Estudio de un tratamiento eficiente para la potabilización del agua de la quebrada Menzuly, para su uso en una empresa de alimentos

Brayan Ferney Estiwar Valderrama Solano

Trabajo de grado para optar al título de especialista en química ambiental

Directora

Luz Yolanda Vargas Fiallo

Magíster en química

Universidad industrial de Santander

Facultad de ciencias

Escuela de química

Especialización en química ambiental

Bucaramanga

2021

A mi madre Carmen Inés por su apoyo y amor incondicional

Agradecimientos

A Dios por las bendiciones y permitirme alcanzar un logro más.

A la profesora Luz Yolanda Vargas por guiarme durante el desarrollo del presente trabajo de grado.

A los profesores y mis compañeros que aportaron conocimientos indispensables durante el transcurso de la especialización.

Contenido

Introducción 10
1. Marco teórico 11
1.1. Recurso hídrico 11
1.2. Características del agua para consumo humano 12
1.3. Tratamiento convencional del agua 16
1.3.1. Coagulación 16
1.3.1.1. Potencial z. 17
1.3.1.2. Compresión de doble capa. 18
1.3.1.3. Neutralización de carga. 18
1.3.1.4. Coagulación de barrido. 19
1.3.1.5. Agregación por puente. 20
1.3.1.6. Turbiedad. 21
1.3.1.7. Alcalinidad. 21
1.3.1.8. pH. 21
1.3.1.9. Temperatura. 22
1.3.2. Floculación 23
1.3.3. Sedimentación 24
1.3.4. Filtración 24
1.3.5. Desinfección 24
1.3.5.1. Cloro residual. 25
1.3.6. Métodos de eliminación de algas 26
1.4. Impacto a la salud y al medio ambiente 27
2. Objetivos 28
2.1. Objetivo general 28
2.2. Objetivos específicos 28
3. Metodología 28
3.1. Búsqueda y categorización de la información 28
3.2. Elaboración de la monografía 29
4. Resultados 29
4.1. Coagulantes más efectivos 29
4.1.1. Cloruro férrico 29
4.1.2. Sulfato de aluminio 32
4.1.3. Cloruros de polialuminio 33
4.2. Desinfectantes más eficientes 35

4.3. Métodos más eficientes de eliminación de algas 37
5. Discusión 38
6. Conclusiones 42
7. Recomendaciones 43
Bibliografía 44

Lista de tablas

Tabla 1. Características físicas del agua para consumo humano……13

Tabla 2. Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana…...14

Tabla 3. Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana……..14

Tabla 4. Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas obre la salud humana……..15

Tabla 5. Características microbiológicas del agua para consumo humano…….15

Tabla 6. Guía de selección de coagulantes…….22

Lista de figuras

Figura 1. Doble capa eléctrica formada en la superficie de una partícula con carga negativa……18

Figura 2. Desestabilización y agregación coloidal por adsorción de los productos catiónicos de hidrólisis en la superficie negativa de las partículas……19

Figura 3. Inversión de carga por adsorción en exceso de productos catiónicos de hidrólisis……..19

Figura 4. Formación de puentes de polímeros entre coloides…….20

Figura 5. Estabilización de la suspensión coloidal por adsorción completa de la cadena de polímero…….20

Figura 6. Curva de dosis de cloro vs cloro residual……26

Resumen

Título: Estudio de un tratamiento eficiente para la potabilización del agua de la quebrada Menzuly, para su uso en una empresa de alimentos*

Autor: Brayan Ferney Estiwar Valderrama Solano**

Palabras clave: coagulante, desinfectante, tratamiento, CF, STA, PAC, turbiedad, color, materia orgánica, fosfatos, algas, cloro gaseoso, hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, oxidante, microbiocida, pH, alcalinidad, polímero, pre-coagulación, floculación, sedimentación.

Descripción:

En esta monografía se recopiló información de la literatura científica sobre los coagulantes, desinfectantes y métodos de eliminación de algas más eficientes empleados en el tratamiento de aguas. Después de la búsqueda se caracterizó la información de tres coagulantes, el CF, el STA, y el PAC, que reportan las eficiencias más altas en la remoción de turbiedad, color, materia orgánica, fosfatos y algas. También se caracterizó la información de los desinfectantes, cloro gaseoso, hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio, que presentan alta capacidad oxidante y microbiocida.

Los tres coagulantes funcionan en un rango amplio de pH. Sus rendimientos dependen de la concentración empleada, así como de la composición y características del agua. La eficiencia del PAC depende en menor grado del pH y la alcalinidad del agua debido a los polímeros preformados que contiene. Por lo tanto, consume menos alcalinidad en comparación con el CF y el STA que reaccionan en mayor medida con la alcalinidad del agua.

El cloro en bajas concentraciones alcanza altas eficiencias en la inactivación y destrucción de bacterias, algas y cianobacterias. Es amigable con el medio ambiente y los humanos en las concentraciones empleadas. Además, produce una concentración residual de desinfectante que perdura en el agua para evitar posibles contaminaciones en las redes de distribución.

De esta manera, el uso de la pre-cloración y la coagulación se ha encontrado altamente eficiente para la eliminación de algas del agua. Debido a que hay un mayor tiempo de exposición de las algas al cloro. Además, Se ha reportado que la secuencia de tratamiento cloración/coagulación/floculación/sedimentación logra mayor eficiencia en la remoción de color y turbiedad en comparación con la secuencia coagulación/floculación/sedimentación/desinfección.

---

*Trabajo de grado

**Facultad de ciencias. Escuela de química. Especialización en química ambiental. Directora: MSc. Luz Yolanda Vargas Fiallo

Abstract

Title: Study of an efficient treatment for the potabilization of water from the Menzuly stream, for use in a food company*

Author: Brayan Ferney Estiwar Valderrama Solano**

Keywords: coagulant, disinfectant, treatment, CF, STA, PAC, turbidity, color, organic matter, phosphates, algae, chlorine gas, sodium hypochlorite, calcium hypochlorite, oxidant, microbiocide, pH, alkalinity, polymer, pre-coagulation, flocculation, sedimentation.

Description:

This monograph compiled information from the scientific literature on the most efficient coagulants, disinfectants, and algae removal methods used in water treatment. After the search, the information of three coagulants, the CF, the STA, and the PAC, which report the highest efficiencies in the removal of turbidity, color, organic matter, phosphates and algae, was characterized. The information on disinfectants, chlorine gas, sodium hypochlorite and calcium hypochlorite, which have high oxidizing and microbiocidal capacity, were also characterized.

All three coagulants work over a wide pH range. Its yields depend on the concentration used, as well as the composition and characteristics of the water. PAC efficiency is less dependent on the pH and alkalinity of the water due to the preformed polymers it contains. Therefore, it consumes less alkalinity compared to CF and STA which react to a greater extent with the alkalinity of the water.

Chlorine in low concentrations achieves high efficiencies in the inactivation and destruction of bacteria, algae and cyanobacteria. It is friendly to the environment and humans in the concentrations used. In addition, it produces a residual concentration of disinfectant that persists in the water to avoid possible contamination in the distribution networks.

In this way, the use of pre-chlorination and coagulation has been found to be highly efficient for removing algae from water. Because there is a longer exposure time of algae to chlorine. Furthermore, it has been reported that the chlorination / coagulation / flocculation / sedimentation treatment sequence achieves greater efficiency in removing color and turbidity compared to the coagulation / flocculation / sedimentation / disinfection sequence.

---

*Grade work

**Science faculty. Chemistry school. Specialization in environmental chemestry. Director: MSc. Luz Yolanda Vargas Fiallo

Introducción

El agua es indispensable en el día a día de los seres humanos al igual que los procesos para su purificación. El tratamiento convencional es el más usado por las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) y consiste en una serie de procesos físicos y químicos. En donde la coagulación se emplea para la remoción de turbiedad, color, microorganismos y ciertos contaminantes (Chew et al., 2016). Los coagulantes más empleados por su efectividad han sido las sales inorgánicas de hierro y aluminio, cloruro férrico (CF), sulfato de aluminio (STA) y policloruros de aluminio (PAC) (Arcila y Peralta, 2015). En cuanto a la desinfección, el cloro es el agente más empleado por su alto poder oxidante, microbiocida, y por dejar concentraciones residuales de cloro activo, que perduran en el tiempo y protegen el agua de posibles contaminaciones en las redes de distribución. De esta manera, tanto los coagulantes como la pre-cloración se han empleado efectivamente en la eliminación de algas en PTAPs que toman el recurso de cuerpos lóticos (Abdo et al., 2020).

La empresa de alimentos para la que se realiza la presente revisión está ubicada en el kilómetro 2 de la autopista Floridablanca-Piedecuesta (Santander). La PTAP capta el agua de la quebrada Mensulí. Su cuenca está ubicada entre los municipios antes mencionados y en los últimos años su agua ha tenido calificaciones de moderadamente contaminada y muy contaminada. La disminución de su calidad se debe a los vertimientos de agua residual industrial, urbana y rural aledaña, que además producen eutrofización (Gamarra y Restrepo, 2013). La empresa de alimentos ha tenido inconvenientes con el color del agua clarificada, ya que ésta ha estado presentando una coloración verde característica de aguas contaminadas con algas. Además, los trabajadores de la zona de producción que están en constante contacto con el agua tratada en la PTAP han presentado

alergias respiratorias como estornudos, tos y secreción nasal, así como irritación de los ojos. Dichas alergias se han asociado con altas concentraciones de cloro residual libre (Shusterman, 2014).

Con la realización de la presente monografía, se llevó a cabo una búsqueda de los coagulantes, desinfectantes y métodos de eliminación de algas que han presentado mayor eficiencia en el tratamiento de aguas, con el fin de aportar a la comprensión del funcionamiento y la forma correcta de emplear los tratamientos en la potabilización del agua. La búsqueda y revisión de la información se realizó en diferentes fuentes bibliográficas publicadas desde el año 2000 hasta el año 2020.

1. Marco teórico

1.1. Recurso hídrico

El agua es indispensable para la vida y es el recurso que se encuentra en mayor cantidad en nuestro planeta, ocupando dos tercios de la Tierra. La mayor parte es agua oceánica y el agua dulce representa menos del 1% del agua total del planeta, concentrada en fuentes superficiales y subterráneas (Franco, 2018). El agua de los mares y océanos puede desalinizarse por medio de procesos térmicos y de ósmosis inversa, pero por la inversión económica, el requerimiento energético y los costos de operación resultan poco rentables. Por lo tanto, se siguen estudiando procesos que permitan tratar el agua salada de forma económica y energéticamente eficiente para obtener agua de calidad. Hay poblaciones que no cuentan con fuentes de agua dulce y deben implementar estos procesos. Sin embargo, muchas poblaciones a nivel mundial tienen acceso a fuentes de agua dulce, que se destinan para el tratamiento y consumo humano (Desai et al., 2018)

Colombia es privilegiada por su ubicación geográfica y es uno de los países con mayor oferta hídrica. No obstante, las cinco áreas hidrográficas del país tienen grandes diferencias en cuanto a disponibilidad de agua, que afecta tanto el sistema natural como la estructura socioeconómica. Para el año 2014 se estimó un rendimiento hídrico (cantidad de agua que fluye por unidad de área) de 56 $L/s/km^2$, que supera el rendimiento promedio mundial (10 $L/s/km^2$) y el rendimiento de Latinoamérica (21 $L/s/km^2$) (IDEAM,2015).

El desarrollo de la civilización ha traído como consecuencia la contaminación del agua, haciendo que las fuentes subterráneas y superficiales ya no contengan líquido vital de buena calidad. En un principio la contaminación se debía a la materia fecal. Luego, apareció la contaminación por metales que presentaban bioacumulación en los ecosistemas acuáticos. Desde 1960 se empezaron a notar procesos de eutrofización en todo el continente americano debido al aumento del aporte de nutrientes a los cuerpos de agua (Vammen y Vaux, 2019).

En la actualidad la calidad y la disponibilidad del agua se ve afectada por los fenómenos climáticos y por los impactos antropogénicos (García et al., 2012). Las sequias disminuyen el recurso y la contaminación por partículas, nutrientes, microbiológica y química reducen su calidad. Debido a esto, el agua es un transmisor de enfermedades como la hepatitis A, la giardiasis, la amibiasis, la fiebre tifoidea y el cólera entre otras (Ramírez et al., 2018).

1.2. Características del agua para consumo humano

El agua tiene características organolépticas, como el color, la turbiedad, el olor y el sabor. Las aguas naturales superficiales presentan color debido a macromoléculas de materia orgánica natural soluble e insoluble y a formas solubles de hierro y manganeso. Mientras la turbiedad se debe a los sólidos en suspensión como arcillas, algas o materia orgánica. El olor es causado por

materia orgánica, plancton, bacterias, y el sabor depende de la presencia de algas y minerales (Apostol et al., 2011).

Los parámetros químicos y microbiológicos pueden ser de origen natural o antrópico, y no se pueden percibir al igual que los físicos, por lo tanto, se requiere de técnicas de laboratorio para su determinación (García et al., 2012). Todas estas características del agua deben estar en los rangos límites permisibles para el consumo humano. La resolución 2115 de 2007 establece los valores máximos aceptables de estos parámetros físicos (ver tabla 1), químicos (ver tablas 2, 3 y 4), y microbiológicos (Ver tabla 5). Además, el agua debe cumplir con un valor de conductividad menor a 1000 µS/cm y el pH debe estar en un rango de 6,5 a 9. El valor aceptable para sustancias utilizadas en el tratamiento del agua como aluminio residual es de 0,2 mg/L, hierro residual de 0,3 mg/L y cloro residual de 0,3-2 mg/L.

Tabla 1

Características físicas del agua para consumo humano

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de platino cobalto (UPC)	15
Olor y sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

Nota. Adaptado de (Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 2115, 2007)

Tabla 2

Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresada como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0,02
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,7
Cadmio	Cd	0,03
Cianuro libre o disociable	CN^-	0,05
Cobre	Cu	1,0
Cromo Total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Níquel	Ni	0,02
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Trihalometanos totales	THMs	0,2
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	HAP	0,01

Nota. Adaptado de (Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 2115, 2007)

Tabla 3

Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana	Expresada como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Carbono Orgánico Total	COT	5,0
Nitritos	NO_2^-	0,1
Nitratos	NO_3^-	10

Fluoruros	F^-	1,0

Nota. Adaptado de (Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 2115, 2007)

Tabla 4

Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana

Elementos, compuestos químicos que tienen implicaciones de tipo económico	Expresada como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Calcio	Ca	60
Alcalinidad Total	$CaCO_3$	200
Cloruros	Cl^-	250
Aluminio	Al^{+3}	0,2
Dureza Total	$CaCO_3$	300
Hierro Total	Fe	0,3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0,1
Molibdeno	Mo	0,07
Sulfatos	SO_4^{-2}	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO_4^{-3}	0,5
Cloro Residual	Cl_2	0,3-2,0

Nota. Adaptado de (Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 2115, 2007)

Tabla 5

Características microbiológicas del agua para consumo humano

Técnicas utilizadas	Coliformes totales	Escherichia coli
Filtración por membrana	0 UFC/cm^3	0 UFC/100 cm^3
Enzima sustrato	<1 microorganismo en 100 cm^3	<1 microorganismo en 100 cm^3

Sustrato Definido	0 microorganismo en 100 cm^3	0 microorganismo en 100 cm^3
Presencia-Ausencia	Ausencia en 100 cm^3	Ausencia en 100 cm^3

Nota. Adaptado de (Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 2115, 2007)

Para obtener agua potable que cumpla con los parámetros mencionados anteriormente existen diferentes tipos de tratamientos físicos, químicos y de desinfección, y estos son requeridos de acuerdo con las características físicas, químicas y microbiológicas del agua. Cuando se combinan los tres tratamientos, se dice que se realiza un tratamiento convencional. Esta combinación se emplea debido a su eficiencia en el tratamiento de aguas superficiales (Cogollo, 2011).

1.3. Tratamiento convencional del agua

Las plantas de tratamiento de agua potable tienen como objetivo producir agua apta para consumo humano de forma eficiente y económica. Debido a la contaminación antrópica de las aguas superficiales es necesario utilizar procedimientos complejos de potabilización (Haghiri et al., 2018). En donde el tratamiento convencional es el más empleado y consiste en una serie de procesos físicos como la floculación, la sedimentación y la filtración, un proceso químico de adición de coagulantes y un proceso de desinfección (Chew et al., 2016).

1.3.1. Coagulación

Los coloides que causan la turbidez del agua tienen tamaños del orden de los micrómetros, lo que dificulta su sedimentación. Además, la dispersión coloidal es estable por las fuerzas de repulsión, ya que la mayoría de las partículas tienen carga negativa. Por lo tanto, es necesario formar agregados de mayor peso para que puedan ser separados del agua con facilidad (Mamani y Chamorro, 2013).

La adición de coagulantes puede neutralizar la carga de las partículas por diferentes mecanismos, logrando desestabilizar la suspensión coloidal y así permitir la agregación para formar micro flóculos. Las clases de coagulantes comprenden los orgánicos derivados de la poliacrilamida, los polielectrolitos sintéticos y las sales inorgánicas de hierro y aluminio, que han sido las más empleadas a lo largo del tiempo por su efectividad. Dichas sales se hidrolizan en el agua y forman monómeros y complejos catiónicos. Esta etapa ocurre en un tiempo muy corto con una agitación fuerte para distribuir los productos de hidrólisis de una forma homogénea en el agua (Arcila y Peralta, 2015).

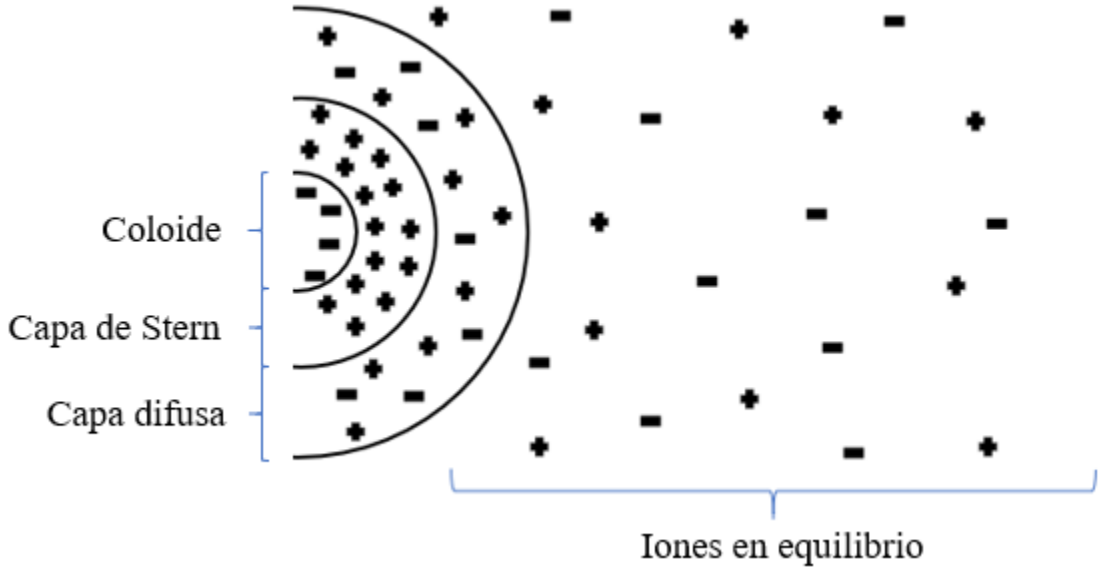
1.3.1.1. Potencial z. El potencial z es la diferencia de potencial entre la doble capa eléctrica y los iones en equilibrio de la solución. En la figura 1 se muestran la capa fija de stern formada por cationes que debido a la atracción electrostática rodean la particula de carga negativa, la capa difusa conformada por cationes y aniones que presentan movimiento parcial, y los iones en equilibrio de la solución. El valor del potencial z permite identificar inderectamente la carga de las partículas y su nivel de repulsión, que a su vez indica la estabilidad de la suspensión. En donde un potencial diferente de cero evidencia la presencia de las fuerzas de repulsión electrostática entre las partículas cargadas y un valor de cero evidencia la ausencia de dichas fuerzas. Cuando el potencial es cercano a cero la remoción de los contaminantes es más fácil debido a la desestabilización de la suspensión coloidal (Pavón et al., 2009).

El potencial z es importante en la coagulación debido a que uno de los principales mecanismos de acción consiste en la compresión de la doble capa eléctrica. Además, Se han planteado otros tres mecanismos principales para la desestabilización de la suspensión coloidal, que consisten en la neutralización de carga, coagulación de barrido y agregación por puente. Por

otra parte, el mecanismo de coagulación depende del tipo y concentración del coagulante, así como de las características del agua (Teh et al., 2016).

Figura 1

Doble capa eléctrica formada en la superficie de una partícula con carga negativa



1.3.1.2. Compresión de doble capa. Con el aumento de la concentración de sales en el agua se puede provocar la compresión de la doble capa eléctrica. Al aumentar la concentración de cationes en la capa difusa, esta se contrae generando la reducción de la fuerza de repulsión del sistema de la partícula y la distancia entre partículas. Cuando esto ocurre la suspensión coloidal se desestabiliza y las fuerzas de Van der Waals superan las fuerzas de repulsión, permitiendo la formación de grandes agregados de partículas. Cabe destacar que los cationes polivalentes se incorporan en mayor medida en la capa difusa que los monovalentes. Además, en este mecanismo los cationes no se absorben en las partículas. (Miller et al., 2008; Bratby, 2016).

1.3.1.3. Neutralización de carga. Este mecanismo ocurre debido a la neutralización de la carga superficial negativa de partículas como bacterias y arcillas. Los

productos catiónicos de coagulantes hidrolizados se adsorben en la superficie de los coloides negativos y permiten la desestabilización y agregación coloidal como se muestra en la figura 2 (Duan & Gregory, 2003). No obstante, la neutralización de carga ocurre a bajas concentraciones de coagulante, y al agregarlo en exceso puede presentarse una inversión de carga, lo que dificultaría la agregación de las partículas, pero debido a una estabilización por cargas positivas como se observa en la figura 3 (Wang et al., 2017).

Figura 2

Desestabilización y agregación coloidal por adsorción de los productos catiónicos de hidrolisis en la superficie negativa de las partículas

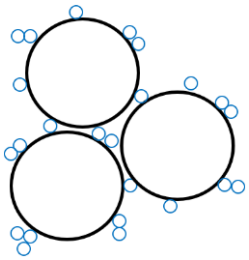
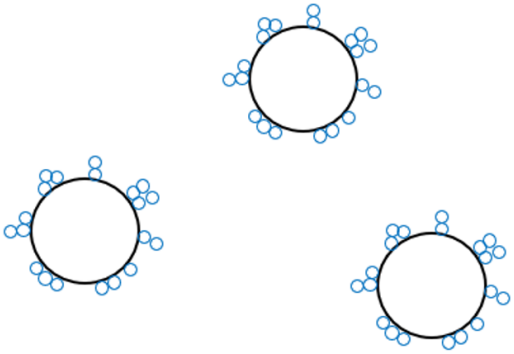


Figura 3

Inversión de carga por adsorción en exceso de productos catiónicos de hidrólisis



1.3.1.4. Coagulación de barrido. El mecanismo de coagulación por barrido ocurre en altas concentraciones de sales de hierro y aluminio. A pH neutro el hierro y el aluminio presentan una solubilidad limitada, y precipitan como hidróxidos metálicos amorfos. En donde los

coloides son atrapados o adsorbidos en los precipitados y pueden eliminarse fácilmente (Renault et al.,2009). Se ha encontrado que los factores que favorecen este mecanismo son la concentración alta de hidróxido de hierro ($Fe(OH)_3$) y de aluminio ($Al(OH)_3$) y la concentración alta de coloides que pueden funcionar como núcleos de precipitación (Ghernaout & Ghernaout, 2012**).**

1.3.1.5. Agregación por puente. Los polímeros de cadena larga y elevado peso molecular se adsorben eficientemente en la superficie de las partículas. Una parte de la cadena del polímero se une parcialmente a la superficie de una partícula y la cola del polímero queda disponible en la solución para unirse a otra partícula, formando un puente entre coloides como se muestra en la figura 4 (Bolto & Gregory, 2007). Por otra parte, es posible que el polímero se adsorba en la superficie de la partícula, de tal forma que no se pueda adsorber en otra como se observa en la figura 5, lo que causa que la suspensión se estabilice de nuevo (Aguilar, 2002).

Figura 4

Formación de puentes de polímeros entre coloides

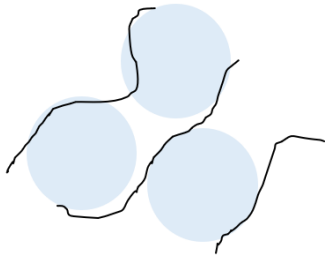
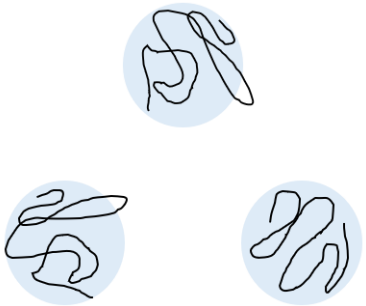


Figura 5

Estabilización de la suspensión coloidal por adsorción completa de la cadena del polímero



La coagulación es eficiente en el proceso de clarificación de aguas, pero puede presentarse gastos adicionales cuando no se optimiza el proceso. Para seleccionar el coagulante y la dosis optimas se emplea la prueba de jarras, en la cual se reproducen las condiciones de mezcla rápida y lenta de la coagulación y la floculación de la PTAP (Aragonés et al., 2009). En donde la dosis del coagulante y la efectividad del proceso de coagulación dependen de la turbiedad, la alcalinidad, el pH y la temperatura (Xu et al., 2018).

1.3.1.6. Turbiedad. La turbiedad es la disminución del paso de la luz a través del agua, debida a la absorción o refracción causada por los sólidos suspendidos, como arcillas, limos, y fitoplancton (Apostol et al., 2011). La medida de la turbiedad determina la potabilidad del agua e influye en la cantidad de coagulante requerido. Debido a que la concentración de coagulante es directamente proporcional a la turbiedad. Además, en aguas con turbiedades bajas se puede requerir ayuda de coagulación para hacer el floc más pesado (Montoya et al., 2013).

1.3.1.7. Alcalinidad. La alcalinidad del agua superficial se mide por el contenido de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, que le confieren la capacidad para neutralizar ácidos. En el proceso de coagulación con sales inorgánicas se forman los productos metálicos de hidrólisis y los iones hidronio (H_3O^+), que son neutralizados por la alcalinidad. De este modo, la alcalinidad del agua funciona como buffer en un intervalo de pH óptimo para el coagulante y, por lo tanto, es necesaria en altas concentraciones (Romero, 2005).

1.3.1.8. pH. En el agua ocurre una reacción de ionización, en donde dos moléculas de agua (H_2O) forman una molécula de H_3O^+ y una de hidroxilo (OH^-). El agua más pura presenta ionización y por lo tanto conductividad eléctrica. De esta manera, el pH se calcula aplicando el negativo del logaritmo base diez a la concentración molar de iones H_3O^+ en el agua, y la escala va de cero a catorce. Cuando el pH tiene un valor de siete es neutro, y los iones H_3O^+ e OH^- están en

la misma concentración ($1x10^{-7}$ molar). Por otra parte, los valores menores a siete indican aguas acidas y los mayores a siete aguas básicas (Sincero & Sincero, 2002).

Cada coagulante funciona de forma óptima dentro de un rango de pH. Además, el pH varía en las aguas naturales debido a su composición. Por lo tanto, si el agua no está en el rango de pH requerido, el proceso de coagulación es incompleto. En el caso de las sales de aluminio, estas se pueden solubilizar y generar variaciones descontroladas en la turbiedad, el pH, la alcalinidad, la dureza y el aluminio residual del agua clarificada (Cogollo, 2011).

1.3.1.9. Temperatura. La temperatura afecta la densidad y la viscosidad del agua. En donde a temperaturas bajas la viscosidad del agua aumenta, disminuyendo la eficiencia de la sedimentación debido a la resistencia que ofrece la alta viscosidad al movimiento de las partículas por la acción de la gravedad. Además, la temperatura influye en la solubilidad de los coagulantes, afectando más a algunos coagulantes que a otros (Crittenden et al., 2012).

De acuerdo con la clasificación del agua cruda se selecciona el coagulante, se determina el uso de ayudantes de coagulación y alcalinizantes. La clasificación se realiza teniendo en cuenta la turbiedad y alcalinidad del agua como se muestra en la tabla 6. La alcalinidad se aumenta agregando al agua cal viva o apagada, carbonato de sodio o arcilla (Romero, 2005).

Tabla 6

Guía de selección de coagulantes.

Tipo de Agua	Sulfato de aluminio	Sales férricas
1. Alta turbiedad y alcalinidad	Efectivo para pH: 5-7. No requiere agregar alcalinidad	Efectivo para pH: 6 a 7. No requiere agregar alcalinidad ni ayuda de coagulación

2. Alta turbiedad y baja alcalinidad	Efectivo para pH: 5-7. Puede requerir adición de alcalinidad	Efectivo para pH: 5 a 7. Puede requerir adición de alcalinidad
3. Baja turbiedad y alta alcalinidad	Efectivo en dosis altas. Puede requerir ayuda de coagulación.	Efectivo en dosis bajas. Debe agregarse ayuda de coagulación para hacer el floc más pesado.
4. Baja turbiedad y alcalinidad	Efectivo gracias a floc de barrido. Debe agregarse alcalinidad	Efectivo gracias a floc de barrido. Debe agregarse alcalinidad

Nota. Adaptado de (Romero, 2005)

En las PTAP la coagulación influye en la efectividad de los otros procesos del tratamiento. Una desestabilización eficiente de los coloides permite la formación efectiva de flóculos grandes y resistentes en la etapa de floculación. Por lo tanto, las etapas de sedimentación y filtración presentan rendimientos altos, así como la desinfección que mejora al disminuir la turbiedad (Theodoro et al., 2013).

1.3.2. Floculación

En la floculación se realiza una agitación lenta para que los microflóculos formados a partir de los coloides desestabilizados en la coagulación se acerquen lo suficiente, y por acción de las fuerzas de Van der Walls se formen los aglomerados de mayor peso llamados flóculos. Normalmente se utilizan cámaras de floculación de flujo vertical u horizontal que permiten mantener un gradiente de velocidad bajo (Akbal & Camci, 2010; Sahu & Chaudhari, 2013). En general, la eficiencia del proceso de coagulación-floculación se mide con la remoción de turbiedad y color, que están relacionados con la remoción de los contaminantes suspendidos y disueltos en el agua (Wang et al., 2011).

1.3.3. Sedimentación

En esta etapa se remueven flóculos, limos y arenas, así como también algunos microorganismos. Los grandes agregados de alto peso se depositan en el fondo de estanques redondos o rectangulares con ayuda de la gravedad. El agua tiene flujo constante y un tiempo de retención en estas estructuras para que se remueva con eficiencia el material en suspensión. (Sincero & Sincero, 2002)

1.3.4. Filtración

Consiste en el paso del agua clarificada a través de filtros para separar partículas y microorganismos que no se eliminaron en los procesos anteriores. El lecho filtrante puede ser de arena, antracita, grava o mixtos dependiendo del tamaño de partículas que se necesiten retener. Los mixtos pueden retener coloides de tamaños menores a 1 um y microorganismos susceptibles a ser separados (Chulluncuy, 2011).

Las partículas se retienen por mecanismos físicos como cernido, sedimentación, intercepción, difusión, impacto inercial y acción hidrodinámica. Además, cuando las partículas se acercan lo suficiente a los granos del medio filtrante experimentan fuerzas de van der Waals que permiten la adhesión. Los filtros funcionan hasta que su flujo disminuye considerablemente por la cantidad de partículas retenidas, razón por la que deben lavarse periódicamente (Chulluncuy, 2011).

1.3.5. Desinfección

En la desinfección se eliminan o inactivan los microorganismos patógenos y se pueden oxidar algunas sustancias presentes en el agua clarificada. Se pueden emplear tratamientos físicos, radiación y tratamientos químicos. El principal tratamiento físico consiste en aplicar calor, pero este deja mal sabor en el agua y es costoso. Por otra parte, la radiación más utilizada es la

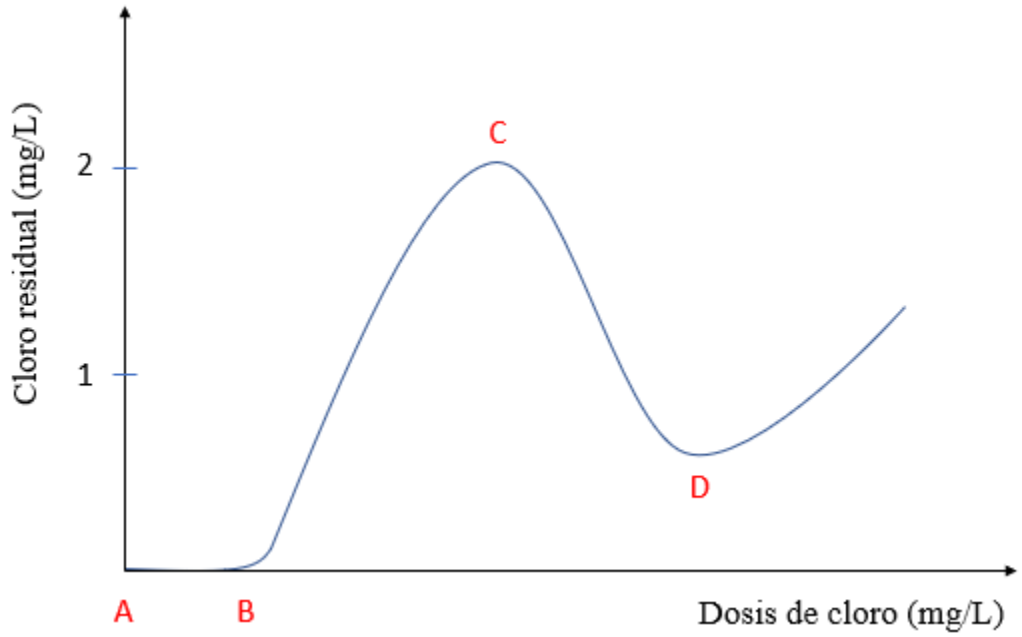
ultravioleta por su bajo costo, aunque su efectividad es inversamente proporcional a la turbidez del agua. Finalmente, los agentes químicos son los más usados por su capacidad alguicida, bactericida y viricida. El ozono es un gas oxidante fuerte, sin embargo, es muy toxico y no deja una concentración residual persistente en el tiempo. Por otra parte, el cloro gaseoso, el hipoclorito de sodio y el hipoclorito de calcio son los más empleados. El cloro tiene un amplio rango microbiocida, es amigable para los humanos y el medio ambiente, y deja un residual de desinfectante persistente en el tiempo. En general, la eficiencia del desinfectante depende de su naturaleza y concentración, del grado de agitación y el tiempo de contacto con los microorganismos. (Biryukov et al., 2005; Zhang et al., 2010).

1.3.5.1. Cloro residual. Cuando se emplea cloro gaseoso o las sales de calcio y sodio de hipoclorito en la desinfección del agua, se generan el ácido hipocloroso (HClO) y el ion hipoclorito (ClO^-), que se conocen como cloro residual libre. En donde el HClO tiene mayor poder desinfectante que el ClO^-. Según la resolución 2115 de 2007, cuando se añade cloro al agua para su desinfección, es necesario lograr una concentración mínima de cloro residual libre de 0,3 mg/L, para garantizar la inocuidad del agua en la red de distribución. En la figura 6 se muestra el comportamiento del cloro residual respecto a la dosis de cloro. Inicialmente, entre A y B el cloro reacciona con la materia orgánica e inorgánica oxidable y también participa en reacciones de sustitución. En presencia de amoniaco o compuestos orgánicos nitrogenados se forman monocloraminas y dicloraminas, que conforman el cloro residual combinado y se muestra entre el punto B y C. Con la constante adición de cloro se produce un decaimiento en la concentración del cloro combinado entre los puntos C y D, ya que se producen tricloroaminas que finalmente se degradan. De esta manera, la demanda de cloro del agua es la dosis de cloro necesaria para llegar

al punto D o punto de quiebre. Finalmente, a partir de la degradación de las cloraminas, en solución predomina el cloro residual libre (March & Gual, 2007).

Figura 6

Curva de dosis de cloro vs cloro residual



1.3.6. Métodos de eliminación de algas

En aguas superficiales de zonas tropicales y semi tropicales se produce proliferación de algas verdes y algas azul verdosas (cianobacterias), debido a la eutrofización causada por la contaminación municipal e industrial. Dichas algas son fotosintéticas y se mantienen cerca de la superficie para poder captar los rayos de luz. Producen en el agua una coloración verde, mal sabor y olor, así como toxinas perjudiciales para la salud humana y animal. Por lo tanto, es de gran interés la eliminación de las microalgas en el tratamiento del agua potable (Gao et al., 2010).

En el tratamiento convencional del agua, con la coagulación y la desinfección se pueden remover o destruir las algas. La coagulación con sales inorgánicas logra remociones de algas cercanas al 90%. No obstante, cuando la concentración de algas en el agua es muy alta, antes del proceso de

coagulación se emplea un oxidante fuerte que perdure en el tiempo, como es el caso del cloro (Lou et al., 2013; Abdo et al., 2020).

1.4. Impacto a la salud y al medio ambiente

El tratamiento del agua con coagulantes de aluminio deja en el agua una concentración residual de aluminio. Este metal puede causar neuropatologías crónicas en adultos y niños, además, aumenta el riesgo de padecer la enfermedad neurodegenerativa de Alzheimer (Matías et al., 2018; Morris et al., 2017). En aguas superficiales el aluminio se acumula en sedimentos, puede afectar el metabolismo y el sistema nervioso de los peces, así como causar su muerte al entrar en contacto con las branquias (Oliveira et al.,2017).

Por otra parte, el tratamiento del agua con cloro gaseoso o sales de hipoclorito en presencia de materia orgánica, genera productos secundarios de desinfección nocivos (PSD), como los ácidos halo acéticos, los halo acetonitrilos, y mayoritariamente se forman los trihalometanos (THM) considerados potencialmente cancerígenos (Zhang et al., 2010; Kadir, 2016). Además, los desinfectantes a base de cloro dejan concentraciones residuales que pueden ser perjudiciales para la salud si no se controlan. Diversos estudios reportan que la exposición prolongada a agua con alto contenido de cloro residual genera alergias respiratorias como estornudos, tos y secreción nasal, así como dificultad para respirar e irritación de los ojos. En otros casos más graves puede llegar a generar dermatitis o asma (Shusterman, 2014; Boskabady et al., 2014).

De esta manera, en la presente monografía se realizó una revisión bibliográfica de los coagulantes, desinfectantes y métodos de eliminación de algas más eficientes. Para poder determinar el mejor tratamiento para el agua de la quebrada Mensulí y aportar a la solución de los problemas asociados al agua que se han presentado en la empresa de alimentos, se plantearon los siguientes objetivos y se desarrolló la metodología expuesta a continuación.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Recopilar información científica publicada en diferentes fuentes bibliográficas, sobre tratamientos eficientes de potabilización.

2.2. Objetivos específicos

Analizar en los estudios realizados, cuáles son los coagulantes más eficientes en el tratamiento de aguas naturales.

Identificar en la bibliografía consultada, cuáles son los desinfectantes más efectivos en el tratamiento de aguas.

Estudiar en la literatura científica los mejores métodos para eliminar algas en el tratamiento de agua potable.

3. Metodología

3.4. Búsqueda y categorización de la información

La búsqueda y revisión de la información se realizó en diferentes fuentes bibliográficas publicadas desde el año 2000 hasta el año 2020. La recopilación de artículos científicos, tesis y textos académicos se realizó en diferentes bases de datos como Scopus, Science direct, Elsevier, Taylor y Francis group, entre otras. La búsqueda bibliográfica se hizo principalmente con las

palabras: coagulantes para el tratamiento de aguas, desinfectantes para el tratamiento de aguas, Métodos de remoción de algas.

3.5. Elaboración de la monografía

Este escrito es una monografía de compilación donde primero se realizó la búsqueda de investigaciones científicas en las diferentes bases de datos, con el fin de recopilar información de los coagulantes, desinfectantes y métodos de eliminación de algas más eficientes, empleados en la potabilización del agua, luego se tuvo en cuenta la eficiencia y la toxicidad de los coagulantes, la efectividad y efectos adversos de los desinfectantes, así como la eficiencia de los métodos de remoción de algas.

4. Resultados

4.4. Coagulantes más efectivos

La eficiencia de los coagulantes se puede determinar por las concentraciones necesarias para remover altos porcentajes de sustancias disueltas y sólidos suspendidos del agua, produciendo un agua clarificada de calidad. Además, se analiza la toxicidad que presentan dichos coagulantes. De acuerdo con esto, los coagulantes más empleados por su efectividad son el cloruro férrico (CF), el sulfato de aluminio (STA) y el cloruro de polialuminio (PAC).

4.1.1. Cloruro Férrico

El cloruro férrico ($FeCl_3$) en solución se hidroliza y puede formar especies monoméricas y poliméricas. Las diferentes formas monoméricas son $[Fe(H_2O)_6]^{3+}$, $[Fe(H_2O)_5(OH)]^{2+}$, $[Fe(H_2O)_4(OH)_2]^{+}$, $Fe(OH)_3$ (s), y $[Fe(H_2O)_2(OH)_4]^{-}$. Algunas de las formas poliméricas son $[Fe_2(H_2O)_8(OH)_2]^{4+}$ y $[Fe_2(H_2O)_7(OH)_3]^{3+}$, que poseen estructuras amorfas con grandes áreas

superficiales y cargas positivas. En general, las especies de hierro forman complejos insolubles con los grupos hidroxilo o carboxilo de los coloides, neutralizando las cargas y permitiendo la desestabilización. También durante la precipitación de los hidróxidos amorfos, los compuestos disueltos y suspendidos quedan atrapados y pueden removerse. A continuación, se muestra la reacción general de hidrólisis del hierro trivalente (Domínguez et al., 2005):

$$x\mathrm{Fe}^{3+} + y\mathrm{H_2O} \rightarrow \mathrm{Fe}_x(\mathrm{OH})_y^{(3x-y)} + y\mathrm{H}^+ \qquad \textbf{(1)}$$

Diversos estudios se han realizado sobre la efectividad del CF como coagulante (Baghvand et al., 2010; Cendales y Cañón, 2016; Zerbatto et al., 2009; Díaz et al., 2007; Tafur, 2018; Yanza et al., 2019). Cendales y cañón (2016) prepararon agua con arcilla en el laboratorio y le midieron una turbiedad de 210 NTU, un pH de 7,05 a una temperatura de 18 °C. Trataron el agua preparada con CF, obteniendo una dosis óptima de 40 mg/L, una turbiedad residual de 15 NTU (remoción: 93%) y un pH final de 3,85.

Tafur (2018) determinó la eficiencia del CF y el STA en la remoción de color y turbiedad del agua de la quebrada Rumiyacu, ubicada en el departamento de San Martin en Perú. Los ensayos se realizaron durante los meses de mayo y junio, en los que el agua presentó en promedio un pH de 8,8, una alcalinidad de 157 mg/L $CaCO_3$, una turbiedad de 43 UNT y un color de 180 UPC. El STA presentó una dosis óptima de 20 mg/L, removió en un 91% la turbiedad y en un 93% el color. El CF tuvo una dosis óptima de 120 mg/L, removió en un 72% la turbiedad y en un 94% el color. Baghvand et al. (2010) evaluó el rendimiento del CF y del STA en la remoción de turbidez de agua preparada en el laboratorio con arcilla y en un rango de pH de 4 a 8. En donde el pH se controló para mantenerlo constante durante los primeros 5 minutos de la floculación. Las turbiedades iniciales fueron de 10, 50, 100, 200, 500 y 1000 NTU. El CF presentó mayor rendimiento en la remoción de turbiedad a pH 5, seguido de pH 6, y la dosis óptima para todas las turbiedades

iniciales fue de 10 mg/L, excepto la de 1000 NTU que necesitó 20 mg/L. Por otra parte, el STA removió mejor la turbiedad a pH 7, seguido de pH 6, y la dosis óptima para todas las turbiedades iniciales fue de 10 mg/L, excepto la de 1000 NTU que necesitó 20 mg/L. En general, el CF presentó mayor eficiencia en la eliminación de turbidez (92,9-99,4%) en comparación con el STA (82,9-99%) en condiciones óptimas y también a pH 4 y 8.

Yanza et al. (2019) comparó la eficiencia del CF y el PAC en la remoción de color y turbiedad de un agua proveniente de paramo, que abastece la PTAP Palacé de la ciudad de Popayán (Colombia). El agua cruda presentó en promedio una turbiedad baja (6,5 UNT), un color alto (51,3 UPC) y un pH de 8,5. El CF logró una remoción de color del 75% y de turbiedad del 80%. Mientras el PAC removió el 55% del color y el 47% de la turbiedad.

Zerbatto et al., (2009) evaluó la eficiencia del CF para remover materia orgánica natural (MON) a diferentes valores de pH en el agua que abastece la PTAP de la ciudad de Santa Fe (Argentina). En los resultados se observó que el CF removió en un 81% la MON a un pH de 5, en un 65% a un pH de 6,5 y en un 37% a un pH de 8. Además, se determinó que la remoción de enteroparásitos (Cryptosporidium y Giardia) no se afectaba con la variación de pH.

Díaz et al. (2007) determinó la eficiencia del CF y el STA en la remoción de fosfatos del agua del rio Otún de la ciudad de Pereira. El estudio se realizó debido a que en el agua cruda se estaban presentando concentraciones de fosfatos mayores a 0,2 mg/L y se estaba produciendo un crecimiento acelerado de algas en las estructuras del sistema convencional de la empresa de acueducto y alcantarillado aguas y aguas. El cloruro de polialuminio (PAC) se estaba usando como coagulante principal y no estaba removiendo los fosfatos de forma eficiente. En los resultados el CF presentó una mejor remoción de fosfatos en concentraciones entre 18 y 22 mg/L y el STA en

una concentración de 30 mg/L. Con los dos coagulantes se logró remover hasta un 90% los fosfatos.

4.1.2. Sulfato de aluminio

El STA ($Al_2(SO_4)_3$) es de los coagulantes más utilizados en la clarificación del agua y diferentes estudios demuestran su eficacia para la eliminación de turbiedad, color y ciertos contaminantes (Uyguner et al., 2007; Olivero et al., 2014; Salazar et al., 2015; Meza et al., 2018). Los iones de aluminio en agua se hidrolizan rápidamente para formar diferentes especies monoméricas o poliméricas. Los monómeros son Al^{3+}, $[Al(OH)]^{2+}$, $[Al(OH)_2]^{+}$, $Al(OH)_3$ (s), y $[Al(OH)_4]^{-}$. Algunas formas poliméricas son $[Al_2(OH)2]^{4+}$, $[Al_3(OH)2]^{5+}$ o $[Al_{13}O_4(OH)_{24}]^{7+}$. Las especies catiónicas interactúan con los coloides negativos y los neutralizan, mientras el precipitado de hidróxido puede atrapar las sustancias disueltas y en suspensión (Postolachi et al., 2016).

Olivero et al., (2014) evaluó la eficiencia del STA en la remoción de turbiedad del agua del rio Magdalena en Magangué (Colombia). El agua cruda presentó una turbiedad de 174 UNT y un pH de 6,55. El STA en una concentración óptima de 35 mg/L logró remover la turbiedad en un 98% y generó un pH residual de 5,78.

Meza et al. (2018) encontró una eficiencia de remoción de turbiedad del 96% para el STA, en el agua de la Ciénaga de Malambo, Atlántico (Colombia). El agua cruda tenía un pH 7,27 y una turbiedad de 56,5 UNT. La concentración óptima de coagulante fue de 20 mg/L.

Salazar et al., (2015) halló la eficiencia del STA en la remoción de turbiedad y color de las quebradas Santa Helena y Picacha, ubicadas en Medellín (Colombia). El agua de Santa Helena presentó un pH de 7,56, una turbiedad de 47 UNT y un color de 220 UPC. Mientras el agua de Picacha tenía un pH de 7,37, una turbiedad de 3050 UNT y un color de 7900 UPC. El STA en una concentración óptima de 12,5 mg/L, removió el 96% de la turbiedad y el 79% del color del agua

de la quebrada Santa Helena. En el agua de Picacha, para una concentración de 219 mg/L se logró remover el 100% de la turbiedad y el 99,9% del color.

Uyguner et al. (2007) evaluó la eficiencia de remoción de MON (UV_{254}) y de carbono orgánico disuelto (COD) del STA y del CF, en tres fuentes de agua de Estambul, Elmali, Omerli y Buyukcekmece. El pH óptimo para el CF fue de 5 y para el STA de 6,5, y las concentraciones óptimas para ambos coagulantes fueron de 50, 80 y 60 mg/L para Omerli, Elmali y Buyukcekmece respectivamente. El STA presento remociones de COD de 28% en Omerli, 44% en Elmali y 26% en Buyukcekmece, y remociones de MON coloidal de 65% en Omerli, 77% en Elmali y 47% en Buyukcekmece. El CF presento remociones de COD de 34%, 48% y 29% para Omerli, Elmali y Buyukcekmece respectivamente, y remociones de MON coloidal de 65% en Omerli, 78% en Elmali y 50% en Buyukcekmece

4.1.3. Cloruros de polialuminio

Los PACs son sales inorgánicas que contienen una gama de especies hidrolíticas del aluminio preformadas. Tienen la formula general $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$, donde n toma valores que van de 1 a 2,5. En solución presentan los monómeros catiónicos del STA y especies poliméricas como $[Al_2(OH)_2]^{4+}$, $[Al_3(OH)_4]^{5+}$, $[Al_{13}O_4(OH)_{24}]^{7+}$ y $[Al_{30}O_8(OH)_{56}]^{18+}$. También pueden tener diferentes porcentajes de basicidad que indican el grado de polimerización del coagulante, en donde el grado de polimerización aumenta con la basicidad. La relación de los iones hidroxilo con los iones de aluminio ($[OH]^-/[AL^{3+}]$) que contiene el PAC determinan la basicidad (Sperczyńska, et al., 2014; Zhang et al., 2017).

El PAC es descrito como un coagulante más eficiente debido a las especies pre-hidrolizadas, razón por la cual su eficiencia depende en menor grado del pH y la temperatura, en comparación con el CF y el STA. Diversos estudios se han realizado sobre el potencial del PAC

en la remoción de color, turbiedad y algunos contaminantes (Yang et al., 2010; Mirzaiy et al., 2012; Cerón, 2016). Mirzaiy et al (2012) evaluó la eficiencia del PAC en la clarificación del agua superficial captada por la PTAP de Ahwaz en Iran. Se hicieron ensayos para valores de pH de 5, 5,5, 6, 6,5, 7, 7,5 y 8. La turbiedad inicial del agua era de 45 UNT y el COD de 7,62 mg/L. El porcentaje de remoción de COD aumentó con el aumento del pH y la mayor remoción fue de 29,47% a pH 8. De la misma manera, la remoción de la turbiedad aumentó con el aumento del pH, en donde la menor remoción fue del 80% y la mayor del 93,9%. La concentración óptima de coagulante fue de 10 mg/L. Además, se encontró que para una concentración de 50 mg/L de PAC el pH del agua disminuyó de 8 a 7,9 y la alcalinidad disminuyó de 150 a 110 mg/L de $CaCO_3$.

Cerón (2016) comparó la efectividad del CF y el PAC en la remoción de turbiedad del rio blanco en Ipiales (Colombia). Los ensayos se realizaron entre abril hasta agosto, en donde el agua cruda presentó valores de turbiedad entre 4 y 25 UNT, color entre 20 y 30 UPC, y pH entre 7 y 8,4. El PAC logró remover en una concentración de 20 mg/L hasta el 88 % de la turbiedad y el 60 % del color. Mientras el CF en una concentración de 40 mg/L logró remover hasta el 90% de la turbiedad y el 35% del color. Además, se encontró que el CF disminuye más el pH del agua en comparación con el PAC.

Yang, et al. (2010) evaluó la eficiencia del PAC y el STA en la coagulación del rio amarillo en Jinan (China). El agua cruda presentó un pH de 8,25, una turbiedad de 12,5 UNT, un COD de 2,026-2,985 mg/L y una absorbancia de 0,06 cm^{-1} para la MON. El PAC en una dosis óptima de 7 mg/L como Al_2O_3 removió la turbiedad en un 94%, la MON en un 51% y el COD en un 18%. Mientras el STA en la misma dosis óptima removió la turbiedad en un 91 %, la MON en un 42% y el COD en un 23%. Además, se encontró que, para la concentración óptima utilizada de los dos coagulantes, el PAC dejó un aluminio residual de 0,85 mg/L y el STA de 0,95 mg/L.

4.5. Desinfectantes más eficientes

Un desinfectante eficiente debe inactivar o eliminar microorganismos patógenos, además de dejar una concentración residual en el agua. También se debe tener en cuenta la facilidad en la dosificación y manejo, así como la posible toxicidad en humanos y para el medio ambiente en las concentraciones empleadas. De esta manera, los desinfectantes más empleados son el cloro gaseoso, el hipoclorito de sodio y el hipoclorito de calcio, que son efectivos contra un amplio espectro de microorganismos patógenos. En el agua estos agentes se hidrolizan y generan HClO y ClO^-, conocidos como el cloro libre activo, que en las concentraciones empleadas es amigable con los humanos y el medio ambiente. Además, estos agentes dejan un residual que perdura en el tiempo. Sin embargo, si se emplean en altas concentraciones, puede ser irritante y tóxico (Duckhouse et al., 2004; Shusterman, 2014).

El HClO y el ClO^- a pH 7,5 se encuentran en la misma concentración, a mayor pH se presenta mayoritariamente el ClO^- y a menor pH hay mayor concentración de HClO, el cual tiene mayor poder oxidante y desinfectante que el ClO^-. Por lo tanto, el pH óptimo para la desinfección está entre 5,5 y 7,5. El cloro activo elimina los microorganismos al interferir con la permeabilidad celular, dañar el ADN e inhibir enzimas. Como consecuencia se inhibe la proliferación y se puede inducir la muerte celular (Zyara et al., 2016). Diversos estudios corroboran la eficiencia del cloro en la inactivación o eliminación de agentes patógenos (Shang & Blatchley, 2001; Zhao et al., 2001; Arjona et al., 2012).

Shang & Blatchley (2001) determinaron la concentración óptima de cloro para cuatro cultivos de bacterias, Escherichia coli, streptococcus faecalis, pseudomonas aeruginosa y staphylococcus aureus. Los ensayos se realizaron con hipoclorito de sodio, a pH 7 y con concentraciones iniciales de 10^7 bacterias/mL. La dosis óptima se determinó para 30 minutos de

contacto y una concentración residual de cloro libre mínima de 0,5 mg/L. Para Escherichia coli y Pseudomonas aeruginosa se encontró una dosis óptima de 3 mg/L de cloro, mientras para las demás cepas la dosis óptima fue de 4 mg/L. Además, se hallaron concentraciones de cloraminas asociadas con nitrógeno intracelular.

Zhao et al. (2001) determinó la concentración de cloro libre y el tiempo de exposición requeridos para inactivar bacterias Escherichia coli O157:H7, causantes de diarrea y colitis hemorrágica en humanos. Se realizaron los ensayos con cepas aisladas de 6 pacientes. Se utilizaron concentraciones de bacterias de 10^8 UFC/mL, en donde el cloro residual libre en una concentración de 0,25 mg/L y 30 segundos de exposición logró inactivas cinco de las seis cepas. La cepa que presentó tolerancia tampoco pudo inactivarse por completo para tiempos de contacto de 60 y 120 segundos, y concentraciones de cloro residual libre de 0,5-2 mg/L.

Arjona et al. (2012) evaluó en la PTAP de Puerto Mallarino en la ciudad de Cali (Colombia) el efecto de la cloración sobre la potabilización del agua y formación de THM, utilizando dos secuencias de tratamiento, una con cloración antes de la coagulación (pre-cloración) y otra con cloración después de la clarificación del agua (post-cloración). Se empleó STA y cloro gaseoso, en donde la concentración óptima de coagulante fue la que logró una turbiedad residual menor a 2 UNT, y la dosis óptima de cloro fue la que produjo una concentración de cloro residual de 0,5-1 mg/L. El agua cruda durante los ensayos presentó un pH de 6,8-7,3, Una turbiedad de 44-62 UNT, un color aparente de 306-494 UPC, un color verdadero de 14-61 UPC, un valor de $2{,}8x10^4$-$7{,}5$ $x10^5$ UFC/100 mL para coliformes totales y de $3{,}5x10^3$-$1{,}5$ $x10^5$ UFC/100 mL para coliformes fecales. Tanto con la pre-cloración como con la post-cloración se cumplió con los límites máximos permisibles para turbiedad, color, coliformes totales y coliformes fecales. Sin embargo, con la pre-cloración se logró una mayor remoción de turbiedad y color. En cuanto a la formación de THM,

con la pre-cloración se formaron entre 11,23 y 13,5 μg/L, mientras con la post-cloración se formaron entre 0,52 y 0,84 μg/L.

4.6. Métodos más eficientes de eliminación de algas

En el tratamiento convencional del agua potable se pueden eliminar las algas eficientemente. Debido a la carga negativa en la superficie de las algas a pH mayor a 4, es posible removerlas por medio de la coagulación (Wyatt et al., 2011; Duarte y Hernández, 2015). Sin embargo, cuando el agua tiene una alta concentración de algas, la aplicación de cloro antes de la coagulación se emplea para eliminar las algas de una forma más eficiente. El cloro afecta la permeabilidad celular y causa la lisis de las algas (Qi et al., 2016). De esta manera, diferentes estudios han reportado que la cloración, el CF, el STA el PAC logran altas eficiencias en la eliminación de algas (Lou et al., 2013; Duarte y Hernández, 2015; Qi et al., 2016; Abdo et al., 2020).

Lou et al. (2013) evaluó eficiencia del CF en la remoción de algas del agua del rio Luan en el norte de China, que abastece dos PTAP de la ciudad de Tanggu. El agua cruda tenía un pH de 8,3, una alcalinidad de 114 mg/L $CaCO_3$, una turbiedad de 11,7 UNT y una concentración de algas de $14{,}9x10^3$ células/L. EL CF en una concentración óptima de 66 mg/L removió el 98% de las algas y el 97% de la turbiedad.

Duarte y Hernández (2015) determinaron la eficiencia des STA y el PAC en la remoción de fósforo total y algas en el agua que sale de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), estación Salguero, ubicada en Valledupar (Colombia). El efluente de la PTAR se vierte en el rio Cesar, y durante los ensayos presentó un pH de 7, una turbidez de 43 UNT, una concentración de fósforo total de 33,66 mg/L y de algas de 1,1 mg/L. El STA en una concentración de 55 mg/L

removió el 68% del fósforo total y el 87,6% de las algas. Mientras el PAC en una concentración de 50 mg/L removió el 76% del fósforo total y el 88% de las algas.

Qi et al. (2016) probó la eficiencia del hipoclorito de sodio en la eliminación de cianobacterias Microcystis aeruginosa. Se emplearon concentraciones de células de $1x10^6$ células/mL, diferentes concentraciones de cloro y diferentes tiempos de exposición. La dosis de 0,8 mg/L de cloro dañó la integridad del 97% de las células para 60 minutos de exposición y con una dosis de 2 mg/L se dañó la integridad del 99% de las células para el mismo tiempo de exposición.

Abdo et al. (2020) evaluó la eficiencia del STA y el PAC con pre-cloración, en la remoción de algas verdes y cianobacterias del rio Nilo en Egipto. El agua cruda tenía un pH de 7,9, una turbiedad de 7,8 UNT y una alcalinidad de 168 mg/L $CaCO_3$. Los dos coagulantes presentaron una dosis óptima de 20 mg/L y la dosis óptima de cloro fue de 3,4 mg/L. Los dos coagulantes removieron el 100% de las cianobacterias, el STA removió el 78,7% de las algas verdes y el PAC removió el 83,4%.

5. Discusión

Los coagulantes inorgánicos CF, STA y PAC funcionan en un rango de pH amplio (5-9), y remueven eficientemente la turbiedad, el color y diferentes contaminantes. El CF presenta los mayores rendimientos a pH entre 5 y 6 (zerbatto et al., 2009; Baghvand et al., 2010;). En condiciones óptimas de pH el CF puede remover con más eficiencia la turbiedad y la materia orgánica en comparación con los coagulantes de aluminio (Baghvand et al., 2010; Uyguner et al., 2007). Sin embargo, a pH neutro o alcalino los rendimientos del CF en la clarificación del agua

disminuyen, generando un mayor consumo de coagulante para tratar eficientemente el agua (Cendales y Cañón, 2016; Tafur, 2018).

El STA remueve con mayor eficiencia la turbiedad y el color del agua a valores de pH entre 6 y 7 (Olivero et al., 2014). Tanto el CF como el STA reaccionan con la alcalinidad del agua, por lo tanto, en aguas con baja alcalinidad pueden disminuir considerablemente el pH, hasta el punto de necesitar un ajuste de pH para cumplir con el rango establecido para el agua potable (6,5-9) según la normatividad colombiana (Cendales y Cañón, 2016; Olivero et al., 2014). Debido a que las aguas naturales en general se encuentran en un rango de pH entre 6,5 y 9, el STA es más atractivo para emplearse en la coagulación de estas y evitar el gasto de reactivos para el ajuste final de pH.

EL PAC tiene especies poliméricas preformadas, por lo tanto, su eficiencia depende en menor grado del pH y la alcalinidad del agua, en comparación con el CF y el STA (Sperczyńska et al., 2014). Mirziy et al. (2012) reportó para el agua de un rio de Irán con una turbiedad inicial de 45 UNT, remociones de turbiedad del 80% y 93,9% para valores de pH de 5 y 8 respectivamente. La dosis de PAC empleada fue de 10 mg/L en los dos casos. Además, se encontró que el PAC en una concentración de 50 mg/L disminuyó el pH del agua de 8 a 7,9 y la alcalinidad de 150 a 110 mg/L de $CaCO_3$. Por otra parte, Yang et al. (2010) comparó las eficiencias del PAC y el STA en la remoción de turbiedad, MON y COD en el agua del rio Amarillo en China, que tenía un pH de 8,24. El STA logró remociones de 91%, 23% y 42% para turbiedad, COD y MON respectivamente. Mientras el PAC removió en un 94% la turbiedad en un 18% el COD y en un 51% la MON. Para los dos coagulantes se empleó una dosis óptima de 7 mg/L de Al_2O_3. Sin embargo, el PAC generó una menor concentración de Al residual (0,85 mg/L) en comparación con el STA (0,95 mg/L). De acuerdo con lo anterior, el PAC presenta eficiencias iguales o mejores que

el STA y el CF dependiendo de las características del agua, reacciona en menor grado con la alcalinidad del agua, influyendo menos en la disminución del pH, y en comparación con el STA, el PAC genera una menor concentración de aluminio residual en el agua potable, el cual se ha relacionado con la enfermedad de Alzheimer (Matías et al., 2018). Por lo tanto, de los tres coagulantes el PAC tiene el mejor perfil para funcionar adecuadamente en la mayoría de las aguas superficiales.

En cuanto al proceso de desinfección, el cloro ha demostrado tener gran eficiencia en la eliminación de patógenos. Además de producir una concentración residual de cloro libre activo que perdura en el tiempo y evita la contaminación del agua en las redes de distribución (Zyara et al., 2016). Por ejemplo, Zhao et al. (2001) encontró que con una concentración de 0,25 mg/L de cloro residual libre y un tiempo de contacto de 30 segundos, se destruían cinco de las seis cepas de Escherichia coli O157:H7 utilizadas, en donde una presentó tolerancia atípica. Esta clase de bacteria es la causante de diarrea y colitis hemorrágica en humanos, y puede eliminarse totalmente con bajas concentraciones de cloro y tiempos de contacto. Por otra parte, Arjona et al. (2012) evaluó la eficiencia del cloro en la eliminación de Coliformes totales y fecales en la PTAP de Puerto Mallarino en Cali. El agua cruda presentó concentraciones de coliformes totales entre $2{,}8x10^4$ y $7{,}5\ x10^5$ UFC/100 mL, y Coliformes fecales entre $3{,}5x10^3$ y $1{,}5\ x10^5$ UFC/100 mL. Se utilizaron dos secuencias de tratamiento, una con cloración antes de la coagulación y otra con cloración después de la sedimentación. Con las dos secuencias se eliminaron los Coliformes totales y fecales. No obstante, con la pre-cloración se formaron más THM (11,2 y 13,5 μg/L) en comparación con la post-cloración (0,52 y 0,84 μg/L). Por lo tanto, el cloro se puede emplear eficientemente antes o después del proceso de clarificación. No obstante, cuando se emplea la pre-

cloración hay que tener control de los THM que se forman, ya que han sido reconocidos como cancerígenos (Kadir, 2016).

Para la eliminación de algas la coagulación presenta altos rendimientos, en donde el CF en una concentración de 66 mg/L removió el 98% de las algas presentes en el rio Luan en China (Lou et al., 2012). Sin embargo, cuando el agua tiene concentraciones de fosforo altas que no son removidas eficientemente, se puede producir una proliferación de algas dentro de las estructuras de las PTAPs. De acuerdo con esto, Diaz et al. (2007) reportó remociones hasta del 90% de fosfatos en el agua del rio Otún de la ciudad de Pereira, para concentraciones de CF de 18-22 mg/L y de STA de 30 mg/L. Mientras el STA en una concentración de 55 mg/L logró remover el 68% del fosforo total y el 87,6% de algas del agua del efluente de la PTAR estación Salguero, ubicada en Valledupar. En la misma agua, el PAC en una concentración de 50 mg/L removió el 76% del fosforo total y el 88% de las algas (Duarte y Hernández, 2015). De acuerdo con lo anterior, los tres coagulantes logran altas remociones de fosforo y algas, siendo el CF el que logra mejores rendimientos.

Cuando se presentan altas concentraciones de algas en las aguas naturales, se requieren mayores concentraciones de coagulante. Por lo tanto, se emplea la pre-cloración para ayudar a eliminar estos microorganismos. Qi et al. (2016) reportó que con una concentración de 0,8 mg/L de cloro y 60 minutos de exposición, se lograban eliminar en un 97% las cianobacterias Microcystis aeruginosa de un cultivo de concentración $1x10^6$ células/mL, y con 2 mg/L se eliminó el 99% de las algas en el mismo tiempo de exposición. Por otra parte, Abdo et al. (2020) evaluó la eficiencia de la pre-cloración y coagulación en la remoción de algas verdes y cianobacterias. Con una concentración óptima de 3,4 mg/L de cloro y 20 mg/L para ambos coagulantes se logró eliminar el 100% de las cianobacterias, con el PAC se removió el 83,4% de las algas verdes y con

el STA el 78,7%. De acuerdo con lo anterior, con la secuencia pre-cloración/coagulación se pueden eliminar altos porcentajes de algas verdes y se pueden eliminar totalmente las cianobacterias potencialmente tóxicas para los animales y los humanos.

6. Conclusiones

En los estudios realizados se reportan al CF, el STA y el PAC como los coagulantes más eficientes en el tratamiento de aguas naturales. El rendimiento de los coagulantes depende tanto de las características del agua como de la concentración de agente empleada en el tratamiento. De acuerdo con esto, el PAC tiene eficiencias iguales o mejores que el STA y el CF dependiendo de las características del agua. Además, reacciona en menor grado con la alcalinidad y, por lo tanto, influye en menor grado en la disminución del pH.

De acuerdo con las fuentes bibliográficas el cloro es el desinfectante más efectivo en el tratamiento de agua potable. En las concentraciones empleadas es amigable con los humanos y el ecosistema, tiene un amplio rango microbiocida y produce una concentración de cloro residual libre en el agua para evitar contaminaciones en las redes de distribución. No obstante, en altas concentraciones puede ser irritante y toxico.

En la literatura científica se reportan altas eficiencias en la remoción y eliminación de algas por medio de la coagulación con CF, STA, PAC, y de la oxidación con cloro. En donde al emplear la pre-cloración con la coagulación se remueven eficiente las algas verdes, y principalmente las cianobacterias.

7. Recomendaciones

Realizar una caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua de la quebrada Mensulí, para identificar principalmente los niveles de fósforo y la concentración de algas.

Realizar pruebas de tratabilidad con el CF, el STA y el PAC para comparar sus eficiencias en la clarificación del agua de la quebrada Mensulí. De acuerdo con los resultados, emplear los coagulantes con la pre-cloración para determinar la eficiencia en la remoción de algas.

Realizar la captación del agua de la quebrada a una profundidad de 1 metro para evitar la recolección de las algas, que se encuentran mayoritariamente cerca de la superficie para captar los rayos de luz necesarios para la fotosíntesis.

Bibliografía

Abdo, S. M., Mahmoud, R. H., Youssef, M., & El-Naggar, M. E. (2020). Cationic Starch and Polyaluminum Chloride as Coagulants for River Nile Water Treatment. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100331. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100331

Aguilar, M. I. (2002). *Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales: coagulación-floculación*. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=8vlQBXPvhAUC&oi=fnd&pg=PA17&dq=coagulacion+por+puente+de+polimero&ots=ckMKdSBqC4&sig=re_hCQOln7iGIisVW8i-uJRps84#v=onepage&q=coagulacion%20por%20puente%20de%20polimero&f=false

Akbal, F., & Camci, S. (2010). Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation for heavy metal removal. *Chemical Engineering & Technology*, 33(10), 1655-1664. https://doi.org/10.1002/ceat.201000091

Apostol, G., Kouachi, R., & Constantinescu, I. (2011). Optimization of coagulation-flocculation process with aluminum sulfate based on response surface methodology. UPB Buletin Stiintific, Series B: *Chemistry and Materials Science*, 73(2), 77-84. https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full66817.pdf

Aragonés-Beltrán, P., Mendoza-Roca, JA, Bes-Piá, A., García-Melón, M. y Parra-Ruiz, E. (2009). Aplicación del análisis de decisiones multicriterio a los resultados de las pruebas de jarras para la selección de productos químicos en el tratamiento fisicoquímico de aguas residuales textiles. *Revista de materiales peligrosos*, 164 (1), 288-295. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.046

Arcila, H. R., y Peralta, J. J. (2015). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), 136-153. https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/1303

Arjona, S., Torres, P., Cruz, C., Loaiza, D., y Escobar, J. (2012). Efecto del punto de precloración sobre la formación de trihalometanos en procesos convencionales de potabilización de agua. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 11(20), 57-65. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75025069005

Baghvand, A., Zand, A. D., Mehrdadi, N., & Karbassi, A. (2010). Optimizing coagulation process for low to high turbidity waters using aluminum and iron salts. *American Journal of Environmental Sciences*, 6(5), 442-448. https://doi.org/10.3844/ajessp.2010.442.448

Biryukov, A. S., Gavrikov, V. F., Nikiforova, L. O., & Shcheglov, V. A. (2005). New physical methods of disinfection of water. *Journal of Russian Laser Research*, 26(1), 13-25. https://doi.org/10.1007/s10946-005-0002-8

Bolto, B., & Gregory, J. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. Water research, 41(11), 2301-2324. https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.012

Boskabady, M. H., Esmaeilizadeh, M., & Boskabady, M. (2014). The effect of exposure to chlorine on pulmonary function tests and respiratory and allergic symptoms in Iranian lifeguards. *Toxicology and industrial health*, 30(3), 218-224. https://doi.org/10.1177/0748233712454465

Bratby, J. (2016). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment*. https://books.google.com.co/books?id=PabQDAAAQBAJ&hl=es&authuser=0

Cendales Arévalo, W. R., & Cañón Celi, O. A. (2016). *Evaluación de la eficiencia del mucílago del café como coagulante frente al cloruro férrico en los procesos de remoción de sólidos suspendidos en el agua* (proyecto de pregrado). https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/324/

Cerón, V. (2016). *Estudio para la determinación y dosificación óptima de coagulantes en el proceso de clarificación de aguas crudas en la potabilización de aguas de la empresa EMPOOBANDO ESP* (proyecto de pregrado). http://sired.udenar.edu.co/id/eprint/3769

Chew, C. M., Aroua, M. K., Hussain, M. A., & Ismail, W. M. Z. W. (2016). Evaluation of ultrafiltration and conventional water treatment systems for sustainable development: an industrial scale case study. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3152-3163. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.037

Chulluncuy, N. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería industrial*, (029), 153-170. https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/view/232

Cogollo, J. M. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxicloruro de aluminio. *Dyna*, 78(165), 18-27. https://www.redalyc.org/pdf/496/49622372002.pdf

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's water treatment: principles and design*. https://books.google.com.co/books?id=lSlHAAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&authuser=0&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=temperature&f=false

Díaz, W. H. Gonzaga, B, & Contreras, N. (2007). Determinación del Coagulante que permita la máxima remoción de Fosfátos en Agua Cruda del Rio Otún. *Scientia et technica*, 1(34). https://doi.org/10.22517/23447214.5717

Desai, D., Beh, E. S., Sahu, S., Vedharathinam, V., van Overmeere, Q., de Lannoy, C. F., Jose, A. P., Volkel, A. R., & Rivest, J. B. (2018). Electrochemical desalination of seawater and

hypersaline brines with coupled electricity storage. *ACS Energy Letters*, 3(2), 375-379. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b01220

Domínguez, J. R., Beltrán de Heredia, J., González, T., & Sanchez-Lavado, F. (2005). Evaluation of ferric chloride as a coagulant for cork processing wastewaters. Influence of the operating conditions on the removal of organic matter and settleability parameters. *Industrial & engineering chemistry research*, 44(17), 6539-6548. https://doi.org/10.1021/ie0487641

Duan, J., & Gregory, J. (2003). Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in colloid and interface science*, 100, 475-502. https://doi.org/10.1016/S0001-8686(02)00067-2

Duarte, D. D., & Hernández, L. F. R. (2015). Remoción de nutrientes mediante coagulantes naturales y químicos en planta de tratamiento de aguas residuales, Valledupar Colombia. *RIAA*, 6(2), 183-196. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5628793

Duckhouse, H., Mason, T. J., Phull, S. S., & Lorimer, J. P. (2004). The effect of sonication on microbial disinfection using hypochlorite. *Ultrasonics sonochemistry*, 11(3-4), 173-176. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.01.031

Franco, V. A. (2018). Agua, ciudad y derecho. *Alegatos, 23*(72), 229-246. http://revistastmp.azc.uam.mx/alegatos/index.php/ra/article/view/391

Gamarra, Y., & Restrepo, R. (2013). Metodología para la Formación de Estudiantes de Ingeniería ambiental utilizando índices fisicoquímicos y biológicos para determinar calidad de agua en la Quebrada Menzuli (Santander, Colombia). Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. *Investigación, desarrollo y práctica*, 6(2), 37-45. http://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/41076

Gao, S., Yang, J., Tian, J., Ma, F., Tu, G., & Du, M. (2010). Electro-coagulation–flotation process for algae removal. *Journal of hazardous materials*, 177(1-3), 336-343. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.037

García, M., Piñero, A., Bernal, F. y Ardila, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (36), 60-64. https://www.redalyc.org/pdf/1210/121025826011

Ghernaout, D., & Ghernaout, B. (2012). Sweep flocculation as a second form of charge neutralisation—a review. *Desalination and Water Treatment*, 44(1-3), 15-28. https://doi.org/10.1080/19443994.2012.691699

Haghiri, S., Daghighi, A., & Moharramzadeh, S. (2018). Optimum coagulant forecasting by modeling jar test experiments using ANNs. *Drinking Water Engineering & Science*, 11(1). https://d-nb.info/1163628476/34

IDEAM, I. D. (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2014

Resolución 2115 de 2007 [Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial]. Por la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Junio 22 de 2007. http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007

Kadir, Ö. (2016). Experimental investigation of trihalomethanes removal in chlorinated drinking water sources with carbon nanomaterials. *Fresenius Environmental Bulletin*, 25, 6202–6214. https://hdl.handle.net/20.500.12628/5828

Lou, I., Gong, S., Huang, X., Liu, Y., & Mok, K. M. (2013). Coagulation optimization using ferric and aluminum salts for treating high algae and high alkalinity source water in a typical North-China plant. *Desalination and water treatment*, 51(16-18), 3361-3370. https://doi.org/10.1080/19443994.2012.751158

March, J. G., & Gual, M. (2007). Breakpoint chlorination curves of greywater. *Water Environment Research*, 79(8), 828-832. https://doi.org/10.2175/106143007X156736

Matías, C. A., López, S., Matías, D., & Antonio, I. (2018). El aluminio empleado en el tratamiento de aguas residuales y su posible relación con enfermedad de Alzheimer. *Journal of Negative and No Positive Results*, 3(2), 139-143. https://doi.org/10.19230/jonnpr.1704

Mirzaiy, A., Takdastan, A., Alavi, N., & Mohamadian, H. (2012). Removal of turbidity, organic matter, coliform and heterotrophic bacteria by coagulants poly aluminium chloride from Karoon River water in Iran. *Asian Journal of Chemistry*, 24(6), 2389. https://etrc.ajums.ac.ir/_hn-dez/documents/2-91.pdf

Montoya, C., Loaiza, D., Torres, P., Cruz, C. H., & Escobar, J. C. (2013). Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *Revista EIA*, 16, 137-148. http://repository.eia.edu.co/handle/11190/148

Mamani, J. V., & Chamorro, R. A. M. (2013). Polielectrolitos orgánicos naturales en el tratamiento de agua para consumo humano. *Revista de Investigación Universitaria*, 2(2). https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/riu/article/view/706

Meza, M., Riaños, K., Mercado, I., Olivero, R. & Jurado, M. (2018). Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de Moringa oleífera en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo-Atlántico. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 95-104. https://doi.org/10.18273/revuin

Miller, S. M., Fugate, E. J., Craver, V. O., Smith, J. A., & Zimmerman, J. B. (2008). Toward understanding the efficacy and mechanism of Opuntia spp. as a natural coagulant for

potential application in water treatment. Environmental science & technology, 42(12), 4274-4279. https://doi.org/10.1021/es7025054

Morris, G., Puri, B. K., & Frye, R. E. (2017). The putative role of environmental aluminium in the development of chronic neuropathology in adults and children. How strong is the evidence and what could be the mechanisms involved?. *Metabolic brain disease*, 32(5), 1335-1355. https://doi.org/10.1007/s11011-017-0077-2

Oliveira, V. M., Assis, C. R. D., Costa, H. M. S., Silva, R. P. F., Santos, J. F., Carvalho Jr, L. B., & Bezerra, R. S. (2017). Aluminium sulfate exposure: A set of effects on hydrolases from brain, muscle and digestive tract of juvenile Nile tilapia (Oreochromis niloticus). *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 191, 101-108. https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2016.10.002

Olivero R. E., Aguas, Y. R., Mercado, I. D., Casas, D. P. & Montes, L. E. (2014). Utilización de Tuna (opuntia ficus-indica) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. *Avances: Investigación En Ingeniería*, 11(1), 70-75. https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.302

Pavón-Silva, T., Pacheco-Salazar, V., Sanchez-Meza, J. C., Roa-Morales, G., & Colín-Cruz, A. (2009). Physicochemical and biological combined treatment applied to a food industry wastewater for reuse. *Journal of Environmental Science and Health*, Part A, 44(1), 108-115. https://doi.org/10.1080/10934520802515467

Postolachi, L., Rusu, V., & Lupaşcu, T. (2016). Effect of aluminium sulphate aging on coagulation process for the Prut river water treatment. *Chemistry Journal of Moldova*, 11(1), 27-32. https://doi.org/10.19261/cjm.2016.11(1).03

Qi, J., Lan, H., Liu, R., Miao, S., Liu, H., & Qu, J. (2016). Prechlorination of algae-laden water: The effects of transportation time on cell integrity, algal organic matter release, and chlorinated disinfection byproduct formation. *Water Research*, 102, 221-228. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.06.039

Ramírez, M., Ramírez, P., Cuesta, N. y Rodríguez, P. (2018). Contaminación de agua potable y enfermedades: causas, consecuencias y soluciones. *Avances de Investigación en Salud a lo largo del Ciclo Vital*, 2, 41-46. https://www.formacionasunivep.com/Vcice/files/libro%20avances%20de%20investigacion.pdf#page=41

Renault, F., Sancey, B., Badot, P. M., & Crini, G. (2009). Chitosan for coagulation/flocculation processes–an eco-friendly approach. *European Polymer Journal*, 45(5), 1337-1348. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.12.027

Romero, J. A. (2005). *Calidad del agua*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Sahu, O. P., & Chaudhari, P. K. (2013). Review on chemical treatment of industrial waste water. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 17(2), 241-257. https://doi.org/10.4314/jasem.v17i2.8

Salazar, L. L., Luna, M. & Salazar, R. E. (2015). Comparative study between M. oleifera and aluminum sulfate for water treatment: case study Colombia. *Environ Monit Assess*, 187, 668. https://doi.org/10.1007/s10661-015-4793-y

Shang, C., & Blatchley, E. R. (2001). Chlorination of pure bacterial cultures in aqueous solution. *Water Research*, 35(1), 244-254. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00248-7

Shusterman, D. (2014). Occupational irritant and allergic rhinitis. *Current allergy and asthma reports*, 14(425), 1-8. https://doi.org/10.1007/s11882-014-0425-9

Sincero, A. P., & Sincero, G. A. (2002). *Physical-chemical treatment of water and wastewater*. New York, Estados Unidos. CRC press.

Sperczyńska, E., Dąbrowska, L., & Wiśniowska, E. (2016). Removal of turbidity, colour and organic matter from surface water by coagulation with polyaluminium chlorides and with activated carbon as coagulant aid. *Desalination and Water Treatment*, 57(3), 1139-1144. https://doi.org/10.1080/19443994.2014.989634

Tafur, E. H. (2018). *Evaluación del cloruro férrico y sulfato de aluminio, como coagulantes en el proceso de potabilización, en términos de turbidez y potencial de hidrógeno, de las aguas de la quebrada Rumiyacu, distrito de Moyobamba* (Proyecto de pregrado). http://hdl.handle.net/11458/3044

Teh, C. Y., Budiman, P. M., Shak, K. P. Y., & Wu, T. Y. (2016). Recent advancement of coagulation–flocculation and its application in wastewater treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(16), 4363-4389. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04703

Theodoro, J. P., Lenz, G. F., Zara, R. F., & Bergamasco, R. (2013). Coagulants and natural polymers: perspectives for the treatment of water. *Plastic and Polymer Technology*, 2(3), 55-62. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/48229232/PAPT014_2_3_55_62.pdf?1471831937=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCoagulants_and_Natural_Polymers_Perspect.pdf&Expires=1601945342&Signature=ClM9l8YyO5A216tMEzvo6F9OwvJ9ZOvl-gtboxirLhWeupeu74ixP3dnyfqc46TzSD6pbiijEbrsbPHxMvTx9d0TC4--FTC4hFx-zu4WRGqXjsrw-px8samWLH940s-B2d7V~8pkEmRtLBE66bd5rRi2d0YbVtBYkNtOvpVLPW47DGzbBm502yJLTyJPqSS6GNyb~Rjll08jdo~x8nntDrhoDKFr8xZBlJHeSnz0v5gyEEO0K5XNrS6WiFnQSmrnvRqnrJYQWZzEgZppxKbv0V9R3GMFcX9y2PdqBnicc9Q~s~K0MA9sVP8uLcIdA5iSSJRRC5wZGYL9aZz0Dp3Xbw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Uyguner, C. S., Bekbolet, M., & Selcuk, H. (2007). A comparative approach to the application of a physico-chemical and advanced oxidation combined system to natural water samples. Separation *Science and Technology*, 42(7), 1405-1419. https://doi.org/10.1080/01496390701289807

Vammen, K. y Vaux, H. (2019). Una visión general de la calidad del agua en las Américas. *Calidad del Agua en las Américas*, 39, 12-19. http://grupomontevideo.org/ndca/caaguas/wp-content/uploads/2019/03/wb09

Wang, B., Shui, Y., He, M., & Liu, P. (2017). Comparison of flocs characteristics using before and after composite coagulants under different coagulation mechanisms. *Biochemical Engineering Journal*, 121, 107-117. https://doi.org/10.1016/j.bej.2017.01.020

Wang, D., Wu, R., Jiang, Y., & Chow, C. W. (2011). Characterization of floc structure and strength: role of changing shear rates under various coagulation mechanisms. Colloids and Surfaces A: *Physicochemical and Engineering Aspects*, 379(1-3), 36-42. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.11.048

Wyatt, N. B., Gloe, L. M., Brady, P. V., Hewson, J. C., Grillet, A. M., Hankins, M. G., & Pohl, P. I. (2012). Critical conditions for ferric chloride-induced flocculation of freshwater algae. *Biotechnology and bioengineering*, 109(2), 493-501. https://doi.org/10.1002/bit.23319

Xu, H., Zhang, D., Xu, Z., Liu, Y., Jiao, R., & Wang, D. (2018). Study on the effects of organic matter characteristics on the residual aluminum and flocs in coagulation processes. *Journal of Environmental Sciences*, 63, 307-317. https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.11.020

Yang, Z., Gao, B., & Yue, Q. (2010). Coagulation performance and residual aluminum speciation of Al2 (SO4) 3 and polyaluminum chloride (PAC) in Yellow River water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 165(1), 122-132. https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.08.076

Yanza, J., Rivera, R., Gómez, L. y Zafra, C. (2019). "Evaluación de FeCl3 y PAC para la potabilización de agua con alto contenido de color y baja turbiedad". *TecnoLógicas*, 22(45), 9-21. https://doi.org/10.22430/22565337.1085

Zerbatto, M., Carrera, E., Eliggi, M. S., Modini, L., Vaira, S., Noseda, J. C., & Abramovich, B. (2009). Cloruro Férrico para la coagulación optimizada y remoción de enteroparásitos en agua. *Augmdomus*, 1. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/15890

Zhang, D., Li, G., & Yu, J. C. Y. (2010). Inorganic materials for photocatalytic water disinfection. *Journal of materials chemistry*, 20(22), 4529-4536. https://doi.org/10.1039/b925342d

Zhang, Z., Wang, J., Liu, D., Li, J., Wang, X., Song, B., Yue, B., Zhao, K. & Song, Y. (2017). Hydrolysis of polyaluminum chloride prior to coagulation: Effects on coagulation behavior and implications for improving coagulation performance. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 162-169. https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.10.014

Zhao, T., Doyle, M. P., Zhao, P., Blake, P., & Wu, F. M. (2001). Chlorine inactivation of Escherichia coli O157: H7 in water. *Journal of food protection*, 64(10), 1607-1609. https://doi.org/10.4315/0362-028X-64.10.1607

Zyara, A. M., Torvinen, E., Veijalainen, A. M., & Heinonen-Tanski, H. (2016). The effect of chlorine and combined chlorine/UV treatment on coliphages in drinking water disinfection. *Journal of water and health*, 14(4), 640-649. https://doi.org/10.2166/wh.2016.144