(7): 7-10.
- Soto, A. 2007. Coagulación y floculación de contaminantes en el agua. *Ciencia Abierta*. 15: 1-24. Disponible en <<http://www.revistavirtualpro.com/descarga/coagulacion-y-floculacion-de-contaminantes-en-el-agua->>
- Sutherland, J., Folkard, G., Mtawali, M., Grant, W. 1994. Moringa oleifera as a natural coagulant. In 20th WEDC Conference, Affordable Water Supply and Sanitation, Colombo, Sri Lanka (pp. 297-299).
- Szyguła, A., Guibal, E., Palacín, M., Ruiz, M., Sastrec, A. 2009. Removal of an anionic dye (Acid Blue 92) by coagulation–flocculation using chitosan. *Journal of Environmental Management*. 90(10):2979–2986.
- Theodoro, J., Bergamasco, R. 2013. Application of Natural Polymer Extracted Moringa Oleifera in the Treatment of Drinking Water. *Plastic and Polymer Technology (PAPT)*. 2(1):17-21.
- Tripathy, T y Ranjan, B. 2006. Flocculation: A New Way to Treat the Waste Water. *Journal of Physical Sciences*. 10: 93 – 127.
- Tzoupanos, N.D. y Zouboulis, A.I. 2011. Preparation, characterization and application of novel composite coagulants for surface water treatment. *Water Research*. 45 (12): 3614–3626.
- Velásquez, C. 2006. Quitina y quitosano: materiales del pasado para el presente y el futuro. 2006. *Avances en Química*. 1(2):15-21.
- Vogelsang, C., Andersen, D., Hey, A., Håkonsen, T., Jantsch, T., Müller, E., Pedersen, M., Vårum, K. 2005. Removal of humic substances by chitosan. *Water Supply*. 4 (5-6):121–129.
- Wang, Y. Gao, B-Y., Xua, X-M., Xua, W-Y., Xub, G-Yi. 2009. Characterization of floc size, strength and structure in various aluminum coagulants treatment. *Journal of Colloid and Interface Science* 332 (2): 354–359.

- Wei, Y., Cheng, F., Zheng, H. 2008. Synthesis and flocculating properties of cationic starch derivatives. 2008. *Carbohydrate Polymers*. 74 (3): 673–679.
- Wu, Z-B., Ni, W-M., Guan, B-H. 2008. Application of chitosan as flocculant for coprecipitation of Mn (II) and suspended solids from dual-alkali FGD regenerating process. *Journal of Hazardous Materials* 152(2):757–764.
- Xing, G.-X., Zhang, S.-F., Ju, B.-Z., Yang, J.-Z. 2005. Recent Advances in Modified Starch as Flocculant. *The Proceedings of the 3rd International Conference on Functional Molecules, Dalian*, 8-11.
- Xing, W., Guo, W., Ngo, H.-H., Cullum, P., Listowski, A. 2010. Integration of inorganic micronutrients and natural starch based cationic flocculant in primary treated sewage effluent (PTSE) treatment, *Sep. Sci. Technol.* 45 (5) 619–625.
- Yin, C. 2010. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*. 45 (9): 1437-1444.
- Yin, C.Y. 2010. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*. 45(9):1437–1444.
- Yin, C.Y. 2010. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*. 45(9):1437-1444.
- You, L., Lu, F., Li, D., Qiao, Z., Yin, Y. 2009. Preparation and flocculation properties of cationic starch/chitosan crosslinking-copolymer. *J. Hazard Mater.* 172(1): 38-45.
- Zeng, D., Wu, J., Kennedy, J. 2008. Application of a chitosan flocculant to water treatment. *Carbohydrate Polymers*. 71 (1-5):135–139.
- Zeng, D., Wu, J., Kennedy, J. 2008. Application of a chitosan flocculant to water treatment. *Carbohydrate Polymers*. 71 (1-5): 135–139.
- Zhang, J., Zhang, F., Luo, Y., Yang, H. 2006. A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment. *Process Biochemistry*. 41(3):730–733.
- Ziółkowska, D., Shyichuk A. 2011. Flocculation abilities of industrial cationic starches. *Polimery*. 56 (3) 70-72.

- Ziółkowska, D., Shyichuk, A., Cysewski, P., Organiściak, A. 2011. Flocculation efficiency of cationic potato starch in the presence of coagulants. CHEMIK. 65 (4): 309-314.