

COAGULANTES QUIMICOS DE RECIENTE GENERACION, TENDENCIAS DE
USO, PRECIO Y DOSIFICACION EN COLOMBIA Y EL MUNDO

SARA JOHANA MALDONADO GARCIA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERIA AMBIENTAL
PAMPLONA
2016

COAGULANTES QUIMICOS DE RECIENTE GENERACION, TENDENCIAS DE
USO, PRECIO Y DOSIFICACION EN COLOMBIA Y EL MUNDO

SARA JOHANA MALDONADO GARCIA

MONOGRAFÍA PRESENTADA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA
AMBIENTAL

ASESOR

JULIO ISAAC MALDONADO

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERIA AMBIENTAL
PAMPLONA

2016

RESUMEN

Este trabajo tiene como fin realizar una recopilación bibliográfica sobre los diferentes coagulantes para tratar el agua a nivel mundial y nacional, confrontando en cada uno de ellos su eficiencia para remover todas las impurezas y llegar a cumplir con los parámetros que exige el agua para consumo humano. Los factores que se tiene en cuenta para llegar a usar cierto coagulante son el tipo de agua que se está tratando, el precio y su dosificación.

De acuerdo con la información encontrada los coagulantes naturales presentan menos efectividad que los coagulantes metálicos como el sulfato de aluminio el químico más usado hasta ahora, el cual se ha venido reemplazando por el PAC un producto más eficaz y fácil de usar en una planta de agua potable.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	8
1. el agua y su problemática.....	11
1.1 sólidos suspendidos.....	11
1.2 partículas coloidales.....	11
1.3 sustancias disueltas.....	11
2. Coagulación.....	12
2.1 características de la coagulación.....	14
3. ensayo de jarras.....	15
4. coagulantes.....	16
4.1 coagulantes metálicos.....	16
4.1.1 sulfato de aluminio.....	17
4.1.1.1 presentación comercial.....	19
4.1.1.2 precio.....	20
4.1.2 sulfato férrico.....	20
4.1.3 sulfato ferroso.....	20
4.1.4 cloruro férrico.....	20
4.1.5 aluminato de sodio.....	21
4.2 Polielectrólitos.....	21
4.3 coagulantes naturales.....	21
4.3.1 semillas de moringa.....	24
4.3.2 bellota europea y roble.....	27

4.3.3 cactus.....	28
4.3.4 frijol.....	31
4.3.5 mucílago del nopal opuntia.....	32
4.3.6 almidón.....	34
4.3.7 sulfato de aluminio mezclado con almidón.....	35
4.3.8 comparación entre el sulfato de aluminio y la moringa.....	36
4.4 coagulantes usados actualmente.....	39
4.4.1 PAC.....	39
4.4.1.1 presentación comercial.....	41
4.4.1.2 precio.....	42
4.4.2 Quinsafluor.....	43
4.4.3 Superquinsa.....	44
5. Dosificación.....	51
5.1 equipos dosificadores de coagulantes.....	51
6. Economía.....	49
7. Conclusiones.....	50
8. Referencias.....	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Contaminantes del agua.....	12
Tabla 2. Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación.....	14
Tabla 3. Coagulantes químicos.....	17
Tabla 4. Principales propiedades del sulfato de aluminio.....	18
Tabla 5. Presentación comercial del sulfato de aluminio.....	19
Tabla 6. Precios del sulfato de aluminio.....	20
Tabla 7. Sulfato de aluminio y almidón de yuca.....	35
Tabla 8. Turbidez final lograda con la dosis optima de los coagulantes.....	38
Tabla 9. Presentación comercial del Hidroxicloruro de aluminio.....	41
Tabla 10. Precios Hidroxicloruro de aluminio.....	42
Tabla 11. Precio del coagulante Quinsafluor.....	43
Tabla 12. Precio del coagulante Superquina.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo esquemático de la coagulación.....	13
Figura 2. Ensayo de jarras.....	16
Figura 3. Remoción de la turbidez en agua cruda.....	37

INTRODUCCION

El agua para el consumo humano ha sido desde hace mucho tiempo la preocupación de muchos, ya que se busca obtener de ella aspectos físicos, químicos y microbiológicos óptimos para satisfacer una de las necesidades básicas; sin embargo existen muchas fuentes que afectan su calidad entre los cuales encontramos el desarrollo industrial, agrícola y crecimiento poblacional.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, cada día mueren alrededor de 3.900 niños a causa del agua sucia y de la falta de higiene. Las enfermedades transmitidas a través del agua o de los excrementos humanos constituyen la segunda causa de muerte infantil en el mundo después de las enfermedades respiratorias.

El agua posee características que las hace diferentes dependiendo del lugar de donde proviene naturalmente, esta se puede contaminar por el contacto con el suelo o aire, encontrándose partículas o residuos que alteran su estado natural, para esto es necesario realizar un tratamiento de coagulación el cual remueve todas las partículas coloidales y suspendidas quienes originan la turbidez del agua y no la hacen optima, la coagulación contribuye a remover el color, bacterias y virus; para llevar a cabo este proceso se usan coagulantes químicos.

Estos coagulantes tienen características que los hacen diferentes el uno del otro, es por esto que cada planta de tratamiento escoge el que más satisfaga sus necesidades con respecto al agua que se desea tratar; otros factores que influyen para escoger cierto coagulante es su precio y la facilidad que tienen de adquirir el producto.

Hoy en día son numerosos los tipos de coagulantes que existen a nivel nacional y mundial, muchos de los químicos han sido reemplazados por productos naturales que de igual manera cumplen con los requerimientos para el tratamiento del agua.

Desde hace algún tiempo se ha buscado sustituir los coagulantes primarios con opciones limpias y económicas, algunas de ellas de origen vegetal. Los coagulantes

naturales son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal, que actúan de forma similar a los coagulantes sintéticos en el proceso de clarificación del agua cruda (Vargas y Romero, 2006)

OBJETIVOS

- Divulgar toda la información sobre los coagulantes químicos, precios y dosificación en Colombia y el mundo.
- Conocer los tipos de coagulantes químicos que más se usan actualmente y cuáles de ellos cumplen con los índices para el tratamiento del agua.
- Averiguar el proceso que se lleva a cabo para realizar la dosificación de los productos en las plantas de tratamiento de agua potable.
- Investigar el precio y características que se maneja en el mercado con respecto a los coagulantes.

1.EL AGUA Y SU PROBLEMATICA

Durante el ciclo del agua se puede contaminar este recurso ya sea en el aire, suelo o al infiltrarse, a esto se suma la contaminación que se genera por las diferentes actividades humanas, industriales, agrícolas, etc. Todos estos procesos generan diversas partículas que se pueden clasificar en:

1.1 Sólidos suspendidos (mayor a 10^{-6} m)

Estos pueden ser de origen mineral (arena, arcillas, etc.) u orgánico (productos de la descomposición de plantas y animales, por ejemplo ácidos húmicos o fúlvicos) Además, de estos compuestos también se encuentran microorganismos como bacterias, plancton, algas y virus. Los sólidos suspendidos son los responsables de la turbidez y el color del agua. (Vargas & Romero, 2006).

1.2 Partículas coloidales (entre 10^{-6} m y 10^{-9} m)

Estas son sólidos suspendidos originadas de igual manera que los anteriores pero con un tamaño inferior y una velocidad de sedimentación muy lenta. También son responsables de turbidez y color. Los coloides son normalmente estables en solución. En general priman los factores estabilizantes por sobre los desestabilizantes. Entre los factores estabilizantes se cuentan a todas las fuerzas o fenómenos que generan repulsión entre ellos y por tanto, las fuerzas electrostáticas y la hidratación son favorables. Las fuerzas de atracción, en cambio, cumplen un papel opuesto y desestabilizan. Entre ellas la gravedad, el movimiento Browniano y las fuerzas de Van der Waals (Ciencia Abierta. 2007).

1.3 Sustancias disueltas (menor a 10^{-9} m)

Estas son usualmente sustancias inorgánicas (como cationes y aniones) y sustancias orgánicas (como ácidos, alcoholes, aldehídos, etc.). También pueden haber gases presentes (oxígeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, etc.). (Vargas & Romero, 2006).

Tabla 1. Contaminantes del agua

CLASE	EJEMPLOS
Sólidos suspendidos	Materiales coloidales, polvo, óxidos de metales insolubles, e hidróxidos
Orgánicos disueltos	Químicos orgánicos sintéticos, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos
Iónicos disueltos (sales)	Metales pesados, sílice, arsénico, nitrato, cloruros, carbonatos
Microorganismos	Bacterias, virus, quistes protozoarios, hongos, algas, células de levadura
Gases	Sulfuro de hidrógeno, metano, radón, bióxido de carbono

Fuente: Tomado de (Cartwright, 2009)

2. COAGULACION

La coagulación prepara el agua para la sedimentación, incrementa grandemente la eficacia de los sedimentadores y tiene como función principal desestabilizar, agregar y unir las sustancias coloidales presentes en el agua. El proceso remueve turbiedad, color, bacterias, algas y otros organismos planctónicos, fosfatos y sustancias productoras de olores y sabores. La coagulación es el proceso que se usa más ampliamente para remover las sustancias que ocasionan turbiedad en el agua, las cuales son a menudo inorgánicas, mientras que las que causan olor, sabor son generalmente orgánicas. (Romero 2005)

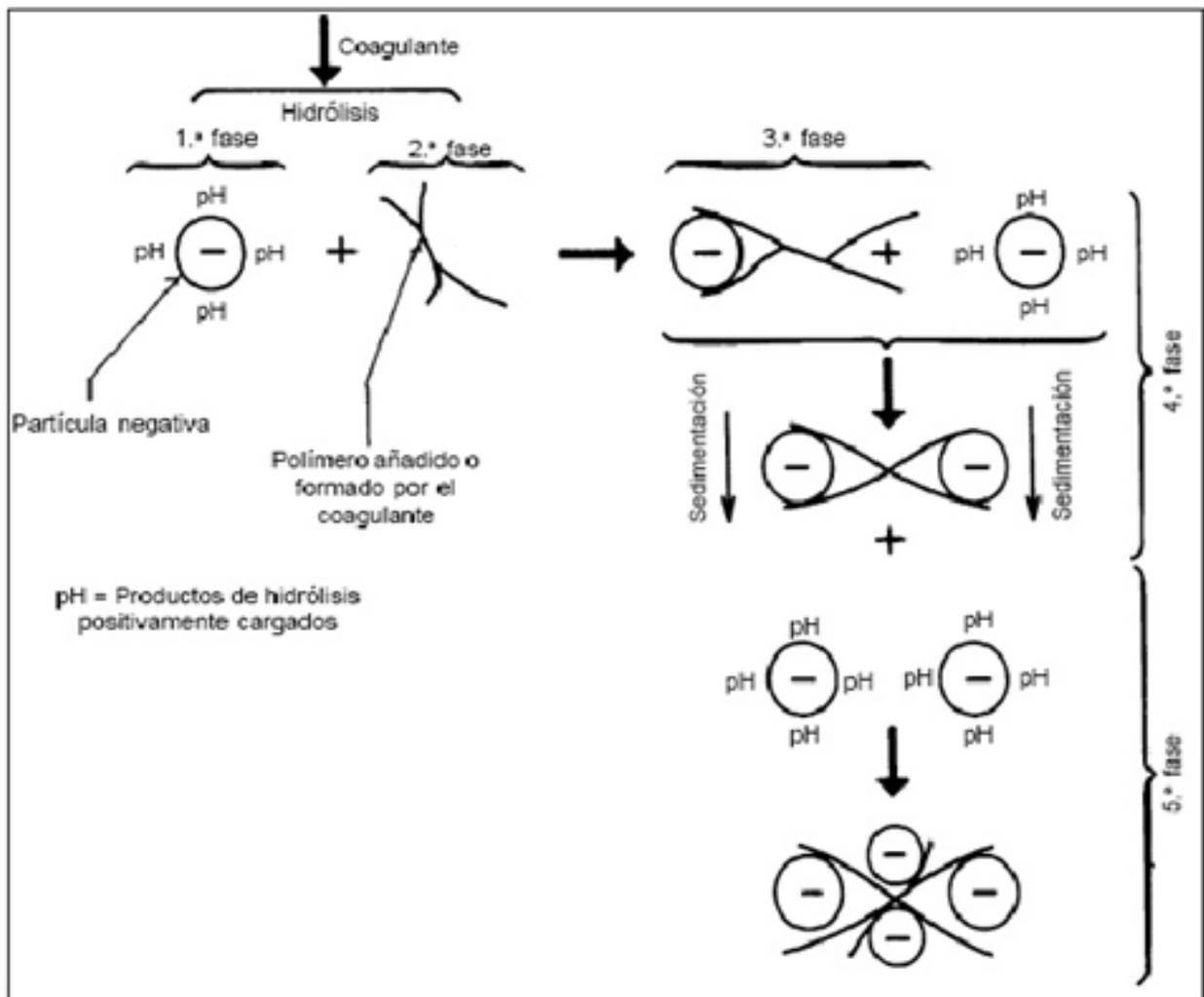
Comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. (Arboleda)

La coagulación es un proceso por el cual se desestabilizan químicamente las partículas coloidales al romper las fuerzas que los mantienen separados; es un

método que se utiliza a nivel mundial para eliminar la mayor cantidad de sustancias presentes en el agua con el menor costo y tiempo posible.

Para llevar a cabo este proceso se utilizan los coagulantes quienes desestabiliza los microorganismos y las partículas coloidales, permitiendo que estas se junten entre si formando coágulos que se aglomeran conformando flóculos de mayor tamaño enviándolos hacia el fondo del tanque. Su formación depende de una gran variedad de condiciones como el pH, tipo de mezcla, el periodo de sedimentación y la circulación del lodo entre otras.

Figura 1. Modelo esquemático de la coagulación



Fuente: universidad nacional abierta y a distancia UNAD

Tabla 2. Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación

Tipo de Agua	Tipo de Coagulación	Requerimiento
Baja concentración de coloides, baja alcalinidad	Formación de precipitado. Floc de barrido	Alta dosis de coagulantes. Adición de alcalinidad o partículas o ambas
Baja concentración de coloides, alta alcalinidad	Formación de precipitado. Floc de barrido	Alta dosis de coagulantes. Adición de partículas
Alta concentración de coloides, baja alcalinidad	Adsorción de polímeros metálicos positivos, en la superficie de los coloides. (pH4 a 7)	Dosis de coagulantes incrementa con concentración de partículas, adición de alcalinidad
Alta concentración de coloides, alta alcalinidad.	Adsorción de polímeros metálicos positivos y precipitaciones de hidróxidos (pH>7)	Dosis de coagulante incrementa con concentración de partículas

Fuente: Tomado de (Cartwright, 2009)

2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA COAGULACION

- Carga opuesta al coloide con el objeto de que, al ser agregados a la solución, las fuerzas electrostáticas puedan ser neutralizadas, y así anular el potencial zeta.
- A veces el reactivo coagulante no consigue reducir el potencial Z hasta los valores próximos a cero, por lo cual es preciso introducir otros compuestos denominados coadyuvantes, como los polielectrolitos.
- Deben tener la valencia más alta posible, para que la rotura de la estabilidad coloidal sea lo más rápida posible.

- Deben ser muy pesados, para que los flóculos formados puedan separarse lo más rápidamente posible, por precipitación.
- No deben ser productos muy costosos en el mercado

3. ENSAYO DE JARRAS

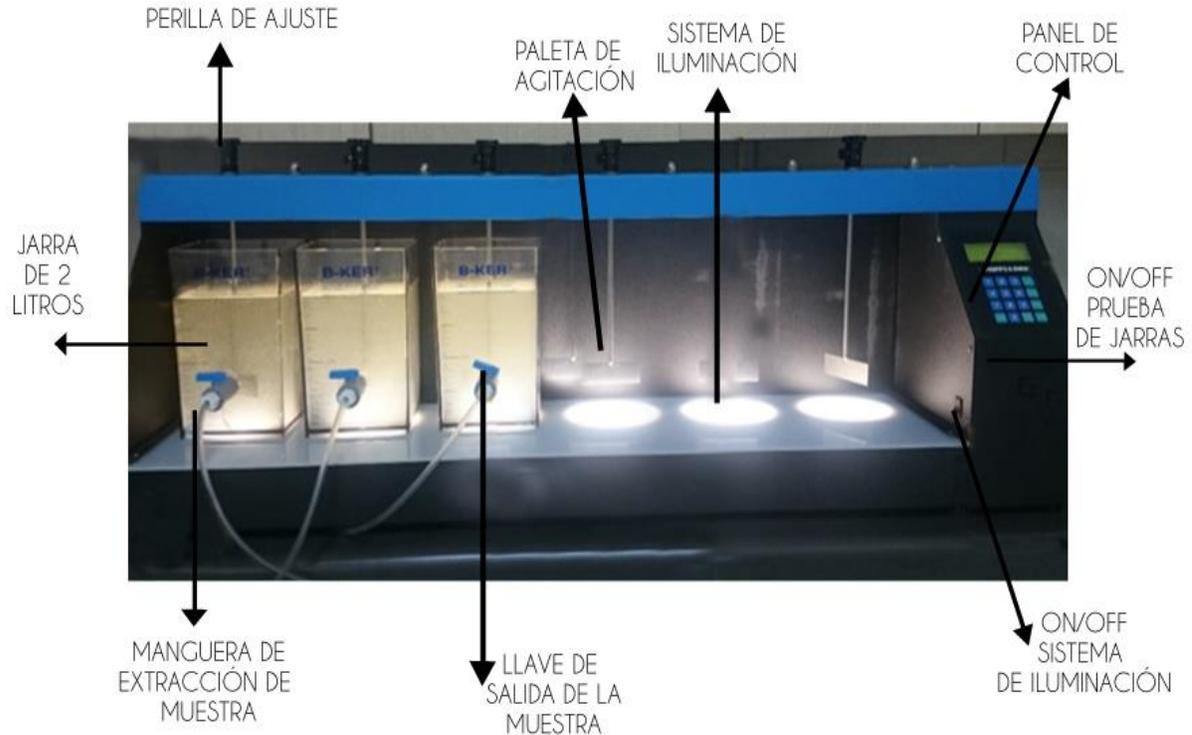
El ensayo de jarras es uno de los más importantes en el control del proceso de coagulación química de aguas. Se realiza, entre otros, con los siguientes propósitos:

- Selección del tipo de coagulación más efectivo
- Determinación del PH óptimo de coagulación
- Evaluación de la dosis optima de coagulante
- Determinación de la dosis de ayudas de coagulación
- Determinación del orden más efectivo de adición de los diferentes productos químicos
- Determinación de los niveles óptimos de mezcla, gradientes de velocidad y tiempos de mezcla
- Evaluación de la necesidad de proveer floculación y sedimentación previa a la filtración o factibilidad de filtración directa

Este ensayo se ha usado ampliamente; sus resultados tienen gran aplicabilidad en el diseño y la operación real de las unidades de tratamiento, así como en la optimización de las plantas existentes. El procedimiento requiere como datos previos mínimos los valores de PH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda. La unidad de mezcla típica consiste en una serie de agitadores de paletas acoplados mecánicamente para operar a la misma velocidad por lo general entre 10 y 100 rpm.

Como jarras de coagulación se han usado vasos de precipitación, generalmente de uno a dos litros, así como jarras rectangulares de dos litros en acrílico transparente.

Figura 2. Ensayo de jarras



Fuente: ISA ingeniería y servicios ambientales

4. COAGULANTES

4.1 Coagulantes metálicos

Han sido los más utilizados para el tratamiento del agua cruda, poseen la capacidad de actuar como coagulantes y floculantes y, cuando son disueltos, forman compuestos complejos hidratados. Entre los más utilizados se hallan: sulfato de aluminio, sulfato férrico, sulfato ferroso, cloruro férrico y el aluminato de sodio (Romero, 2000).

Tabla 3. Coagulantes químicos

Compuestos de aluminio	
Sulfato de Aluminio	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$
Aluminato de Sodio	$NaAlO_2$
Alumbre de Potasio	$Al_2(SO_4)_3 \cdot K_2SO_4 \cdot 24H_2O$
Alumbre de Amonio	$Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$
Policloruro de Aluminio	$Al_2(OH)_nCl_{6-n}$
Compuestos de Hierro	
Cloruro Férrico	$FeCl_3$
Sulfato Férrico	$Fe(SO_4)_3$
Sulfato Ferroso	$Fe(SO_4)_7 \cdot 7H_2O$
Otros	
Carbonato de Magnesio	$MgCO_3$

Fuente: Pérez .

4.1.1 SULFATO DE ALUMINIO

También conocido como alumbre, funciona mejor en un intervalo de pH entre 6 y 8. Produce flóculos pequeños de fácil remoción. No es muy efectivo para aguas con alta carga contaminante, es el más utilizado para el tratamiento de agua potable, además no necesita aditivos. Su inhalación puede ser nociva, en grandes cantidades es tóxico para la vida acuática y causa alergia en los ojos.

El Sulfato de aluminio es conocido comercialmente como “Alumbre”. Claro que no es un alumbre verdadero: por definición es un sulfato doble sal que tiene un metal univalente o radical tal como potasio, sodio, y un metal trivalente tal como aluminio, ion férrico, cromo, cobalto, etc. El cual forma cristales definidos con 24 moléculas de agua, es el coagulante-floculante de más bajo costo, y su manejo es realmente sencillo; además ayuda a controlar las bacterias y mejorar el sabor del agua. Por estas razones es más utilizado para el tratamiento de aguas.

Tabla 4. Principales propiedades del sulfato de aluminio

PROPIEDADES	SULFATO DE ALUMINIO TIPO A SOLIDO
Apariencia	Amarillo/blanco
Al ₂ O ₃ Min %	17.00 min
Hierro como Fe ₂ O	0.75 máx.
Materia insoluble máx %	0.50
Al ₂ O ₃ basicidad min. %	0.050
PROPIEDADES	SULFATO DE ALUMINIO TIPO A LIQUIDO
Apariencia	Amarillo/blanco
Al ₂ O ₃ Min %	8.0 min
Hierro como Fe ₂ O	0.4 máx.
Materia insoluble máx %	0.10
PROPIEDADES	SULFATO DE ALUMINIO TIPO B LIQUIDO
Apariencia	Café pardo
Al ₂ O ₃ Min %	15.20 min
Hierro como Fe ₂ O	2.0 max
Materia insoluble máx %	8.0
Al ₂ O ₃ basicidad min. %	0.05

Fuente: propia

4.1.1.1 PRESENTACION COMERCIAL

Tabla 5. Presentación comercial del sulfato de aluminio

PRODUCTO	PRESENTACION COMERCIAL
Sulfato de Aluminio Tipo A Solido (Granulado) 1 Kilo	 A white plastic bag filled with white granules. The bag has a label that reads "SULFATO DE ALUMINIO GRANULADO TIPO A 1 KILLO".
Sulfato de Aluminio Tipo A Solido (Granulado) 25 Kilos	 A large yellow bag with a green logo and text. The text on the bag includes "SULFATO DE ALUMINIO TIPO A" and "PESO NETO 25 KG".
Sulfato de Aluminio Tipo A Liquido 250 Kilos	 A blue plastic drum with a white label. The label contains text and a logo, including the words "SULFATO DE ALUMINIO LIQUIDO".



Fuente: distribuidor aliados LTDA

4.1.1.2 PRECIO

Tabla 6. Precios del sulfato de aluminio

PRODUCTO	CANTIDAD	PRECIO
Sulfato de Aluminio Tipo A Sólido (Granulado)	1 Kilo	\$ 1.500
Sulfato de Aluminio Tipo A Sólido (Granulado)	25 Kilos	\$ 37.000
Sulfato de Aluminio Tipo A Líquido	250 Kilos	\$ 250.000
Sulfato de Aluminio Tipo B Líquido	250 Kilos	\$ 235.000

Fuente: propia

4.1.2 Sulfato Férrico

Produce flóculos grandes fáciles de remover, pero genera alta corrosión, por eso no se usa para el tratamiento de aguas para uso doméstico, se aplica más en el tratamiento de aguas residuales y en aquellas con una alta concentración de hierro.

4.1.3 Sulfato Ferroso

Presenta problemas de coloración cuando se administra sin aditivos, como óxido de calcio, esta permite la precipitación del ion ferroso que es bastante soluble y permite

la precipitación Mg y Fe, o con cloro para aumentar su intervalo de acción de pH y remoción efectiva del color.

4.1.4 Cloruro Férrico

Genera gran corrosión y presenta problemas de coloración, su uso para el tratamiento de aguas es limitado por su corto intervalo de pH y problemas de remoción de hierro.

4.1.5 Aluminato de Sodio

Es muy poco usado, solo se utiliza para remover el color a pH bajos, se usa junto con alumbre para disminuir la dosis de este último.

4.2 Polielectrólitos

Son polímeros orgánicos sintéticos de gran tamaño molecular, con carga eléctrica neta; son muy eficaces en un amplio rango de pH y, debido a su alto costo, se utilizan junto con coagulantes metálicos. Se clasifican según su carga en: Catiónicos, con carga positiva: al entrar en contacto con el agua forman aniones, que permiten remover las partículas de carga negativa y son más eficaces a pH bajo; Aniónicos, que tienen carga negativa: al entrar en contacto con el agua forman cationes, que permiten remover las partículas de carga positiva y son más eficaces a pH alto y No iónicos, son neutros: al entrar en contacto forman iones positivos y negativos, pero se necesitan dosis mayores en comparación con los anteriores para obtener resultados similares.

4.3 Coagulantes Naturales

Son una fuente alternativa con gran potencial aún no explotado suficientemente; se producen de manera espontánea, debido a reacciones bioquímicas que ocurren en animales y en plantas. Por lo general, presentan una mínima o nula toxicidad y, en muchos casos, son productos alimenticios con alto contenido de carbohidratos y de proteínas solubles en agua (Lee et al. 1995; Ganjidoust et al. 1997). Algunos de

ellos tienen propiedades coagulantes o floculantes que actúan de modo similar a los coagulantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación y reduciendo la turbidez inicial; en muchos lugares son utilizados. (Guzmán L, Villabona A, Tejada C, García R, 2013)

Como alternativa, los países en vías de desarrollo, han adaptado una serie de tecnologías tradicionales para eliminar la turbidez del agua en el ámbito doméstico. De ellas la más estudiada es la utilización de extractos naturales de plantas para la clarificación del agua cruda (Jahn, 1979; Jahn, 1981; Dorea, 2006). Los coagulantes naturales son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal (Kawuamura, 1991; Lee et al., 1995; Ganjidoust et al., 1997; Broekaert et al., 1997), que actúan de modo similar a los coagulantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación y reduciendo la turbidez inicial de ésta. Algunos de estos coagulantes poseen además propiedades antimicrobianas, por lo que reducen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos susceptibles de producir enfermedades. Su origen natural, garantiza la inocuidad para el ser humano, y la biodegradabilidad de los lodos producidos permite además su utilización en la agricultura. Su aplicación, no solo puede ir dirigida a países en vías de desarrollo, sino también a potabilización convencional y al tratamiento de aguas residuales.

En la actualidad, el uso de coagulantes de origen sintético para la potabilización, tales como el Sulfato de Aluminio o el Cloruro Férrico (Van Benchosten et al., 1990, Boisvert et al., 1997; Najm et al., 1998), también es cuestionada debido entre otros motivos a :

- Los problemas medioambientales que conlleva fundamentalmente de generación de lodos tóxicos que no pueden ser utilizados en la agricultura.
- La relación con la enfermedad de Alzheimer
- Empeoramiento de enfermedades neurodegenerativas (Miller, 1984; Martyn et al., 1989)
- Relación con el cáncer

Recientes informes relacionan la presencia de aluminio residual en el agua potable con diferentes enfermedades y existe un interés global por investigar coagulantes sustitutos de los actuales, que sean más seguros para el ser humano. En 1988, Jahn publicó una lista de coagulantes naturales de origen vegetal que tradicionalmente se habían utilizado en África subsahariana, la India y América del Sur. Entre ellos, se encontraban las semillas de almendra, albaricoque, melocotón, Cactus Opuntia, legumbres, guisantes, lentejas, nueces, habas, guar y Moringa Oleífera. Algunos de ellos han sido estudiados con mayor profundidad, proporcionando resultados positivos en relación a su actividad coagulante. A continuación, se muestran las especies de coagulantes naturales más estudiadas en la actualidad.

- Moringa Oleífera
- Arroz
- Almidón
- Cactus Latifaria y Prosopis juliflora
- Taninos de Valonia
- Tamarindo
- Samanea saman
- Algas marinas
- Cactus
- Tuna Opuntia
- Maíz dulce

VENTAJAS

- Bajo costo
- Biodegradabilidad del lodo producido
- Estabilidad del pH del agua tratada con dicha sustancia.
- Remoción de color verdadero y aparente
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor

DESVENTAJAS

- Alteración del pH del agua
- Incremento del consumo del cal para estabilizar Ph
- Dosis mayores
- Requiere personal para recolección

4.3.1 SEMILLAS DE MORINGA

De todos los coagulantes naturales, el coagulante primario de origen vegetal más conocido y estudiado en la actualidad es la semilla de Moringa Oleifera. Moringa Oleifera fue en su origen un árbol ornamental del Sudán, plantado durante la ocupación británica. Moringaceae es el nombre de la familia de plantas que engloba a más de 14 especies conocidas, endémicas de los países africanos, Madagascar, Arabia y la India. La mitad de ellas son relativamente comunes en la actualidad y son esporádicamente cultivadas, aunque sólo la Moringa Oleifera, es cultivada en toda el área tropical.

El método tradicional de clarificación del agua cruda (Lund, 1980; Jahn, 1984) mediante el uso de semillas de Moringa oleifera, consiste en añadir a una vasija que contiene el agua cruda a tratar, una bolsa de tela cerrada con las semillas finamente trituradas de la planta. Tras unas horas, la materia en suspensión presente en el agua cruda sedimenta y el sobrenadante clarificado se trasvasa a otra vasija para ser consumido directamente

Por su parte, los extractos salinos y acuosos crudos de Moringa han mostrado una gran eficacia como coagulante primario natural, alcanzando una reducción de la turbiedad elevada (entre 92-99 %), (Jahn, 1988; Muyibi et al., 1995b) y una producción de lodo residual menor que el producido por el sulfato de aluminio (Ndabigengesere et al., 1996). El principal inconveniente que presenta la Moringa oleifera y el resto de coagulantes naturales, es que cuando se adicionan al agua en forma de semillas pulverizadas, incrementan la carga orgánica de ésta de manera significativa añadiendo hasta un 90% de sustancias orgánicas que no actúan como agentes floculantes (Jahn, 1988; Ndabigengesere et al., 1995; Okuda et al., 2001a).

Este hecho, impide almacenar el agua tratada por un tiempo superior a 24 horas (Jahn, 1988).

Diversos estudios han demostrado que la actividad coagulante de las semillas de Moringa es comparable con la obtenida por el uso de sulfato de aluminio (Ridwan et al, 2011). Con la ventaja de que no altera las propiedades del agua tratada, por lo que se recomienda su uso en poblaciones rurales como un sustituto eficaz, barato y sin riesgos para la salud para la población consumidora (Olson y Fahey, 2011).

Melo y Turriago, (2012) estudiaron la efectividad coagulante de la Moringa oleífera como una alternativa de biorremediación en la purificación de aguas superficiales de su región. Para ello, manejaron dosificaciones de 300 mg/L del coagulante para las muestras de agua tomadas del caño cola de pato ubicado en el sector rural del municipio de Acacias, Meta. Con una turbidez de (230 NTU) al realizar las pruebas aplicando la dosis óptima del coagulante, demostraron que esta planta natural es altamente eficiente debido a que presenta una modificación benéfica importante en los sólidos totales pasando de 140 mg/L a 80 mg/L, lo cual equivale al 42,85% de remoción de sólidos totales y la turbidez de (230 NTU a 36 NTU) lo cual equivale al 84,34% de remoción en la turbidez, esto ofrece una posibilidad viable y eficiente para las fuentes hídricas contaminadas en nuestro país.

Sandoval y Laines, (2013) compararon en su investigación la eficiencia de coagulación entre tres tipos de soluciones obtenidas de las semillas de Moringa Oleífera y el sulfato de aluminio mediante prueba de jarras. El tratamiento del agua con sulfato de aluminio proporcionó los valores más altos de remoción de turbiedad (95.60%) y color (98.32%), seguida del tratamiento de la solución de Moringa en cloruro de sodio. Por otro lado, los tratamientos con Moringa Oleífera no cambiaron las propiedades químicas del agua tratada. Considerando las soluciones de Moringa, la eficiencia de eliminación de turbidez fue mayor cuando se utilizaron soluciones con cloruro de sodio (92.03%) y agua de mar (90.72%) que cuando se usó agua destilada como disolvente (56.02%), debido a que la presencia de iones promueve una mayor separación de proteínas solubles, responsables de la coagulación.

Patel et al, (2011) reportaron en su trabajo el uso de semillas de Surjana (Moringa), semillas de Maíz, y Chitosan como una alternativa ideal a los recientes métodos de coagulación para la remoción del colorante Rojo Congo. En su estudio exploraron la optimización de varios parámetros del proceso como el pH, dosis de coagulante, tiempos de floculación y temperatura. El máximo porcentaje de remoción del colorante Rojo Congo fue de 89.4% para la semilla de maíz, a pH 4.0, dosis coagulante de 25 mg/L. Pritchard et al, (2009) llevaron a cabo ensayos de laboratorio con los extractos de: Moringa oleífera, Jatropha curcas y Goma de guar. Los extractos fueron agregados a las muestras de agua obtenidas de cinco pozos poco profundos en Malawi. Los ensayos consistieron en ensayos de jarras para evaluar el potencial de la coagulación y evaluando parámetros fisico-químicos y microbiológicos. Los extractos demostraron mejores resultados en las aguas más turbias. Lograron una eficiencia de remoción superior al 90% con niveles de turbidez mayores a (49 NTU). Una reducción en coliformes era alrededor de 80 para todos los extractos. Morales et al, (2009) utilizaron soluciones y suspensiones de semillas maceradas de Moringa oleifera lam como coagulante para reducir la absorbancia de las partículas suspendidas en las aguas residuales generadas en un rastro. El tiempo mínimo de reacción fue de 5 minutos con una reducción de absorbancia de 25 % para agua residual de laguna, y respecto a la dosis de coagulante (suspensión de semillas) la más eficiente fue la de 25 g/L.

Ospina y Ramírez (2011) investigaron el coagulante natural extraído de la Moringa oleífera, usando para ello, agua turbia cruda del río Combeima, que abastece al acueducto urbano de la ciudad de Ibagué, con valores de turbidez de hasta (1500 NTU). La dosis óptima del coagulante fueron entre 30-95mg/ L, obteniendo significativamente valores de turbidez inferior a (10 NTU) establecida en la norma, comprobando así la eficiencia de este agente natural. Jodi et al, (2012) determinaron la eficiencia de las semillas en polvo de M. oleífera, H. sabdariffa y C. tridens como alternativa al uso de productos químicos sintéticos. Probaron la eficacia de mezcla de cada uno con el alumbre. La dosis óptima y turbidez (NTU) observadas fueron 80ppm y (7 NTU) alumbre, 120ppm y (5 NTU) M. oleifera, 130ppm y (110 NTU) C. tridens; 130ppm y (80 NTU) H. sabdariffa respectivamente. La dosis óptima fueron

(60ppm) y turbidez (5 NTU) fueron observados en mezcla de alumbre – M. oleifera, mientras que para alum - C. tridens y alum- H. sabdariffa fueron 80ppm a (5 NTU) y 80ppm a (6 NTU) respectivamente. El resultado obtenido para M. oleifera demostró que la planta se puede utilizar para el tratamiento de turbidez en el agua potable. Los resultados obtenidos cuando cada uno de la planta se combinó con el alumbre fueron mucho mejores. (Ramírez, Hildebrando Y Jaramillo Jhoan. Pag136-153. 2015)

Investigadores ingleses compararon la efectividad del coagulante natural obtenido a partir de las semillas de Moringa oleifera, con la de los coagulantes sintéticos convencionales, como sulfato de aluminio y sulfato férrico. Esta efectividad se estableció con base a la reducción del color, turbidez y concentración de E. coli, medida en Unidades Formadoras de Colonias (CFU). Mediante ensayos de jarras se probaron los 3 coagulantes en varias muestras de agua cruda. Los resultados obtenidos mostraron que la Moringa oleifera fue capaz de retirar el 84% de la turbidez y 88 % de E. coli, en una muestra de agua sintética elaborada en el laboratorio con 146 NTU y con una cantidad inicial de 10000 CFU (E. coli)/100ml, mientras que el sulfato de aluminio fue capaz de disminuir ambos parámetros hasta en un 99%

4.3.2 BELLOTA EUROPEA Y ROBLE

En los últimos años científicos de todo el mundo han intentado hallar, entre la flora y la fauna, especies endémicas capaces de remover con eficiencia las impurezas presentes en el agua destinada para consumo humano. Motivados por esta situación investigadores serbios estudiaron las semillas de bellota europea y varias especies de roble. Para cada prueba se usaron 4 muestras con 300 ml de agua con diferentes turbidez inicial, entre 17.5 y 70 NTU. Con el fin de cuantificar la actividad coagulante de cada extracto preparado, se realizaron varios ensayos de jarras, donde la mezcla rápida se realizó a 300 rpm por 1 minuto, manteniendo velocidad coagulación de 80 rpm por 30 min y la sedimentación duro 1 hora. Estos experimentos, les permitió comprobar la actividad coagulante que poseen las semillas estudiadas, además confirmaron la gran influencia del pH sobre el

desempeño de los coagulantes. Según los resultados reportados estas semillas presentan una eficiencia de remoción considerable, cuando se utilizan dosis pequeñas de coagulante (0.5ml/L), para aguas de baja y media turbiedad, en estas condiciones el extracto de bellota europea presento una actividad coagulante de 80% y el roble común del 70%

4.3.3 CACTUS

Siguiendo la misma línea de investigación en China, se estudió el comportamiento de un coagulante natural obtenido a partir de un cactus. Con base a los resultados obtenidos se concluyó que este principio activo bajo ciertas condiciones iniciales de turbidez (20 a 200 NTU), pH alcalino y 30 °C de temperatura, alcanza una 26 eficiencia de remoción muy alta y una turbidez final menor a 5 NTU. En este caso la dosis óptima fue similar a la del sulfato de aluminio para una misma muestra de agua, a su vez, se utilizó de manera conjunta el cactus y el sulfato de aluminio para el tratamiento de aguas residuales, la eficiencia de remoción de turbidez fue mayor a la obtenida cuando se utilizó solo uno de los dos .

El cactus es la más conocida de las plantas suculentas y se caracteriza por la presencia de púas y de tejido pulposo para conservar el agua en los tallos, hojas y raíces cuando tienen que soportar períodos de sequía (Sáenz, 2006).

Pocas especies vegetales tienen la versatilidad de transformación que ofrecen los cactus para el consumo humano. Sin embargo, sus posibilidades industriales son muchas, lo que hace aún más interesante su cultivo y explotación (Sáenz, 2006).

La tuna (*Opuntia ficus-indica*) pertenece a la familia Cactaceae, siendo las cactáceas especies endémicas del continente americano que se desarrollan principalmente en las regiones áridas y semiáridas. Las Opuntias se han adaptado perfectamente a zonas áridas caracterizadas por condiciones secas, lluvias erráticas y suelos pobres expuestos a la erosión. Esta especie es una de las más estudiadas debido a su buen rendimiento en el proceso de la coagulación algunos estudios han demostrado su eficiencia.

Villabona et al, (2013) estudiaron la *Opuntia ficusindica* evaluando la eficacia de dicho coagulante para la eliminación de turbidez y de color en aguas crudas. Los valores de la turbidez inicial fueron de (171 NTU). Luego del tratamiento obtuvieron un máximo de remoción de color del orden del 54%, y una remoción de turbidez de 72% cuando se aplicó coagulante en una dosis de 90 mg/L.

Olivero et al, (2013) demostraron la efectividad coagulante del cactus *Opuntia ficusindica* y del alumbre, en la potabilización del agua. Para ello, manejaron concentraciones de 35 y 40 mg/L del coagulante para las muestras de agua tomadas del río Magdalena en Gambote, departamento de Bolívar, Colombia.

Con una turbidez de (276 NTU), después de aplicar las dosis del coagulante, los porcentajes de remoción de turbidez oscilaron entre 99,80% y 93,25%, estipulando que la mayor remoción de la turbidez se logró con el alumbre seguido por la *Opuntia*.

Fuentes et al, (2011) evaluaron la efectividad de un coagulante extraído del cardón *Stenocereus griseus* en la potabilización del agua. Para ello, prepararon soluciones diluidas con turbiedades entre (20 y 100 NTU). Después de aplicar las dosis del coagulante, los porcentajes de remoción de turbidez oscilaron entre 14,50 y 80,42%, antes de la simulación de la filtración y entre 69,27 y 96,46%, luego de ello, demostrando la efectividad del coagulante extraído de *Stenocereus griseus* en la potabilización de agua.

Parra et al, (2011) estudiaron un coagulante extraído de la tuna *Opuntia wentiana*, en la clarificación del agua. Para ello, recolectaron muestras de agua cruda natural de la planta de tratamiento Pueblo Viejo (Estado Zulia, Venezuela) y a partir de éstas prepararon aguas diluidas con turbiedades iniciales de (100-200 UNT). Se emplearon varias dosis de coagulante (300, 400, 500, 600 y 700 ppm) del coagulante natural. Las dosis óptimas del coagulante fue de (600 y 700 ppm), los porcentajes de remoción de turbidez oscilaron entre 85,25 y 94,84% antes de la simulación de la filtración y entre 91,82 y 98,34% luego de ello.

Fuentes et al, (2012) en su estudio comprobaron la eficiencia de la *Opuntia cochinellifera* como coagulante, simulando coagulación-floculación, sedimentación

y filtración en aguas diluidas (20, 40, 60 y 80 NTU) a las que aplicaron la mezcla del coagulante (1000, 2000, 3000, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 8000 ó 10000 ppm). Para las turbiedades 20, 40, 60 y 80 NTU, las dosis óptimas del coagulante fueron 4500, 8000, 8000 y 6000 ppm, respectivamente. La turbidez osciló entre 3,15 y 17,13 NTU, disminuyendo a valores permisibles al filtrar. Se observaron porcentajes de remoción elevados antes de la filtración (78,59- 85,88%) y después de ésta (86,10- 93,90%).

Jiménez et al, (2012) evaluaron la eficiencia del cactus de la tuna *Opuntia cochenillifera*, para remover el color en agua de río y agua artificial para el consumo humano. Se comparó su desempeño con el coagulante sulfato de aluminio y un floculante catiónico. Se observó una eficiencia de remoción de color del 94% en agua artificial, cuando se aplicó como tratamiento único (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 aplicada a una dosis de 22,5 mg/l y 7 mg/l de $Al_2(SO_4)_3$.

Muchas especies de cactus hacen parte de la larga lista de sustancias ensayadas para obtener coagulantes naturales alrededor del mundo. Por ejemplo en México se extrajo el agente activo de varias especies nativas de cactus (*Opuntia imbricata* y *Opuntia lindheimeri*), usando acetona como solvente. Análisis fisicoquímicos realizados, mostraron un alto contenido de sales inorgánicas, las cuales son importantes en el proceso de coagulación, porque favorecen la desestabilización de las cargas. Los coagulantes naturales obtenidos fueron utilizados para el tratamiento de aguas sintéticas, aguas residuales domésticas y para la remoción de metales pesados. La remoción de turbidez, de las dos especies fue muy similar para las pruebas con aguas sintéticas y aguas residuales domésticas, para la remoción de metales pesados los coagulantes fueron muy efectivos en un pH alcalino. Los

resultados obtenidos permitieron concluir, que los cactus pueden utilizarse, como coagulantes por sí solo, o trabajar junto con el alumbre para aumentar su eficiencia.

4.3.4 FRIJOL

Semillas como la del frijol también han sido estudiadas, con el objetivo de evaluar la efectividad del agente activo y mejores técnicas de extracción con una solución de NaCl. Los resultados finales sugieren, que la mayor concentración del principio activo se obtuvo con una solución de 0,5 M y para una concentración de 1,75 M se obtuvo la mayor actividad (72,3%) del coagulante, casi 22% más efectivo que las semillas crudas del frijol, esto permite la utilización del coagulante para la purificación del agua, aunque su poder de remoción no se comparara con coagulantes más eficientes.

A su vez, en Colombia se han realizado investigaciones sobre la utilización de coagulantes naturales, como el almidón de yuca y el almidón de maíz, los cuales han sido evaluados junto con el sulfato de aluminio B y un polielectrólito comercial, como agentes coagulantes de aguas crudas superficiales, utilizadas para el abastecimiento de una planta potabilizadora. Las pruebas se realizaron a 20 °C, con agua cruda de la quebrada Las Delicias en Bogotá D.C. la cual presentó una turbidez promedio de 175 ± 5 NTU, color 70 ± 5 UPC y pH de $5,4 \pm 0,5$. Los resultados obtenidos mostraron un buen desempeño del almidón de maíz, comparable con el polielectrólito y mejor que el sulfato de aluminio B, para estas condiciones se obtuvo una dosis óptima de 20 mg/L, turbidez final por debajo de 20 NTU, color inferior a 25 UPC y pH de 5,38, parámetros acordes con la normativa colombiana. Por el contrario el almidón de yuca presentó un mal desempeño en estas condiciones y fue el menos efectivo de los agentes coagulantes evaluados [2]. En la Universidad de Cartagena, también se han realizado estudios sobre coagulantes naturales, la fuente considerada fue las semillas de cañafístula (*Cassia fistula*) una planta nativa de la región y fuente de alimento. Las semillas fueron secadas y trituradas. El polvo obtenido fue utilizado para tratar una muestra de agua recolectada en el canal del Dique, los resultados permitieron establecer una dosis

óptima de 20 mg/L para un mismo volumen de control, además, este agente coagulante no afectó de manera significativa el pH, la alcalinidad total y dureza total del agua cruda tratada. La remoción de la turbidez fue del 95% y de color del 87,5%, las cuales son comparables por la normativa vigente en ese año. Este polvo también fue utilizado como desinfectante microbiológico, las pruebas fueron satisfactorias, ya que se obtuvo un agua segura y confiable.

4.3.5 MUCÍLAGO DEL NOPAL OPUNTIA

Las plantas de la familia Cactaceae son originarias de América y la conforman 98 géneros y más de 1500 especies. El género *Opuntia* representa más de 200 especies (Flores et al., 2006) y generalmente se localizan en zonas áridas y semiáridas. Son capaces de almacenar y conservar el agua en sus tejidos, con lo cual sobreviven a su escasez y a las marcadas variaciones de temperatura propias de estas zonas (Cervantes, 2005; Guevara et al., 1997).

Bejerano y Machín mediante una investigación realizada en Cuba y que dieron a conocer en el año 2000, 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. Además, afirman que el coagulante natural del nopal *Opuntia* es muy útil en la remoción de coliformes (Flores et al., 2006).

En el año 2004, Almendárez De Quezada a través de un estudio elaborado 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 con fines de potabilización. Una de sus conclusiones es que este nopal es capaz de remover 91% de turbidez del agua.

Parra et al. (2011) investigaron la efectividad del coagulante extraído del nopal *Opuntia wentiana* en la clarificación del agua. Encontraron que los porcentajes de remoción de turbidez en el agua oscilan entre 85,25 y 94,84% antes de simular la fase de filtración del proceso de potabilización del agua. Además lograron remover

entre 91,82 y 98,34% de la turbidez del agua después de llevar a cabo los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración. Este proyecto fue realizado en Venezuela.

El coagulante natural extraído del Nopal en combinación con el coagulante primario sulfato de aluminio mostraron efectividad en la clarificación del agua superficial proveniente del Rio Magdalena, debido a que se logró una remoción de la turbidez del agua hasta 1,78 NTU, una reducción en el color hasta un 100 % respecto a la muestra sin tratamiento (0 UPC), y eliminación total de sólidos totales disueltos, resultados que se encuentran dentro de los límites establecidos en las normas colombianas que establecen valores máximos permisibles de 2 NTU, 15 UPC y 200 mg/L respectivamente. Además el coagulante natural no alteró en gran medida el pH neutro del agua. Con todos los tratamientos aplicados se logró una eficiencia de remoción de turbidez superior al 50 %, siendo las más altas entre 96-98 %; no obstante, estos resultados favorables se alcanzaron a bajas proporciones de mucílago de nopal, lo que indica que aún hay gran dependencia del coagulante inorgánico, que además puede ser el responsable del aumento en la conductividad eléctrica luego del tratamiento de clarificación del agua.

Por otro lado en Managua – Nicaragua se extrajo y analizó, de la Tuna (*Opuntia Cochinellífera*), un polielectrólito de origen natural. El proceso de extracción se llevó a cabo a través de una serie de operaciones unitarias de secado, molido, tamizado, lixiviación con alcohol etílico, filtración y evaporación. Para caracterizar este coagulante se sometió a una espectroscopia infrarroja, esto permitió identificarlo como un polielectrólito y para la comprobación de su capacidad coagulante, se realizó la prueba de jarra, con aguas superficiales con turbidez de 49 NTU, 199 UPC y un pH de 9,14, los resultados mostraron alta eficiencia con los coagulantes metálicos, una eficiencia media con el coagulante natural y una baja eficiencia con el coagulante sintético.

El tipo de coagulante utilizado en este estudio influyó en el proceso de clarificación del agua. Sin embargo, su velocidad de agitación y concentración no lo hicieron. La

mayor remoción de la turbidez del agua del río Magdalena se logró con alumbre (99,80%); siendo la remoción con Opuntia menor (93,25%). El agua del río tratada con sulfato de aluminio cumplió con la norma colombiana para la calidad del agua para consumo humano que acepta 2 UNT como máximo valor de turbidez. Sin embargo, el agua tratada con Opuntia no lo hizo. Aún así, se logró demostrar que el mucílago del nopal Opuntia ficusindica 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. La filtración ayudará a mejorar la remoción del material suspendido en el agua y posiblemente a cumplir con el valor máximo aceptado de turbidez propuesto por la legislación colombiana respecto al tema. El alumbre se disolvió más en el agua del río que el Opuntia bajo las mismas condiciones de dosis de coagulante y velocidad de agitación, que se reflejó en el aumento de sólidos disueltos totales en el agua después de ser tratada. El agua cruda analizada presentó una turbidez que sobrepasó el valor límite propuesto por la norma Colombiana para la calidad del agua para consumo humano, demostrándose que el agua cruda del río Magdalena en Gambote no es apta para consumo humano. Por ello debe ser tratada para lograr este fin. Siendo el Opuntia una buena opción como coagulante natural.

4.3.6 ALMIDON

El almidón, además de ser consumido como tal, se puede someter a una variedad de procedimientos de transformación que cambian sus propiedades funcionales y lo convierten en estabilizante, emulgente y gelificante.

Antov *et al.* (2010) utilizaron extractos del frijol común (*Ph. vulgaris*) y reportan que las semillas son una fuente potencial de coagulante. El objetivo del estudio fue la purificación parcial de los componentes activos de coagulación extraídos de la semilla del frijol común (CBS) y concluyen que el extracto purificado del CBS tiene una capacidad coagulante 22 veces mayor que la del extracto crudo.

4.3.7 SULFATO DE ALUMINIO MEZCLADO CON ALMIDON

Las mezclas de sulfato de aluminio con almidón de yuca tienen un potencial de coagulación-floculación y podrían ayudar al tratamiento de las aguas superficiales. El empleo de almidón como agente coadyuvante en la remoción de color, mezclado con sulfato de aluminio (agente coagulante), permitiría reducir el costo económico, el impacto ambiental y los efectos a la salud pública. Como resultado de esta investigación, se abre una posibilidad de experimentar con otros tipos de aguas tales como las residuales industriales o municipales. Es importante realizar futuras investigaciones con almidones estructuralmente modificados empleando técnicas de copolimerización por injerto con el propósito de aumentar la efectividad en la remoción de color y turbiedad en procesos de tratamiento de aguas superficiales y eliminar el uso de coagulantes metálicos.

Tabla 7. Sulfato de aluminio y almidón de yuca

PARAMETRO	SULFATO DE ALUMINIO	DE SULFATO DE ALUMINIO + ALMIDON DE YUCA
TURBIEDAD	98.7%	97.9%
COLOR	87.9%	91.6%
PH	6.3	6.7

La tabla muestran los resultados del tratamiento del agua usando como coagulante sulfato de aluminio y una mezcla entre sulfato de aluminio más almidón de yuca.

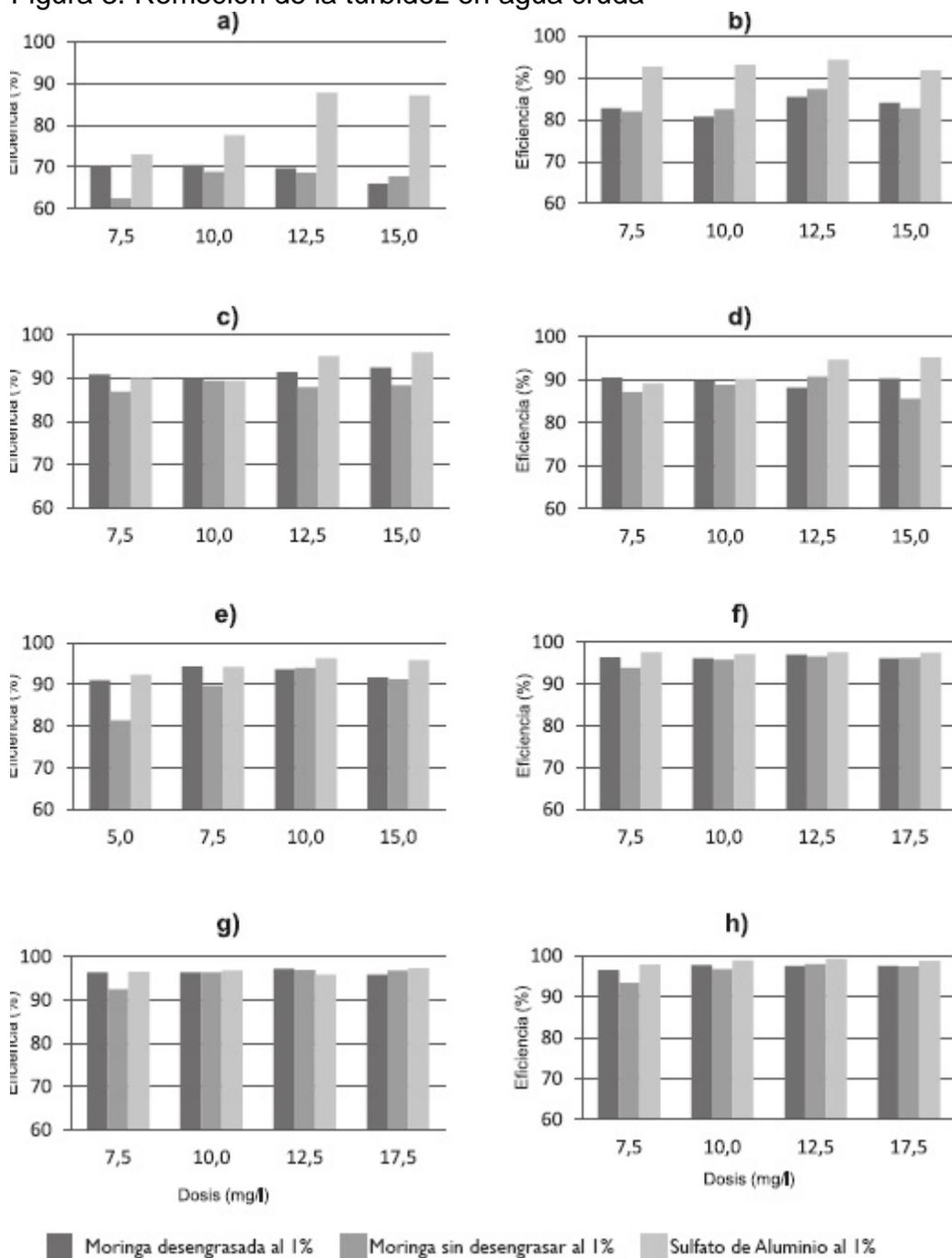
Para este estudio se utilizó una mezcla de coagulantes entre el almidón de yuca y el sulfato de aluminio. Para extraer el almidón se cortaron en trozos iguales la yuca, incorporado en agua al fuego, durante 45 minutos, hasta ebullición. Luego fue licuado y pasado por el papel tamiz, para absorber el agua. La pasta fue llevada al horno durante 24 horas, para preparar el sulfato de aluminio líquido se utilizó sulfato de aluminio granulado tipo B.

Las observaciones realizadas durante las pruebas de jarras y los datos de turbiedad indican que el almidón de yuca utilizado es efectivo como ayudante de floculación, cuando se usa sulfato de aluminio líquido. De este modo se corrobora que el almidón de plátano es prometedor para substituir el uso de polielectrolitos comerciales y reducir así los costos de los tratamientos por coagulación/ floculación. Cuando se usó sulfato de aluminio granulado no se obtuvo una identificación clara de los factores relevantes, de modo que los datos no son adecuados para el análisis estadístico.

4.3.8 COMPARACION ENTRE EL SULFATO DE ALUMINIO Y LA MORINGA

Se presentan los resultados de los dos tipos de coagulantes utilizados para las dosis que mostraron mayor eficiencia de remoción de turbidez. El comportamiento de remoción varió a medida que se incrementó el nivel de turbiedad en el agua cruda. Para concentraciones de turbiedad baja (menor a 60,0 UNT) el coagulante sintético presentó mayor eficiencia de remoción frente al coagulante natural, tanto desengrasado como sin desengrasar. Sin embargo, cuando la turbiedad del agua cruda fue alta (mayor a 250,0 UNT) la eficiencia de remoción de los tres coagulantes fue muy similar, logrando remover más del 94 % de la turbiedad inicial de las muestras tomadas del río Sinú. Este resultado es acorde con lo registrado por Léo *et al.* (2009), para la semilla de *M. Oleífera* usada como coagulante natural en aguas de baja turbidez, donde afirma que la eficiencia de remoción de turbiedad es ligeramente inferior a la observada con sulfato de aluminio, y su uso puede justificarse por el hecho de representar una tecnología sostenible y amigable con el ambiente. La eficiencia de remoción del coagulante desengrasado y el coagulante sin desengrasar no es muy diferente, lo que permite afirmar que no es estrictamente necesario extraer las grasas de las semillas, en particular, cuando se prepara el coagulante en solución salina y se aplica en agua cruda de turbidez inicial entre 200 UNT y 360 UNT.

Figura 3. Remoción de la turbidez en agua cruda



a) 24,56 UNT b) 48,20 UNT c) 66,0 UNT d) 96,20 UNT e) 174,33 UNT f) 247,50 UNT g) 320,0 UNT h) 364,6UNT

El rango de turbidez final lograda para el coagulante de *M. Oleífera* se halló entre 5,0 UNT y 10,50 UNT, mientras que para el sulfato de aluminio, estuvo entre 2,66

UNT y 8,20 UNT. Todos los valores reportados son superiores a los recomendados por la USEPA (1998), que deben ser menores a 2,0 UNT en las salidas de las unidades de clarificación, con el fin de minimizar la carga de partículas que llegan a los filtros, evitar bajas carreras de filtración y aumentar la calidad del efluente filtrado, que debe ser menor o igual a 0,10 UNT para garantizar que el agua esté libre de huevos de parásitos (CEPIS, 2004). En Colombia, el valor máximo de turbidez del agua filtrada es de 2,0 UNT (Ministerio de la Protección Social y ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007), lo que permite que el afluente a los filtros sea de una turbidez mayor, sin perjuicio de los problemas mencionados para los filtros. De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos de jarras, independientemente del tipo de coagulante que se utilice, es necesaria la adición de ayudantes de coagulación (polielectrolitos) que permitan mejorar la calidad del agua coagulada, ya que la turbidez final en un proceso de coagulación-floculación depende, básicamente, de las características fisicoquímicas del agua cruda (CEPIS, 2004).

Tabla 8. Turbidez final lograda con la dosis optima de los coagulantes ensayados

Turbidez Inicial agua cruda (UNT)	Turbidez Final con <i>M. Oleífera</i> desengrasada (UNT)	Turbidez Final con <i>M. oleífera</i> sin desengrasar (UNT)	Turbidez Final con Sulfato de Aluminio (UNT)
24,56	7,25	7,62	3,00
48,20	7,00	6,10	2,76
66,00	5,00	7,00	2,66
96,20	9,13	8,90	4,70
174,33	10,00	10,50	6,40
247,50	7,33	8,50	6,00
320,00	8,70	9,80	8,20
364,66	8,30	7,50	3,00

Para turbiedades entre 200 UNT y 360 UNT, el coagulante natural de *M. Oleífera* tiene el mismo comportamiento que el sulfato de aluminio, con la misma

concentración (1 %) y en dosis mayores a 10 mg/L. Con dosis menores y turbiedades bajas del agua cruda (menores a 50 mg/L), el sulfato de aluminio es más eficiente que el coagulante natural. Sin embargo, debido a las características del agua cruda del río Sinú, es necesario utilizar ayudantes de coagulación para conseguir valores cercanos a 2,0 UNT antes del proceso de filtración, independientemente del tipo de coagulante que se utilice. El pH y la alcalinidad de las muestras tratadas con coagulante natural no tuvieron cambios significativos luego de la aplicación de las dosis, lo que es una ventaja sobre los coagulantes sintéticos, ya que no se requiere de acondicionamiento químico ni de estabilización del pH en el agua potabilizada. La extracción de grasas de las semillas de *M. Oleífera* no es estrictamente necesaria para obtener el coagulante natural, en particular, cuando la turbidez del agua cruda está entre 200 UNT y 360 UNT, lo que lo convierte en una excelente alternativa para la potabilización de agua en zonas rurales y, en general, en áreas pobres y de difícil acceso geográfico en países en vías de desarrollo.

4.4 COAGULANTES USADOS ACTUALMENTE

4.4.1 PAC

El policloruro de aluminio es un coagulante inorgánico a base de sales de aluminio polimerizadas, es ampliamente utilizado en diferentes procesos industriales. En las plantas potabilizadoras es manipulado principalmente para remover color y materia coloidal en sistemas acuosos.

A partir de 1990 se implantaron una nueva generación de coagulantes inorgánicos (PAC,s), como reemplazo de sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, cloruro férrico, sulfato férrico y otras sales inorgánicas convencionales no polimerizadas, estos reaccionan diferente a los coagulantes ya establecidos en el proceso de clarificación del agua ya que su composición química cambia en ellos, si se compara los floculos que se forma de los PAC,s son pequeñas esferas de tamaño de 25 mm, mientras

que los de el sulfato de aluminio son de 25 a 100 mm lo que genera una menor turbiedad en suspensión.

Es un coagulante también llamado Hidroxicloruro de aluminio, policloruro de aluminio o polihidroxicloruro de aluminio, para su fabricación se usa el hidróxido de aluminio y el ácido clorhídrico como materia prima, estos se colocan en un reactor y bajo cierta temperatura y presión son agitados el producto que resulta en este caso el PAC se pasa por un filtro de bandas para así disponerlo en almacenamiento y posteriormente distribuirlo

Como segunda opción algunos fabricantes prefieren reemplazar el hidróxido de aluminio por bauxita natural que puede ser fabricado en reactores atmosféricos con lingotes de aluminio sólido y ácido clorhídrico la temperatura óptima en este proceso es de 98 °C, en el cual es necesario aplicar agua para obtener la densidad requerida por el producto.

Otto Helmboldt, (2002) hace un estudio del policloruro de aluminio es una sal polimérica del cloruro de aluminio, fabricado especialmente para dar mejores características coagulante y floculante que las sales de hierro y aluminio comúnmente usadas. El proceso resulta de hacer reaccionar ácido clorhídrico 32% con hidróxido de aluminio, hidratado aluminio metálico manteniendo la temperatura de reacción a 80°C, se da una reacción exotérmica. La solución obtenida es filtrada para eliminar el exceso de hidróxido de aluminio, que se recircula al proceso, y las aguas madres constituyen el policloruro de aluminio con un concentraciones expresadas como óxido de aluminio del 10 al 18%.

PROPIEDADES

- Su dosis menor que el sulfato de aluminio (basado en Al_2O_3) y el coste de tratamiento de agua es más bajo que otros floculantes inorgánicos.
- El producto puede causar la formación rápida de flóculos, la formación de grandes flóculos y la precipitación rápida. Su capacidad de tratamiento es 1,3 a 3,0 veces de otros floculantes inorgánicos.

- Disfruta de la capacidad de adaptación de toda la gama de las fuentes de agua de diferente temperatura y una buena solubilidad.
- Es ligeramente corrosivo y fácil para la operación.
- El producto líquido es adecuado para la dosificación automática. Por otra parte, no va a bloquear las tuberías más largo tiempo
- Baja acidez es inferior al de otros coagulantes inorgánicos.

4.4.1.1 PRESENTACION COMERCIAL

Tabla 9. Presentación comercial del Hidroxicloruro de aluminio

PRODUCTO	PRESENTACION COMERCIAL
Hidroxicloruro de aluminio liquido (galon)	
Hidroxicloruro de aluminio (liquido) 25 litros	

<p>Hidroxiclورو de aluminio Liquido 250 litros</p>	
<p>Hidroxiclورو de aluminio Liquido 1000 litros</p>	

Fuente: propia

4.4.1.2 PRECIO

Tabla 10. Precios Hidroxiclورو de aluminio

PRODUCTO	CANTIDAD	PRECIO
Hidroxiclورو de aluminio liquido (galon)	1 galon	\$ 25.000
Hidroxiclورو de aluminio (liquido) 25 litros	25 litros	\$ 85.000
Hidroxiclورو de aluminio Liquido 250 litros	250 litros	\$ 425.000
Hidroxiclورو de aluminio Liquido 1000 litros	1000 litros	\$ 1.700.000

4.4.2 QUINSAFLUOR

Es un producto químico líquido formulado para el tratamiento de aguas tanto superficiales como subterráneas con altos contenidos de Flúor difícil de separar con los coagulantes tradicionales disponibles en el mercado

Cuando las concentraciones de flúor superan los límites permitidos para el consumo humano generan con el tiempo fluorosis dental o manchado en los dientes y problemas a nivel óseo, motivo por el cual es necesario emplear el tratamiento del agua adecuado con el producto formulado para tal fin.

Beneficios:

- Óptimo en condiciones de agua cruda de media y baja turbiedad en donde se presentan concentraciones de Flúor altos; para sistemas de tratamiento convencionales o compactos.
- Empleado en amplios intervalos de pH. Por su carácter ácido llega rápidamente al pH óptimo de coagulación.
- Formulado para potabilizar aguas superficiales y/o subterráneas, así como para tratamiento de aguas residuales industriales. Genera bajos contenidos de aluminio residual en el agua tratada.
- Contenido de material insoluble muy bajos, facilitando la operación de dosificación
- Adecuado para el tratamiento de aguas con alcalinidades y durezas medias y altas

PRECIO

Tabla 11. Precio del coagulante Quinsafluor

PRODUCTO	CANTIDAD	PRECIO
Quinsafluor	25 kg (caneca)	46.400

Fuente Quimica integrada s.a. quinsa. aipe, huila

4.4.3 SUPERQUINSA

Es un producto químico sólido de tecnología avanzada formulado para el tratamiento de aguas con altos contenidos de materiales contaminantes de difícil remoción con los coagulantes tradicionales ofrecidos en el mercado.

Este producto puede ser aplicado directamente sobre el agua a tratar o preferiblemente elaborando soluciones entre el 5% y 10%, con el fin de que el contenido activo del producto se incorpore fácilmente y lograr el máximo desempeño.

CARACTERISTICAS

- Es un coagulante inteligente de forma sólida, de aspecto característico, miscible con agua, formulado en base a sales de Hierro y Aluminio, su color puede variar de amarillo a marrón.
- Durante el proceso de coagulación presenta un doble mecanismo de acción; por un lado actúa conforme al mecanismo clásico de los "coagulantes minerales" y por otro lado actúa inteligentemente en forma semejante a los "polielectrolitos orgánicos" produciendo de esta forma una interacción mutua entre los polímeros de aluminio y los coloides.
- Logra mayores velocidades de decantación de los flóculos, lo que permite aumentar la capacidad de decantación de los sistemas ya instalados o en su caso reducir el costo de las instalaciones nuevas para una misma capacidad de floculación.
- Menor abatimiento del pH comparado con los sulfatos de aluminio tradicionales, lo cual disminuye el consumo de alcalinizante corrector del pH.
- A Posee una buena capacidad floculante, con formaciones de tamaño considerable y uniforme que decantan con mayor rapidez, dejando una turbiedad residual más baja que los tratamientos con productos con rangos similares de alúmina. Por lo tanto, evita el exceso o incremento del aluminio residual en el agua tratada.

- Está formulado para aguas con presencia de alto color orgánico, obteniéndose mayores remociones tanto de color como de turbiedad.

BENEFICIOS

- Mejores remociones de color y turbiedad comparada con otros coagulantes, así como muy bajos contenidos de aluminio residual debido a mayor peso en el floc formado, lo cual acelera el proceso de sedimentación.
- Disminuye la cantidad de post-alcalinizante en el tratamiento del agua, como resultado del gran aporte de basicidad libre en el producto y no permite disminuciones apreciables en el Ph.
- Disminuye la cantidad de pre-alcalinizante necesaria para aguas a tratar de baja alcalinidad, ya que el SUPERQUINSA aporta alcalinidad por su contenido de basicidad libre, mejorando el proceso de coagulación.
- Alta remoción de la materia orgánica contenida en el agua, presente también como hierro y/o color orgánico.
- Mayores carreras de filtración, debido a que ofrece óptima sedimentación y baja apreciable de las cantidades de microflocs que pasan a los filtros, ocasionando menos lavados y menor cantidad de agua necesaria para los retrolavados.

APLICACIONES

Por su tecnología avanzada SUPERQUINSA puede ser empleado en todo tipo de aguas donde sea necesaria una floculación rápida y eficaz, como:

- Aguas de piscinas: por sus excelentes cualidades en la floculación directa y rápida, con formación de flóculos grandes fáciles de eliminar por los limpiafondos.
- Tratamiento de aguas superficiales: Para la obtención de agua potable o de uso industrial.
- Tratamiento de aguas residuales industriales: Procedentes de industrias siderúrgicas, papeleras, petroleras, alimentos, grasas y aceites, etc. para hacer posible su posterior reciclaje o reuso

ESPECIFICACIONES

- Contenido Activo 18 % Mínimo
- Insolubles 6 % Máximo
- Basicidad Libre Al₂O₃ 2 % Mínimo

PRESENTACIÓN COMERCIAL

Granulado, en sacos de 25 Kg. y 50 Kg. empacado en sacos de polipropileno con laminado interno, debe ser almacenado en bodegas cerradas sobre estibas plásticas o de madera. Puede ser aplicado con dosificadores tradicionales o en dilución por medio de sistemas automáticos de bombeo.

PRECIO

Tabla 12. Precio del coagulante Superquinsa

PRODUCTO Y CANTIDAD	PRECIO
Saco por 25 kg	\$25.000 IVA incluido
Saco por 50 kg	\$49.300 IVA incluido

Fuente Química integrada s.a. quinsa. aipe, huila

5. DOSIFICACION

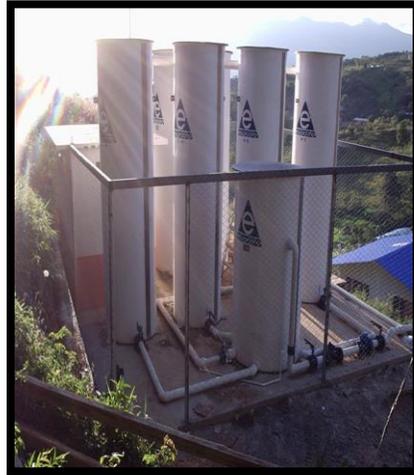
Dependiendo de las características fisicoquímicas del agua que se pretende tratar, se va a establecer la adición o no de un coagulante para obtener de ella la calidad de agua que se demanda. Las dosificaciones adecuadas de coagulante se determinan mediante la realización de pruebas de jarras, dependiendo, principalmente, de dos condiciones la formación de los floculos y la turbiedad que se presenta en cada una de las jarras.

La dosis de coagulante es un parámetro determinante dado que si éste se adiciona por debajo de la cantidad requerida, no se neutralizan totalmente las cargas de las partículas, la formación de microflóculos es escasa y la turbiedad del agua tratada es elevada; si se adiciona exceso de coagulante, se produce la inversión de las cargas de las partículas y la sucesiva formación de gran cantidad de microflóculos turbiedad del agua tratada es, igualmente, elevada.

5.1 EQUIPOS DOSIFICADORES DE COAGULANTES

EQUIPO	IMAGEN
<p data-bbox="363 1457 672 1493">Tanques de plástico</p>	

Tanques de concreto (forma cilindro)



Tanques de concreto (circular o cuadrados)



Tanque de aluminio



6. ECONOMÍA

Normalmente el precio es el factor más importante para la selección de un coagulante. Esto no significa que el precio por kg contra otro coagulante sería más barato, sino que el costo global del tratamiento en m³ debe de ser más económico. Esta evaluación se debe hacer considerando los siguientes aspectos:

- Costo de coagulante
- Dosis de coagulante
- Costo de polímero
- Dosis de polímero
- Costo de ayudantes de filtración
- Agua perdida en el lavado de los filtros
- Costo del ajuste de pH
- Costo de desinfección
- Producción de lodo
- Mantenimiento & dosis de coagulante
- Valor de la mejor calidad del agua

7. CONCLUSIONES

- Los coagulantes químicos mas usados actualmente son sulfato de aluminio y PAC.
- El precio del sulfato de aluminio es mas bajo que el del PAC, pero el costo global del tratamiento del agua es mas económico usando policloruro de aluminio.
- Los coagulantes naturales demuestran mejores beneficios en los residuos que se generan al tratar el agua.
- La dosificación se realiza a través de la prueba de jarras.
- En la planta de tratamiento se pueden manejar dos coagulantes y se utilizan de acuerdo a las características que posea el agua.

8. REFERENCIAS

Organización Panamericana de la Salud y Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/CEPIS). 2005. Título: Tratamiento de agua para consumo humano. (OPS/CEPIS/PUB/05.113.).

ARBOLEDA VALENCIA, J. 1992. Teoría y Práctica de la purificación del agua. Ed. Acodal. Colombia. 31p.

Ciencia Abierta. 2007. Coagulación y floculación de contaminantes del agua.

IRAM Instituto Argentino de Normalización y Certificación

Vargas, M. y Romero, L. (2006). Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 19 (4), 37-41.

Calidad del agua Jairo Alberto romero rojas 2005 pag 234 editorial escuela colombiana de ingeniería

Flores, A., Acosta, G., Murillo, B., Trejo, R. y Arreola, J. (2006). Evaluación preliminar de la reserva del nopal (*Opuntia ssp*) en la región Laguna-Chihuahua. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, (2), 191-196

Alméndarez De Quezada, 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.

Parra, Y., Cedeño, M., García, M., Mendoza, I., González, Y. y Fuentes, L. (2011). Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de *Opuntia Wentiana* (Britton & Rose) / (Cactaceae). *Redieluz*, 1 (1), 27-33.

Contreras, k, Mendoza Y, Jairo, Salcedo G, Olivero R, Mendoza P (2015) "Determinación de la eficiencia del nopal (opuntia ficus-indica) como coagulante natural complementario a un coagulante primario en la clarificación de agua"

Esquivel, P. (2004). Los frutos de las cactáceas y su potencial como materia prima. *Agronomía Mesoamericana*, 15(2), 215-219.

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.

Cervantes, M. (2005). Plantas de importancia económica en zonas áridas y semiáridas de México. *Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina (Comp.)* (pp. 3388-3407). Sao Paulo: Observatorio Geográfico de América Latina.

Jahn S.A.A, Dirar H.; Studies on natural water coagulants in the Sudan with special reference to *Moringa oleifera* seeds. *Water S.A.* 5 No. 2 (1979)

Martinez, J. Gonzales, L. Evaluación del poder coagulante de la tuna (*opuntia ficus indica*) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas. Universidad de Cartagena. Colombia (2012)

Garcia, B. (2007). Metodología de extracción in situ de coagulantes natural para la clarificación de agua superficial. Aplicación en países en vías de desarrollo (tesis de master). Universidad politécnica de valencia. Venezuela.

Pritchard M, Craven T, Mkandawire T, Edmondson A S, O'Neill J G. A comparison between *Moringa oleífera* and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution for developing countries. *Physics and Chemistry of the Earth* 2010; 35; 798 – 805.

Šciban M, Klašnja M, Antov M, Škrbic B. Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. *Bioresource Technology* 2009; 100; 6639 – 6643.

Vásquez O. Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales [tesis]. Monterrey: Universidad Autónoma de Nuevo León; 1994.

Trujillo, D. Duque, L. Arcila, J. Rincón, A Pacheco, S.; Herrera, O. Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Rev. ion* vol.27 no.1 Bucaramanga Jan./June 2014

Zhang J, Zhang F, Luo Y, Yang H. A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment. *Process Biochemistry* 2006; 41; 730 – 733.

Guzmán L, Tarón A, Núñez A. Utilización del polvo de semilla de cañafístula (*cassia fistula*) como agente coagulante natural en el tratamiento de agua potable [tesis]. Cartagena: Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería. 2007 oct.

Flores, A., Acosta, G., Murillo, B., Trejo, R. y Arreola, J. (2006). Evaluación preliminar de la reserva del nopal (*Opuntia ssp*) en la región Laguna-Chihuahua. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, (2), 191-196.

Cervantes, M. (2005). Plantas de importancia económica en zonas áridas y semiáridas de México. *Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina (Comp.)* (pp. 3388-3407). Sao Paulo: Observatorio Geográfico de América Latina.

Rafael, Olivero. Iván, Mercado. Luz, Montes. Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus-indica* Producción + Limpia - Enero - Junio de 2013. Vol.8, No.1 - 19•27

Contreras, k, Mendoza Y, Jairo, Salcedo G, Olivero R, Mendoza P (2015) "Determinación de la eficiencia del nopal (*opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario a un coagulante primario en la clarificación de agua"

Flores, A., Acosta, G., Murillo, B., Trejo, R. y Arreola, J. (2006). Evaluación preliminar de la reserva del nopal (*Opuntia ssp*) en la región Laguna-Chihuahua. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, (2), 191-196.

Parra, Y., Cedeño, M., García, M., Mendoza, I., González, Y. y Fuentes, L. (2011). Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de *Opuntia Wentiana* (Britton & Rose) / (Cactaceae). *Redieluz*, 1 (1), 27-33.

Almendárez N. Comprobación de la efectividad del coagulante (cochifloc) en aguas del lago de Managua "Piedras Azules". Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente, Universidad Nacional de Ingeniería "Campus Simón Bolívar", Managua (Nicaragua) 2004 mar.

Solís, R. Laines, J. Hernández, J. Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales

Contreras, k, Mendoza Y, Jairo, Salcedo G, Olivero R, Mendoza P (2015)
"Determinación de la eficiencia del nopal (*opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario a un coagulante primario en la clarificación de agua"

Tuomas Rinne. Potabilización con diferentes coagulantes de aluminio y hierro. XXII congreso de centroamerica y panama de ingenieria sanitaria y ambiental "superacion sanitaria y ambiental: el reto"

Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. Guzmán I, villabona a, tejada c, garcía r, vol.16 no.1 bogotá jan./june 2013

