

## ***Opuntia ficus indica* como coagulante natural alternativo para la clarificación del agua cruda**

### ***Opuntia ficus indica* as an alternative natural coagulant for the clarification of raw water**

**Juan David Cárdenas O<sup>1</sup>.**

**Johana Stelly Daza I.<sup>2</sup>**

#### **RESUMEN**

El departamento de Nariño se encuentra en el nivel alto del Índice de Riesgo de la Calidad de Agua para Consumo Humano – IRCA, causado por la deficiente infraestructura, sistemas improvisados en plantas de tratamiento, mano de obra no calificada para la operación del sistema de tratamiento de agua potable, también el costo y manejo de algunos aditivos usados en el proceso de potabilización o el acceso a ellos en zonas rurales. Por lo anterior, se planteó un coagulante natural para brindar una alternativa en el proceso de clarificación de agua potable en zonas del departamento que se caracterizan por deficiencias en el tratamiento tecnificado del agua. Esta investigación evaluó la eficiencia del extracto del cactus *Opuntia ficus indica* a través de la prueba de Jarras en agua cruda sintética creada en laboratorio. La evaluación del coagulante natural se realizó mediante la comparación con el Policloruro de Aluminio (PAC), un coagulante químico con excelente desempeño en la remoción de turbiedad y color; para esto, se plantearon dos escenarios de estudio con base a dos parámetros de evaluación, parámetros exigidos por la Resolución 2115 de 2017; Turbiedad y Color: en el escenario A se establecieron valores bajos de los parámetros; por el contrario en el escenario B valores de los parámetros altos. Los resultados obtenidos demostraron que el extracto de *Opuntia ficus indica* es una opción viable como coagulante alternativo, puesto que presenta una remoción entre 77 a 98 % en turbiedad y de 80 a 98 % en el color del agua.

**Palabras Claves:** Color, floculación, mucilago, remoción, turbiedad.

---

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, S Juan de Pasto, Colombia, correo electrónico: juanda-716@hotmail.com

<sup>2</sup>Estudiante de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia, correo electrónico: jhoadz@outlook.com

## ABSTRACT

The Department of Nariño is at the high level of the Risk Index of Water Quality for Human Consumption - RIWQ that is caused by poor infrastructure, improvised systems in treatment plants, unskilled labor for the operation of the potable water treatment system, as well as the cost and handling of some additives used in the process of purification or access to them in areas rural Therefore, a natural coagulant was proposed to provide an alternative in the process of clarification of drinking water in areas of the department that are characterized by deficiencies in the technical treatment of water. This investigation evaluated the efficiency of the cactus *Opuntia ficus indica* extract through the test of jars in synthetic raw water created in the laboratory. The evaluation of the natural coagulant was carried out by means of the comparison with the PAC, a chemical coagulant with excellent performances in the removal of turbidity and color; for this, two scenarios were proposed with two evaluation parameters: Turbidity and Color; parameters required by Resolution 2115 of 2017; in scenario A, low values of the parameters were established; on the contrary in scenario B values of the high parameters. The results obtained showed that *Opuntia ficus indica* extract is a viable option for the water coagulation process, since it presents a removal between 77 to 98% in turbidity and 80 to 98% in water color.

**Key words:** Color, flocculation, mucilage, removal, turbidity.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para la supervivencia de todo ser vivo y para el desarrollo de las sociedades; por lo cual se requiere de la eficiencia en su uso, su cuidado y un adecuado tratamiento (Fernández, 2012), para así asegurar su disponibilidad, accesibilidad y la satisfacción en condiciones de saneamiento para la población (Hernández *et al.*, 2011). Por lo tanto, en Colombia, se establece un Sistema para la Protección y Control de la Calidad de Agua, que a través de herramientas de vigilancia y control que garantice agua apta para consumo humano a todos sus habitantes (Ministerio de Salud y Protección Social, 2018).

De acuerdo a los procesos de vigilancia y control ejecutados, el Ministerio de Salud y Protección Social (2018) en el Informe Nacional de Calidad de Agua para Consumo Humano – INCA, reporta que el departamento de Nariño presenta falencias en los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua para consumo humano y se posiciona en un nivel alto (47,3 %) en el Índice de Riesgo de la Calidad de Agua para Consumo Humano – IRCA.

Se cree que el nivel de riesgo alto, es causado por las problemáticas de la calidad del agua que se presentan en la mayoría de las zonas rurales del departamento; dado que en estas áreas se cuenta con acueductos interrumpidos (UNICEF, 2016), sistemas de potabilización inapropiados, deficiente infraestructura, sistemas improvisados por la misma comunidad o no se cuenta con la mano de obra calificada en el proceso de potabilización de agua (Araujo y Granja, 2013; Vargas, 2004).

Como se afirmó anteriormente, la mano de obra no calificada en el proceso de potabilización representa una causa significativa en la problemática de la mala calidad del agua, puesto que el desconocimiento del uso adecuado y la dosificación de los aditivos químicos que son utilizados por plantas de tratamiento de aguas convencionales, tales como: sales de aluminio o de hierro para desestabilizar partículas coloidales (Herrera, 2015), hace que en zonas rurales no se obtenga agua de calidad para consumo humano.

Además, se ha comprobado que el aluminio residual en el agua de consumo humano puede ser peligroso para la salud y afectar gravemente el sistema nervioso central. La acumulación de aluminio puede ser grave, más aún, cuando las células afectadas tienen poca o nula capacidad de renovación, provocando la destrucción de las mismas, causando encefalopatías o cardiomiopatías mortales (Vázquez y Montoya, 2004).

En la ciudad de Pasto – Nariño, la planta Centenario a cargo de la Empresa de Obras Sanitarias de Pasto EMPOPASTO S.A. E.S.P., es la encargada de realizar la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado, conexo y asociados de la ciudad (EMPOPASTO, 2015); en la planta inicialmente se utilizaba como coagulante sintético el sulfato de aluminio, el cual posteriormente fue reemplazado totalmente por el coagulante sintético Policloruro de

Aluminio (PAC), el cual que representa un alto costo de adquisición, superando los \$1.200.000.000 anuales que representan 1.189.061 Kg (Lasso, 2013).

Además, requiere de pre tratamientos como el uso de Bicarbonato de Sodio para controlar las condiciones de baja alcalinidad para valores inferiores a 15 ppm y dosificaciones de Policloruro de Aluminio mayores de 70 ppm., y tratamientos adicionales como el uso de Cal Hidratada para la estabilización de pH incrementando los gastos anuales para la empresa y generando la presencia de más residuos químicos (Lasso, 2013).

El uso de coagulantes naturales puede minimizar o evitar el uso de los coagulantes químicos, reduciendo de manera significativa los costos de tratamiento si se dispone de ellos localmente, además en algunos estudios se ha comprobado las ventajas de estos coagulantes en comparación con los productos químicos como lo afirma Trujillo *et al.* (2014), entre ellas está la biodegradabilidad, baja toxicidad y baja producción de lodos.

Debido a lo anteriormente mencionado el siguiente estudio se evaluó la eficiencia del extracto de *Opuntia ficus indica* como coagulante natural alternativo para la clarificación de agua cruda creada en laboratorio. Además se estableció un protocolo de diseño de agua cruda sintética y se estipuló el protocolo de extracción de mucilago de *Opuntia ficus indica* como coagulante natural alternativo.

## **METODOLOGÍA**

### **Generalidades de la investigación**

La investigación se desarrolló en los laboratorios de Calidad de Agua en la Universidad de Nariño, donde se evaluó la eficiencia del extracto de *Opuntia ficus indica* como coagulante natural alternativo en el proceso de clarificación del agua, simulando escenarios diferentes, basados en los parámetros de evaluación: turbiedad y color; dos de los parámetros exigidos por la Resolución 2115 de 2007 (Ministerio de Protección Social & MAVDT, 2007).

Esta fue una investigación científica semi-experimental con enfoque cuantitativo (Hernández, 2014); Y los ensayos se realizaron a escala laboratorio aplicando la prueba de jarras mediante el floculador para pruebas de jarras modelo Y6.

### **Agua cruda sintética**

El agua a tratar se denominó agua cruda sintética y con ella se generaron dos escenarios donde se evaluó la eficiencia de los coagulantes. Para establecer las condiciones iniciales al agua se tuvieron en cuenta los datos proporcionados por EMPOPASTO S. A. E. S. P. (2017), simulando fuentes hídricas de la región con base a los dos parámetros de estudio (Turbiedad y Color); para ello se utilizó agua sin cloro a la cual se agregó diferentes cantidades de sobrenadante de lodos bentónicos, metodología propuesta por Bolaños (2014).

**Condiciones agua cruda sintética en el escenario A.** En la Tabla 1, se presentan los promedios de los parámetros iniciales que se garantizaron para la realización de cada una de las pruebas de jarras efectuadas.

**Tabla 1.** Condiciones iniciales del escenario A de estudio.

<b>Parámetros</b>	<b>Escenario A de estudio</b>	
	<b><i>Opuntia ficus indica</i></b>	<b>PAC</b>
Turbiedad NTU	30,2	30,8
Color UPC	305,3	302,5
Ph	6,64	8,43
Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	17,5	43
Temperatura °C	18	18

Este escenario corresponde al promedio de datos de turbiedad del mes de Marzo de 2015 de la quebrada Mijitayo del municipio de Pasto con una turbiedad de 30,5 NTU y color de 305,8 UPC; los otros parámetros no se tuvieron en cuenta para la determinación del escenario. Cabe resaltar que fue difícil dar las condiciones exactas para cada prueba realizada, no obstante se logró manejar una turbiedad cercana para todos los ensayos para que las condiciones del agua sean similares y obtener resultados con mayor credibilidad.

**Condiciones agua cruda sintética en el escenario B.** En la Tabla 2, se establecen las condiciones iniciales del agua cruda sintética en el escenario B, con los promedios de parámetros en los cuales se evaluó la eficiencia de los coagulantes en cuestión a través de las pruebas de jarras.

**Tabla 2.** Condiciones iniciales del escenario B de estudio.

Parámetros	Escenario B de estudio	
	Agua cruda sintética inicial	
	<i>Opuntia Ficus Indica</i>	PAC
Turbiedad NTU	150,5	150,6
Color UPC	1125,0	1123,8
pH	6,8	8,8
Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	15,7	52,0
T °C	18	18

Este corresponde a un escenario alterno al escenario A, que corresponde al promedio de datos de turbiedad del mes de Octubre de 2017 con una turbiedad de 151,6 NTU y 961,6 UPC de color de la quebrada Chapal del municipio de Pasto.

### **Preparación de coagulantes de estudio**

El material vegetal de *Opuntia ficus indica* para la investigación se recolecto en una zona rural del municipio de Remolino panamericano; el agente coagulante se obtuvo de los tallos o Cladodios a partir de las siguientes operaciones: pelado, picado, mezclado y escurrido del coagulante.

Una vez recolectado el material vegetal se procedió a su refrigeración a 8 °C para evitar la degradación y pérdida de viscosidad, el pelado se utilizó para eliminar la corteza, aprovechando el tejido central que se le conoce con el nombre de parénquima medular (Aceves. 1991), que se caracteriza por ser de textura blanda, verde clara, muy húmeda y viscosa, se procedió al picado en cuadritos, se pesó 100 gr de este material para ser mezclado con 200 ml de agua destilada en un Baker y se colocó en la plancha de agitación por una hora; finalmente se escurrió el extracto a través de un colador para separar el mucilago del

material sólido y así facilitar el uso del coagulante; cabe resaltar que el coagulante se preparó previamente a las pruebas.

El coagulante artificial se preparó bajo la guía de Laboratorio de la Universidad de Nariño: Determinación de dosis óptima de coagulante, el cual se preparó con 20 ml de PAC en 100 ml de Agua destilada e igualmente se trabajó con la metodología descrita en la misma guía anteriormente mencionada, en los dos escenarios establecidos en condiciones similares.

### **Prueba de jarras**

Para establecer las condiciones óptimas en la remoción de los parámetros anteriormente establecidos se trabajó con la guía: Laboratorio Plantas de Potabilización - Ensayo de pruebas de jarras de la Universidad de Nariño; realizando pruebas de determinación de dosis óptima de coagulante, mezcla rápida y mezcla lenta, tiempo óptimo de sedimentación, en donde se combinaron diferentes revoluciones por minuto y tiempos en los diferentes tipos de mezcla y el tiempo de sedimentación adecuado para la evaluación de la eficiencia, posteriormente se midieron los parámetros con el Turbidímetro DRT 100B Y Colorímetro DR/700 del laboratorio de hidráulica y sanitaria del programa de ingeniería civil de la misma universidad.

La determinación de dosis óptima, consistió en la adición de dosis crecientes de coagulante a seis jarras con porciones iguales del agua a ensayar (2 litros), determinando después algunas propiedades físicas y químicas (turbiedad, color) en las porciones tratadas, que permitieron establecer las dosis óptimas de coagulante que deben añadirse al agua para su tratamiento.

En general, se emplea la medición de la turbiedad residual en el agua tratada del ensayo como parámetro de decisión sobre la dosis óptima a utilizar según Tejero *et al.* (2009), por otra parte Pacheco (2005) establece “por medio de esta prueba, puede determinar con suficiente precisión la dosis de coagulante necesaria para tratar el agua, cada vez que ocurra un cambio de calidad que se mide sobre la base de la turbiedad y el color del agua” es por ello que se analizó a la par el comportamiento del color.

### **Eficiencia de coagulantes**

Para determinar la eficiencia de este coagulante natural en el proceso de clarificación del agua cruda sintética se comparó con el coagulante sintético Policloruro de Aluminio PAC, obtenido de la planta Centenario de EMPOPASTO S. A. E. S. P.

La eficiencia de los coagulantes evaluados en los escenarios propuestos se determinó a través de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Remoción } X = \frac{D_i - D_f}{D_i} * 100$$

Donde:

- $X$  parámetros a evaluar.
- $D_i$  corresponder al Dato de inicial, para los parámetros a estudiar.
- $D_f$  corresponde al Dato final posterior a la prueba de jarras, para los parámetros a estudiar.

Se analizaron otros parámetros en las diferentes pruebas para determinar su comportamiento ante los coagulantes y en los diversos escenarios, como el pH, alcalinidad y temperatura.

### **Análisis estadístico**

Por otro lado, para determinar el tamaño de la muestra que se seleccionó en el estudio de investigación, se utilizó el programa STATGRAPHICS Centurion XVI así se definió que la cantidad de muestras requeridas son  $n=36$ , debido a que se debe a un diseño multifactorial con dos factores y dos variables de respuesta con un nivel de confianza del 95%.

Los datos arrojados en los ensayos, fueron procesados mediante el programa Statgraphics Centurion (vXVI), se usó la prueba ANOVA que consiste en un análisis de varianza en este caso de una vía, usando como variable el porcentaje de remoción de turbiedad y de color, utilizando 36 datos de los 5 ensayos de la prueba de jarras, para la validación del método de extracción de la solución del coagulante de *Opuntia ficus indica* y su comportamiento en el proceso de remoción de turbiedad y color en el escenario A y B, con un nivel de significancia  $f = 0,05$ , planteando una hipótesis de trabajo y de contraparte su hipótesis nula.

Empleando la técnica estadística ANOVA se analizó las hipótesis:

$H_0 =$  ¿No existen diferencias significativas entre los resultados de remoción de turbiedad y color utilizando el coagulante del extracto de *O. ficus indica* en el escenario A y B?

$H_T =$  ¿Existe diferencias significativas entre los resultados de remoción de turbiedad y color utilizando el coagulante del extracto de *O. ficus indica* en el escenario A y B?

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

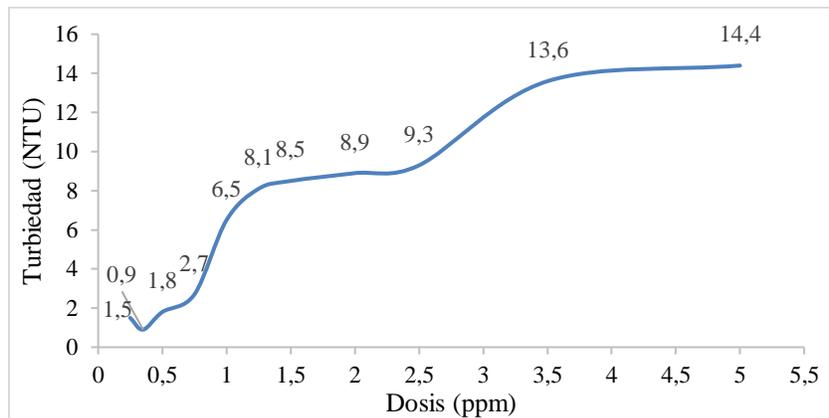
### Condiciones generales

Las condiciones establecidas para lograr el mayor porcentaje de remoción del PAC y del coagulante natural en la prueba de Jarras fueron, mezcla rápida: 300 rpm y 1 min, mezcla lenta: 40 rpm y 20 minutos y sedimentación de 20 minutos; siendo las condiciones generales establecidas por la guía.

Con los dos coagulantes se obtuvo un tipo de sedimentación floculada, por la cual se efectúa la remoción de los sólidos en suspensión en un fluido por la fuerza de la gravedad.

### Dosis óptima de los coagulantes en el escenario A

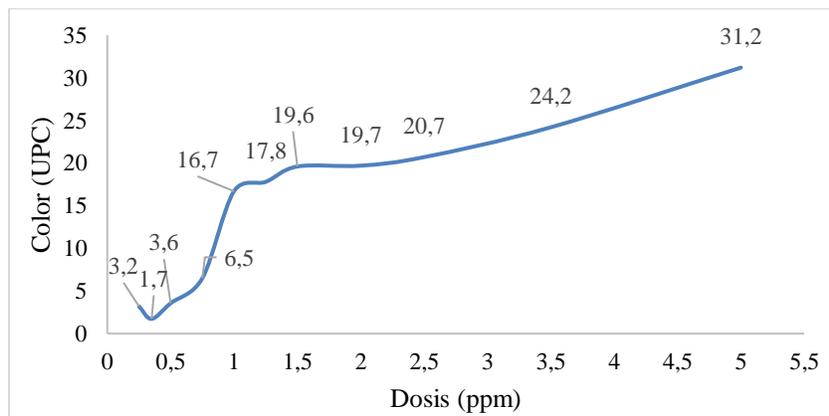
**Policloruro de aluminio (PAC).** La Figura 1, muestra los resultados que se obtuvo en la prueba de dosis óptima en la cual la mayor disminución de la turbiedad se alcanzó con una dosis de 0,35 ppm de PAC reduciendo la turbiedad de 30,8 NTU a 0,9 NTU cumpliendo así con la normatividad colombiana de agua potable, por lo cual se escogió esta dosis de coagulante sintético como la dosificación óptima de PAC para realizar las posteriores pruebas de jarras.



**Figura 1.** Dosis de PAC Vs. Resultados de turbiedad – Escenario A.

Cárdenas (2000) menciona “la cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación”. Según Shen y Dempsey (1998), si la dosis de coagulante se adiciona por debajo de la cantidad requerida, no se neutralizan totalmente las cargas de las partículas, la formación de microflocs es escasa y la turbiedad del agua tratada es elevada. Por el contrario si la dosis es exagerada, según Díaz (2014) “se produce la inversión de las cargas de las partículas, conduciendo a la formación de gran cantidad de microflocs con tamaños muy pequeños y cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas”.

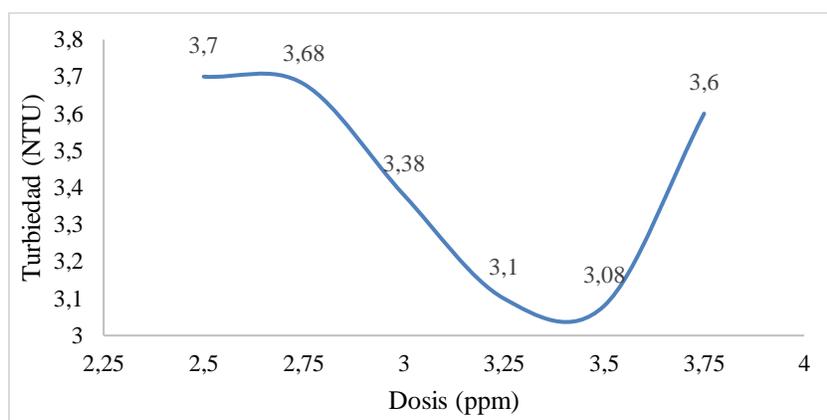
En cuanto al parámetro de color (Figura 2), la dosis que obtuvo mejores resultados fue la de 0,35 ppm, obteniendo el mayor porcentaje de remoción tanto en turbiedad como en color cumpliendo con los parámetros permisibles de agua apta para consumo humano.



**Figura 2.** Dosis de PAC Vs. Resultados de color - Escenario A.

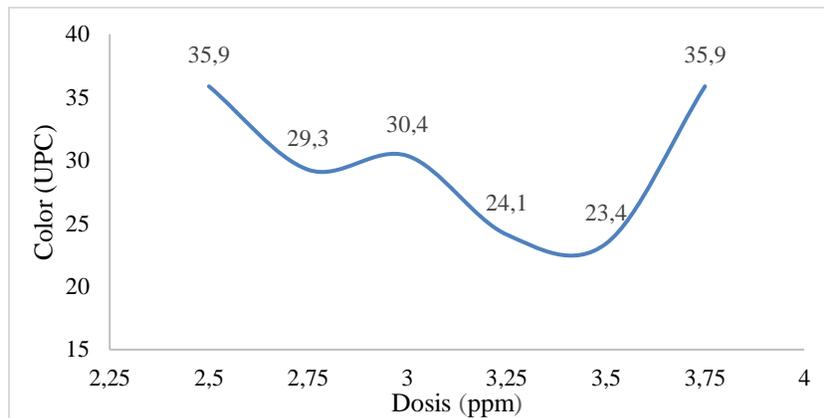
**Opuntia ficus indica.** Para el caso del coagulante natural, se realizaron ensayos de prueba y error para determinar un rango para la evaluación del coagulante. Las dosificaciones que se evaluaron fueron de 2,5 a 3,5 ppm cada 0,25 ppm.

En la Figura 3, se observa que la dosis de 3,5 ppm presento mayor resultado en la remoción de turbiedad obteniendo un valor de 3,08 NTU equivalente al 89,8% de remoción. Por lo anterior, se definió a la concentración de 3,5 ppm como la dosis óptima de coagulante natural en la remoción de turbiedad.



**Figura 3.** Dosis de *Opuntia ficus indica* Vs. Resultados de turbiedad - Escenario A.

De igual manera que en turbiedad, la dosis de 3,5 ppm mostrada en la Figura 4, presento el mejor resultado reduciendo el color a 23,4 UPC equivalente a 92,3 % de remoción de color, consolidándose como la dosis óptima para este tipo de agua. A pesar de ser un porcentaje de remoción que supera el 90%, el resultado en UPC no cumplió con los parámetros permisibles que exige la legislación colombiana.

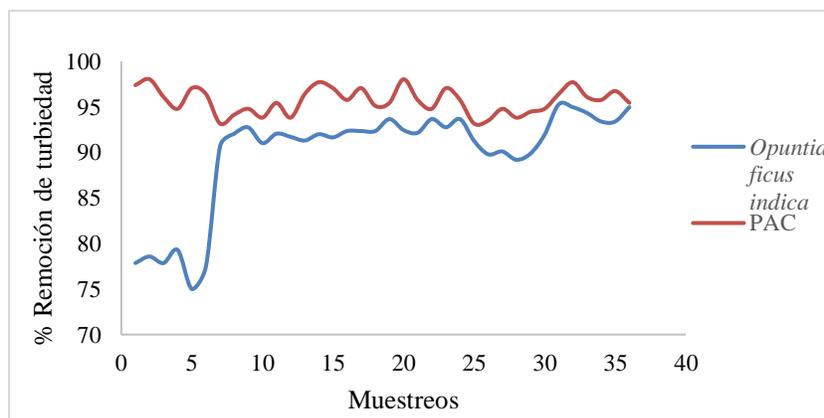


**Figura 4.** Dosis de *Opuntia ficus indica* Vs. Resultados de color - Escenario A.

### Eficiencia de los coagulantes en el escenario A

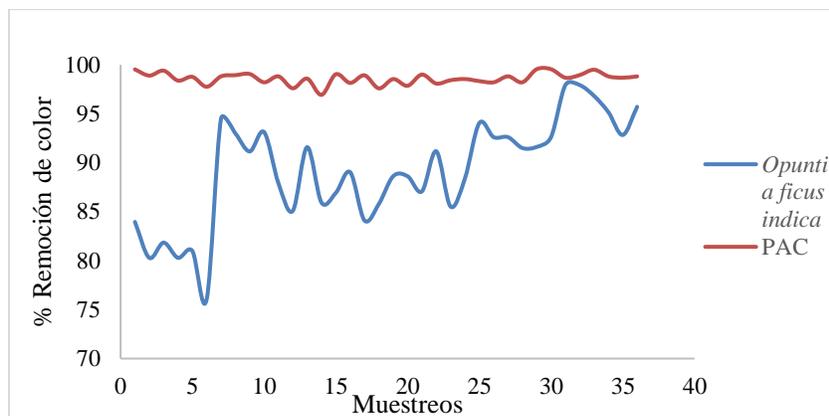
Después de haber decretado los parámetros de dosis óptima, mezcla rápida, mezcla lenta y tiempo de sedimentación, se procedió a realizar las pruebas de jarras para obtener los 36 datos necesarios para obtener un nivel de confianza del estudio del 95%.

Se observa en la Figura 5, que el coagulante sintético PAC, obtuvo mejores porcentajes de remoción de turbiedad con 95,7 % con respecto a la turbiedad inicial, ninguna inferior a 93%. Cabe resaltar que tan solo 2 de los 36 muestreos no cumplió con el valor permisible del parámetro de turbiedad según lo establecido en la Resolución 2115 de 2007.



**Figura 5.** Porcentaje de remoción de turbiedad de los coagulantes en el escenario A.

Por otro lado, el coagulante natural de *Opuntia ficus indica* género resultados inferiores a los arrojados por el coagulante químico. De igual manera, se obtuvo como valor promedio el 89,9% de remoción de turbiedad, como punto más bajo el 75% y como punto más alto el 95,3% de remoción. Lo anterior indica que el extracto de *Opuntia ficus indica* representa una alternativa como coagulante para la clarificación de agua.

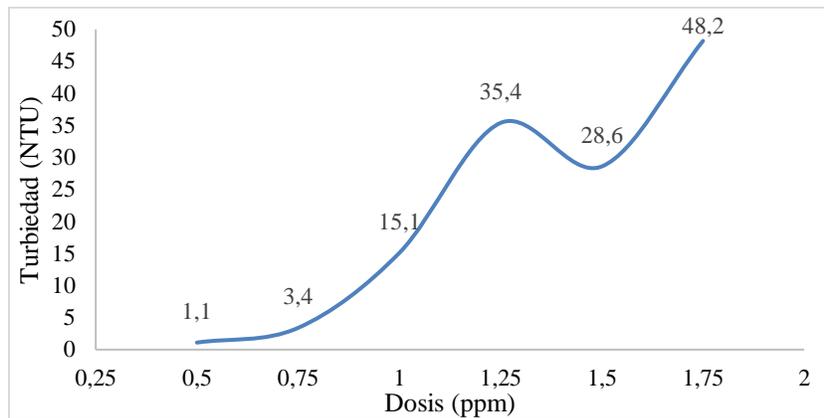


**Figura 6.** Porcentaje de remoción de color de los coagulantes en el escenario A

La Figura 6, muestra que, en el parámetro de color, el PAC obtuvo excelentes resultados con un promedio de remoción de color del 98,6%. Todos los muestreos realizados no superaron los parámetros permisibles por la normatividad. El coagulante natural, presentó un promedio de remoción de color del 89,2% cumpliendo en 5 de los 36 muestreos con los valores permisibles según la Resolución 2115 de 2007 (Ministerio de Protección Social & MAVDT, 2007), demostrando un comportamiento aceptable.

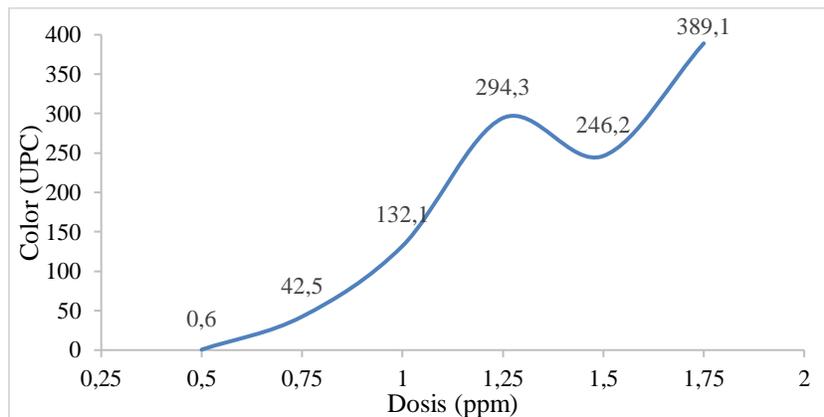
### Dosis óptima de los coagulantes en el escenario B

**Policloruro de aluminio (PAC).** La dosis Óptima del coagulante tradicional PAC resultó la mínima siendo esta de 0,5 ppm, obteniendo resultados de turbiedad y color residual de 1,1 NTU Y 1 UPC respectivamente, que equivalen a porcentajes de remoción de 99,3% en el parámetro de turbiedad y 99,9% en el parámetro de color como se muestra en las Figuras 7 y 8.



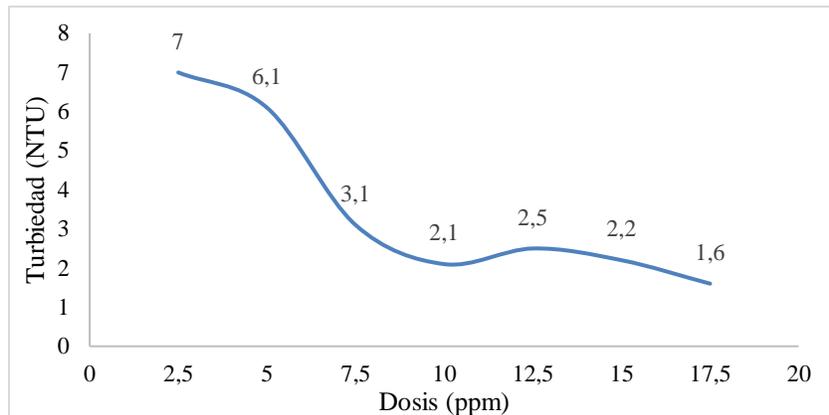
**Figuras 7.** Dosis de PAC Vs. Resultados de turbiedad obtenidos - Escenario B.

El Comportamiento de la dosis óptima del PAC en este escenario es contraria a la del coagulante natural, se evidenció que al aumentar la dosis del coagulante tradicional, aumentó los parámetros de turbiedad (Figura 7) y color (Figura 8), generando menor porcentaje de remoción y afectando las condiciones iniciales del agua.



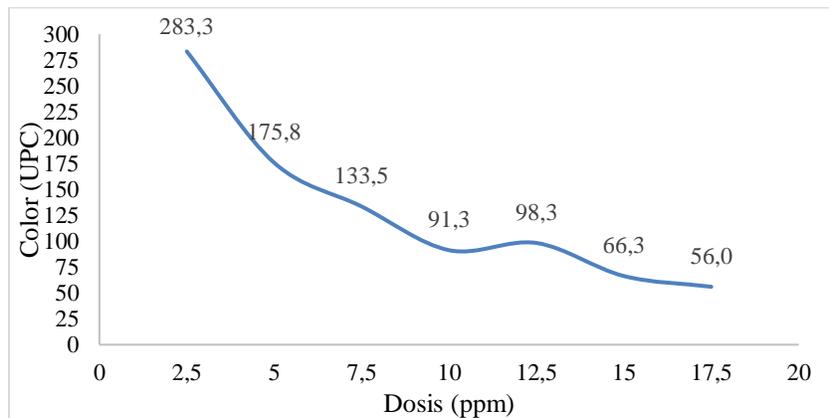
**Figuras 8.** Dosis de PAC Vs. Resultados de color obtenidos - Escenario B.

**Opuntia ficus indica.** En la Figura 9, se observa la dosis óptima del coagulante natural, donde la concentración más baja del coagulante que remueve la mayor cantidad de turbiedad y que obtuvo el menor valor residual fue de 10 ppm, considerada como la concentración óptima, con la cual se obtuvo un valor de 2,1 NTU y lo que representó un porcentaje de remoción de 98,7% de turbiedad.



**Figuras 9.** Dosis de *Opuntia ficus indica* Vs. Resultados de turbiedad - Escenario B.

En la Figura 10, se muestra como la dosis óptima elegida en turbiedad demuestra un buen comportamiento en la disminución de color, obteniendo un valor de 91,32 UPC, lo que significó 91,1% de remoción.

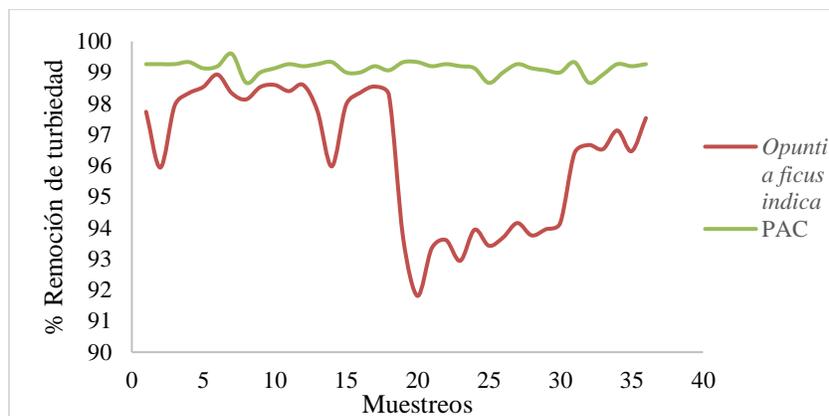


**Figura 10.** Dosis de *Opuntia ficus indica* Vs. Resultados de color - Escenario B.

A pesar de que dosis superiores a 10 ppm presentaron mejores resultados en la remoción de turbiedad y color, se eligió a esta dosis (10 ppm) como la ideal para el proceso de coagulación, debido a que según Nuñez (2014), al aumentar la dosis se da una supersaturación y se produce una rápida precipitación de los coagulantes que por efecto de barrido arrastran en su descenso las partículas coloidales, lo cual generaría mayores costos debido a la gran cantidad de coagulante utilizado.

### Eficiencia de los coagulantes en el escenario B

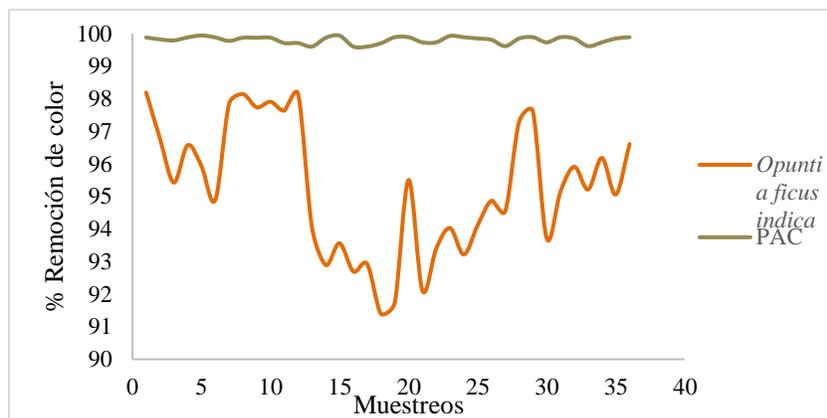
En la Figura 11 y 12, se muestra el comportamiento de los parámetros evaluados en los 36 datos registrados para este escenario, el porcentaje de remoción del parámetro de turbiedad (Figura 11) y el porcentaje de remoción del parámetro de color (Figura 12) de los coagulantes evaluados.



**Figuras 11.** Porcentaje de Remoción de turbiedad de los coagulantes en el escenario B.

En la Figura 11, se evidenció que el comportamiento del PAC es constante en la remoción del parámetro de turbiedad en este escenario, obteniendo porcentajes de remoción de 99,3% a 99,9% en Turbiedad y de 99,6% a 99,9%, siendo muy efectivo y obteniendo valores entre 1 y 2 UNT a lo largo de los 36 datos obtenidos. Por otro lado, el comportamiento del coagulante natural en el porcentaje de remoción de turbiedad, indica que es inestable, a pesar de ello la remoción se encuentra en rangos entre 91% a 99% esto puede deberse a la utilización de cladodios en diferentes estados de madurez.

La Figura 12, establece el comportamiento del color residual de los coagulantes estudiados en este escenario, rectificando la estabilidad del PAC frente al coagulante de *Opuntia ficus indica*, obteniendo valores de 0,9 UPC a 1,6 UPC que representó porcentajes de remoción superiores a 99,6%, contrario a los resultados obtenidos por el coagulante natural, obteniendo valores de 94,6 UPC a 19 UPC para un porcentaje de 91,4% y 98,6% respectivamente.



**Figuras 12.** Porcentaje de remoción de color de los coagulantes en el escenario B.

### Análisis estadístico

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05 en las pruebas ANOVA realizadas, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de trabajo de que existen diferencias significativas entre los resultados de remoción de turbiedad y color utilizando el coagulante proveniente del extracto de *Opuntia ficus indica* en los escenarios A y B.

### Discusión

Después de conocer los resultados obtenidos, se observó que el PAC tiene una buena remoción de turbiedad, como lo confirma Cerón (2016), el buen desempeño del PAC se debe gracias a que es una sal inorgánica de aluminio multinuclear capaz de formar con mayor rapidez y perfección flocs con mayor velocidad de sedimentación y poder clarificante, logrando remociones más altas de turbiedad respecto a otras sales de aluminio. Igualmente, como menciona Flórez (2011), el PAC contiene una gama de especies hidrolíticas de Al (III) preformadas de calidad superior y poseen una estructura que es bastante estable ante hidrólisis posteriores, que contribuye a su mayor eficiencia de coagulación.

Por otra parte Matsuhiro *et al.* (2005), señalaron que el mucílago de *Opuntia ficus indica* es una mezcla compleja de polisacáridos, cuatro son los monosacáridos presentes; arabinosa, galactosa, xilosa y ramnosa y uno es un ácido urónico conocido como ácido galacturónico, el cual llega a representar hasta un 23.4 % del total de los azúcares presentes citado por

(Martínez, 2010). A la par Abraján (2008), establece que el mucílago es un componente con importancia fisiológica. Este compuesto se presenta tanto en los cladodios como en la piel y pulpa de la fruta, aunque en muy diversas proporciones. Por lo anteriormente mencionado se puede suponer que estos son los componentes que le brindan al mucilago la propiedad de remoción actuando como un coagulante natural, evidenciándose en los porcentajes de remoción de los parámetros durante este estudio.

Almendárez De Quezada (2004) y ChunYang (2010), adjudican la propiedad coagulante del *Opuntia ficus indica* al ácido galacturónico, resaltando sus ventajas sobre los sintéticos por su baja o nula toxicidad. Al final, concluyeron que en su mayoría los coagulantes naturales funcionan mediante un mecanismo de adsorción seguido por la neutralización de cargas. Contreras *et al.* (2015), afirman que el ácido galacturónico predomina en especies vegetales en forma polimérica (ácido poligalacturónico) cuya estructura indica que es aniónico, y la existencia de grupos carboxílicos a lo largo de la cadena implica que puede darse la absorción química entre partículas cargadas suspendidas en el agua y estos grupos funcionales.

Se debe agregar que la proporción de estos monómeros en la molécula varía de acuerdo a diversos factores edáficos en el sitio de cultivo como: variedad, edad, condiciones ambientales y estructura empleada para la extracción (fruto, cáscara, cladodio), entre otros factores (Abraján, 2008; Stintzing y Carle, 2005). Esto pudo afectar el comportamiento del coagulante natural en el presente estudio, ya que no se tuvieron en cuenta en la recolección del material vegetal y al momento de preparación del coagulante.

Mediante esta investigación se logró demostrar que al emplear el coagulante natural se logró remover hasta un 75% de turbiedad y en cuanto a color 76,1% para el escenario A y porcentajes de remoción superiores al 91% para el escenario B en ambos parámetros, sin haber simulado la fase de filtración del proceso de clarificación del agua. La filtración ayudaría a mejorar la remoción del material suspendido en el agua y posiblemente a cumplir con el valor máximo permisible de dichos parámetros propuesto por la legislación colombiana.

## **pH y alcalinidad**

Teniendo en cuenta que el pH influye directamente en el proceso de clarificación del agua, porque permite determinar las condiciones óptimas para lograr la formación de flocs capaces de precipitarse (Verbel *et al.*, 2013), mediante la investigación se determinó que al usar extracto de *Opuntia ficus indica* el pH y alcalinidad no presentaron grandes cambios, puesto que el mucílago obtenido presentó un pH ligeramente ácido (6,6) y en los resultados de la prueba de jarras el agua tratada no presentó cambios significativos en este parámetro.

Los valores de pH después del tratamiento con PAC muestran una ligera disminución, el cambio que ocurre se aproxima a la reducción de dos unidades en cada prueba, debido a que la dosis de coagulante usada es pequeña. Además, cabe resaltar que se realizaron correcciones de alcalinidad para los dos escenarios del PAC, agregando una solución de cal comercial al 2% de concentración, lo cual generaba en el agua cruda sintética un aumento considerable de la alcalinidad y por consiguiente también cambio el pH de ligeramente ácido a básico.

La adición de Cal se realizó ya que la alcalinidad original del agua era baja y en la coagulación química del agua, las sustancias usadas como coagulantes reaccionan para formar precipitados hidróxidos insolubles, los iones  $H^+$  originados reaccionan con la alcalinidad del agua y, por tanto, la alcalinidad actúa como buffer del agua en un intervalo de pH en el que el coagulante puede ser efectivo. Por consiguiente, para que ocurra una coagulación completa y efectiva es necesario un exceso de alcalinidad (Murillo, 2011).

## CONCLUSIONES

De manera general el coagulante natural extraído de los cladodios de *Opuntia ficus indica* es eficiente en el tratamiento primario en la potabilización de agua cruda sintética, destacando su mayor eficiencia en la remoción del parámetro de turbiedad, obteniendo en ocasiones resultados que cumplieron con la normatividad colombiana (2 NTU).

El coagulante de extracto de *Opuntia ficus indica* tiene un alto rendimiento en la remoción de turbiedad sin realizar cambios bruscos en el pH del agua cruda sintética, lo cual indica una clara ventaja del coagulante natural sobre los químicos, debido a que no se requiere realizar

ajustes de pH antes o después del proceso de coagulación, originando un proceso más sencillo.

El uso de coagulantes vegetales como complemento de las tecnologías para tratamiento de agua que va a ser sometida a potabilización, representa una oportunidad de investigación e innovación, pues soporta gran parte del desarrollo de la región, además de contribuir a la sostenibilidad generando nuevos valores agregados para las materias primas locales.

El uso del coagulante natural representa un costo superior de 5 veces más que el uso del PAC, puesto que se realiza en condiciones de laboratorio con valores de cantidades de insumos mínimos y alquiler de equipos, por esto se debe tener en cuenta que al realizarse un proceso industrializado su valor de producción decrecerá significativamente mostrando un margen de comparación mucho menor que pondría en ventaja a esta alternativa de coagulante.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraján, M. 2008. Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago del nopal (*Opuntia ficus indica*) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible, Universidad Politécnica De Valencia, Departamento de tecnología de alimentos. 244p.
- Aceves, T. 1991. Variación en la morfología del Xilema en Morfoespecies silvestres y cultivadas de Nopal (*Opuntia spp.*) Tunero. Universidad de Guadalajara. Jalisco. México. 69p.
- 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.
- Araujo, E.; Granja, J. 2013. Situación actual del servicio de agua y saneamiento básico y su incidencia en la situación social y económica del sector de los puentes comuna 3 del municipio de San Andrés de Tumaco. Tesis de Grado para optar el título de economista, Universidad de Nariño. 109p.

- Bolaños, V. 2014. Protocolo para el funcionamiento, control y operación del nuevo equipo de pruebas de jarras del laboratorio de hidráulica y saneamiento, Universidad de Nariño. Pasto. Colombia. 166p.
- Cárdenas, Y. 2000. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico. Tratamiento de agua: coagulación y floculación. Lima. Perú. 17p.
- 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 E.SP. Universidad de Nariño. Facultad de ciencias exactas y naturales. 114p.
- Contreras, K.; Mendoza, Y.; Salcedo, G.; Olivero, R.; Mendoza G. 2015. El Nopal (*Opuntia ficus indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua, *Revista Producción+ Limpia*. 10(1), 40-50.
- Chun-Yang Y. 2010. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*. 45(9), 1437-1444.
- Díaz, J. 2014. Coagulantes – Floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chátara, para el tratamiento de aguas contaminadas, Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazán, San Pedro Sula Cortés. 159p.
- EMPOPASTO S. A. E. S. P. – Empresa de Obras Sanitarias Sociedad Anónima. Empresa de Servicios Públicos. 2015. Selección de la propuesta más favorable para vincular a un socio operador especializado para la constitución de una nueva empresa de servicios públicos mixta que tendrá a su cargo la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado de la ciudad de Pasto (Nariño). San Juan de Pasto. Anexo Técnico. Pasto: EMPOPASTO. 53p.
- EMPOPASTO S. A. E. S. P. Empresa de Obras Sanitarias Sociedad Anónima. Empresa de Servicios Públicos. 2017. Caracterización fuentes de abastecimiento laboratorio de aguas EMPOPASTO de las quebradas Chapal y Mijtayo del Municipio de Pasto. Pasto: EMPOPASTO

- Fernández, A. 2012. El agua: Un recurso esencial. *Revista Química Viva*. 11 (3):147 -170.
- Flórez, J. 2011. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxicloruro de aluminio. *Dyna*, 78(165), 18-27.
- Hernández, L.; Chamizo, H.; Mora, D. 2011. Calidad del agua para consumo humano y salud: dos estudios de caso en Costa Rica. *Revista Costarr Salud Pública*. 20 (1): 21-26.
- Hernández, R. 2014. Metodología de la investigación. Sexta edición. México: McGRAW-HILL / Interamericana Editores, S.A. DE C.V. 634 p.
- Herrera, M. 2015. Evaluación Del Almidón De Papa Como Floculante Para El Tratamiento De Aguas Residuales Domesticas, @ *limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria* (2), 145–153.
- Lasso, A. 2013. Plan estratégico importador de productos químicos para la empresa de obras sanitarias de Pasto EMPOPASTO S.A. E.S.P. Trabajo de grado para optar el título de Comercio Internacional y Mercadeo. Universidad de Nariño. 155p.
- Martínez, F. 2010. Secado por aspersion de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y su efecto en las propiedades reológicas de los polvos reconstituídos. Trabajo de grado para optar por el título de magister en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de los Recursos Naturales. Instituto Politécnico Nacional. 102p.
- Ministerio de Protección Social & MAVDT - Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2007. Resolución número 2115 del 22 de junio de 2007. Capitulo II, Artículo 2. Colombia.
- Ministerio de Salud y Protección Social. 2018. Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano. Bogotá D.C. p. 392

- Murillo, D. 2011. Análisis de la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada. Trabajo de grado para optar por el título de químico industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. 27p.
- Núñez, C. 2014. Recuperación de sólidos del agua de cola por coagulación-floculación y cuantificación de histamina, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, p 44.
- Pacheco, V. 2005. Manual IV: Operación, mantenimiento y control de calidad. Lima: CEPIS. (OPS/CEPIS/PUB/05.113.).
- Shen, Y. H.; Dempsey, B. A. 1998. Synthesis and speciation of polyaluminum chloride for water treatment. *Environment International*, 24(8), 899-910.
- Stintzing, F; Carle, R. 2005. Cactus stems (*Opuntia spp.*): A review on their chemistry, technology, and uses. *Mol. Nutr. Food Res.* 49: 1p 75-194.
- Tejero, I.; Suárez, J.; Jácome, A.; Temprano, J. 2009. Tratamiento de Aguas - Grado en Ingeniería de Obras Públicas, Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad de la Coruña. España. p11.
- Trujillo, D.; Duque, L.; Arcila, J.; Rincón, A.; Pacheco, S.; Herrera, O. 2014. Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Revista Ion*, 27(1), 17-34.
- UNICEF - United Nations Children's Fund. 2016. Libro: La infancia, el agua y el saneamiento básico en los planes de desarrollo departamentales y municipales. Capítulo III: El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo Primera edición. Bogotá D.C.: UNICEF. 26p.
- Vargas, L. 2004. Tratamiento de agua para consumo humano, pp. 105 – 150. En: Procesos unitarios y plantas de tratamiento. Lima, Perú: El CEPIS/OPS es una agencia especializada de la Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS). 124p.

Vázquez, R. & Montoya, V. 2004. Riesgos a la salud por presencia del aluminio en el agua potable. *Conciencia Tecnológica*, (25).

Verbel, R.; Martínez, I.; Gazabón, L. 2013. Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus indica*. *Producción+ Limpia*, 8(1).