



# El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua\*

Karen Paola Contreras Lozano\*\*, Yelitza Aguas Mendoza, Jairo\*\*\*, Guadalupe Salcedo Mendoza\*\*\*\*, Rafael Olivero Verbel\*\*\*\*\*, Gean Pablo Mendoza Ortega \*\*\*\*\*

***Nopal (*Opuntia ficus-indica*) as a complementary natural coagulant to clarify water***

***O Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementarío na clarificação da água***

## RESUMEN

**Introducción.** La clarificación es un proceso preliminar en la potabilización del agua, que consiste en la aplicación de un coagulante que agrupe las partículas en suspensión haciéndolas flocular, para luego separarlas por filtración. Se buscan opciones limpias y económicas de origen vegetal para sustituir los coagulantes primarios que son compuestos inorgánicos. **Objetivo.** Evaluar la eficiencia del mucilago extraído del Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como

---

\* Artículo derivado del proyecto de investigación "Determinación de la eficiencia del nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario a un coagulante primario en la clarificación de agua", en el marco de la Beca-Pasantía Jóvenes Investigadores e Innovadores 2012 de COLCIENCIAS-Universidad de Sucre (Grupo de Investigación Procesos Agroindustriales y Desarrollo Sostenible, PADES). Realizado entre Mayo de 2013 a Junio de 2014, en Sincelejo, Sucre (Colombia) | Ingeniera Agroindustrial, Joven Investigador, Universidad de Sucre. \*\* Ingeniera Agroindustrial, Joven Investigador, Universidad de Sucre. \*\*\* Magister Gestión y auditorías ambientales, Docente Universidad de Sucre. \*\*\*\* Doctor en Ingeniería Química, Líder grupo PADES - Docente Universidad de Sucre. \*\*\*\*\* Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Docente Universidad del Atlántico. \*\*\*\*\* Estudiante de Ingeniería Agroindustrial - Universidad de Sucre.

coagulante natural complementario al sulfato de aluminio, en el proceso de clarificación de agua proveniente del Río Magdalena. **Materiales y métodos.** La clarificación se realizó mediante la Prueba de jarras, teniendo en cuenta factores como concentración y proporción de los coagulantes, pH y Velocidad de agitación; para evaluar la turbidez (NTU), color (UPC), sólidos totales disueltos (mg/L), pH y conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en el agua tratada. **Resultados.** Aplicando una cantidad máxima de 20 % de mucilago de nopal en la proporción de coagulantes y una velocidad de agitación de 200 rpm, se reduce la turbidez del agua hasta valores inferiores a 2 NTU, alcanzando eficiencias superiores al 50 % en la remoción de turbidez, siendo las más efectivas entre 96-98 %. Se logró reducir totalmente el color hasta 0 UPC, y el contenido de STD hasta valores menores a 200mg/L. El coagulante natural no afectó notablemente el pH del agua tratada y la conductividad aumentó en algunos tratamientos posiblemente a causa del coagulante primario. **Conclusión.** El mucilago de nopal como coagulante complementario al sulfato de aluminio mostró efectividad en la clarificación del agua.

**Palabras clave:** mucilago de *Opuntia*, clarificación, coagulante, turbidez.

## ABSTRACT

**Introduction.** Clarification is a process performed before purifying water, and consists in applying a coagulant that groups the suspended particles and makes them flocculate. They are, then, separated by means of filtration. Vegetables are being explored as a clean and inexpensive option to replace the primary coagulants, which are inorganic compounds. **Objective.** Evaluate the efficiency of the mucilage extracted from the nopal (*Opuntia ficus-indica*) as a natural coagulant that complements aluminum sulfate in the clarification of water from the Magdalena river. **Materials and methods.** The clarification process was performed by the use of the jar test, taking into account factors such as the concentration and the proportion of the coagulants, the pH and the agitation speed, in order to evaluate the turbidity (NTU), the color (UPC), the total dissolved solids (mg/L), the pH and the electric conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) in the water treated. **Results.** By applying a maximum quantity of 20 % of nopal mucilage in the proportion of coagulants and an agitation speed of 200 rpm, the turbidity of the water can be reduced to values below 2 NTU, achieving efficiencies above 50 % in the removal of the turbidity. The most effective efficiencies achieved are between 96-98 %. The color was totally reduced to zero UPC and the STD content was reduced to values below 200 mg/L. The natural coagulant did not significantly affect the pH of the water treated and the conductivity increased in some of the treatments, perhaps due to the primary coagulant. **Conclusion.** The mucilage of nopal as a coagulant to complement the aluminum sulfate is effective to clarify water.

**Key words:** opuntia mucilage, clarification, coagulant, turbidity.

## RESUMO

**Introdução.** A clarificação é um processo preliminar no tratamento da água, a qual consiste na aplicação de um coagulante que grupe as partículas em suspensão fazendo-as flocular, para assim separá-las por filtração. Buscam-se opções limpas e econômicas de origem vegetal para substituir os coagulantes primários os quais são compostos inorgânicos. **Objetivo.** Avaliar a eficiência da mucilagem extraído do Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementar ao sulfato de alumínio, no processo de clarificação da água proveniente do Rio Magdalena. **Materiais e Métodos.** A clarificação se fez mediante a Prova de jarras, tendo em conta fatores como concentração e proporção dos coagulantes, pH e Velocidade de agitação; para avaliar a turbidez (NTU), cor (UPC), sólidos totais dissolvidos (mg/L), pH e condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) na água tratada. **Resultados.** Aplicando uma quantidade máxima de 20 % de mucilagem de nopal na proporção de coagulantes e uma velocidade de agitação de 200 rpm, se reduz a turbidez da água até valores inferiores a 2 NTU, alcançando eficiências superiores ao 50 % na remoção de turbidez, sendo as mais efetivas entre 96-98 %. Logrou-se reduzir totalmente a cor até 0 UPC, e o conteúdo de STD até valores menores a 200 mg/L. O coagulante natural não afetou notavelmente o pH da água tratada e a condutividade aumentou em alguns tratamentos possivelmente

por causa do coagulante primário. **Conclusão.** A mucilagem de nopal como coagulante complementar ao sulfato de alumínio mostrou efetividade na clarificação da água.

**Palavras chave.** mucilagem de Opuntia, clarificação, coagulante, turbidez.

## INTRODUCCIÓN

La clarificación es un proceso preliminar en la potabilización del agua, que consiste en la aplicación de un coagulante que agrupe las partículas coloidales en suspensión, causantes de la turbidez y color, debido a la interacción entre sus cargas eléctricas opuestas. Esta agrupación permite que se formen partículas de mayor tamaño (flóculos) que puedan sedimentar, para luego separarlas por filtración (Guardián y Coto, 2011, 19).

La turbidez, expresada en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez), es el resultado de la presencia de una variedad de partículas, como sedimentos suspendidos, partículas inorgánicas o fuentes biológicas (Andrew, 2006, 3). La turbidez a 5 NTU es a menudo considerada como un rango seguro, pero la normativa colombiana establece un valor máximo de 2 NTU (Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

Los coagulantes primarios están basados en compuestos inorgánicos convencionales de aluminio o hierro, como el sulfato de aluminio, aluminato de sodio, sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico. La mayoría son sales ácidas que disminuyen el pH del agua por lo que, dependiendo del agua a tratar, es necesario agregar un álcali como cal o soda cáustica (Cogollo, 2011, 20). Además, estos productos químicos en ocasiones son costosos o pueden tener efectos adversos sobre la salud y el medio ambiente.

Desde hace algún tiempo se ha buscado sustituir los coagulantes primarios con opciones limpias y económicas, algunas de ellas de origen vegetal. Los coagulantes naturales son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal, que actúan de forma similar a los coagulantes sintéticos en el proceso de clarificación del agua cruda (Vargas y Romero, 2006, 40). Algunos, procedentes de plantas, poseen además propiedades antimicrobianas y han mostrado su eficacia como un floculantes de microorganismos en suspensión incluyendo *Bacillus cereus*, *Escherichia coli* y *Bacillus anthracis*, y hasta en la remoción de metales pesados (Buttice, 2012, 153; Fox, 2012, 4553). Sus principales ventajas radican en su rentabilidad, la baja probabilidad de conferir pH extremo al agua tratada y que son altamente biodegradables (Chung-Yang, 2010, 1438). Diversos estudios se han desarrollado en la aplicación de estos coagulantes para el tratamiento de las aguas superficiales turbias con valores aproximados que van de 50 a 500 NTU. Todos estos con eficiencias en remoción de turbidez de hasta 99 %, comparables a los coagulantes químicos primarios como el sulfato de aluminio. Las dosificaciones óptimas son generalmente dentro del intervalo de 10 a 60 mg/L y son más eficaces en aguas básicas con valores óptimos pH alrededor de 7 a 10 (Chaudhari, Mandloi y Folkard, 2004, 482-488; Pritchard, Mkandawire, Edmondson, O'Neill y Kululanga, 2009, 801-805). Entre estos se encuentran coagulantes naturales extraídos de *Moringa oleífera* (frijol común), gomas naturales, *Cactus latifaria*, semillas de *Prosopis juliflora* y especies de cactus del género *Opuntia* (Muthuraman y Sasikala, 2014, 1727).

La familia de cactus del género *Opuntia* ha sido conocida por su gran producción de mucílago, un complejo utilizado por el cactus para almacenar agua. Estudios han establecido que contiene carbohidratos tales como L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-xilosa y ácido galacturónico. (Goycoolea y Cárdenas, 2003, 18-22; Trachtenberg y Mayer, 1981, 2665-2668). Este complejo viscoso de hidratos de carbono se ha estudiado ampliamente como floculante natural aunque no se han logrado obtener eficiencias altas para remoción de turbidez hasta valores permitidos en la normatividad.

La *Prueba de Jarras* (“*Jar Test*”) es la técnica más ampliamente usada para determinar la dosis óptima o mejor dosis de coagulantes para procesos de clarificación a nivel de laboratorio. Se realiza en varios frascos con un volumen que puede variar entre 1 y 3 litros de agua, a los cuales son agregadas diferentes dosis de coagulante, mientras se agita rápidamente durante un tiempo corto y luego se procede a una agitación suave entre 10 y 30 min (Rodríguez et al, 2002, 21).

En el presente trabajo de investigación se evaluó la eficiencia de mucilago extraído del Nopal, como coagulante natural en complemento al sulfato de aluminio, en la remoción de turbidez y color de agua cruda proveniente del Río Magdalena; además de su efecto en el contenido de sólidos totales disueltos (STD), pH y conductividad eléctrica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación experimental se desarrolló en los laboratorios de la *Planta piloto de operaciones unitarias* de la universidad de Sucre, ubicada en la granja *Los Pericos* en el municipio de Sampedra (Sucre), y en el *Laboratorio de Calidad Ambiental “Morrosquillo”* de la Corporación Autónoma Regional de Sucre –CARSUCRE–, en el municipio de Sincelejo (Sucre).

Para extracción del coagulante natural (mucilago) se utilizaron pencas de Nopal (*Opuntia ficus-indica*), recolectadas de una zona rural del municipio de Sincelejo y Etanol (96 % v/v) para el proceso de extracción. Como coagulante primario se utilizó Sulfato de aluminio (Alumbre) obtenido de un proveedor local. El agua turbia objeto de estudio para el proceso de clarificación se recolectó del Río Magdalena, a la altura del municipio de Magangué (Bolívar).

**Obtención del coagulante natural.** Se realizó una extracción de hidrocoloides (mucilago) a partir de las pencas de Nopal. Estas fueron seleccionadas, lavadas y cortadas en cubos para facilitar su trituración en licuadora doméstica, añadiendo agua destilada en proporción 1:2 (p/v). A la mezcla obtenida se le realizó un tratamiento térmico en estufa a 50 ° C durante una hora. Finalizada esta operación se procedió a centrifugar la suspensión a 3500 rpm durante 10 minutos. El sedimento fue desechado y al sobrenadante se le adicionó etanol (1:4 v/v), y se dejó reposar durante 24 horas en refrigeración a 5 °C, para precipitar el mucilago. El mucilago precipitado se separó por filtración y se secó en horno a 70 °C hasta un contenido de humedad de máximo 10 % por ciento. El producto obtenido se pulverizó utilizando un mortero (Sáenz et al, 2006, 107).

**Prueba de Jarras y determinación de propiedades fisicoquímicas.** Para evaluar la clarificación de agua mediante prueba de jarras se aplicó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial de 2 x 3 x 2 x 2 donde el primer factor es la concentración de coagulantes aplicados con dos niveles (35 y 40 mg/L), el segundo factor la proporción de coagulantes con tres niveles (10 % opuntia- 90 % alumbre, 20 % opuntia- 80 % alumbre y 50 % opuntia- 50 % alumbre); el tercer factor el pH con 2 niveles (6 y 7), y el cuarto factor la velocidad de agitación con dos niveles (100 y 200 rpm); resultando 24 tratamientos por triplicado, y el control corresponde a la muestra de agua sin tratamiento. Las propiedades fisicoquímicas evaluadas en el agua tratada fueron la Turbidez (NTU), la eficiencia de actividad coagulante (opuntia-alumbre) (%), el color (UPC), pH, sólidos totales disueltos (STD) (mg/L) y conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Se realizó la *Prueba de Jarras* de acuerdo con la norma ASTM No. D2035-80, en un floculador portable VELP® modelo FP4, agregando simultáneamente el coagulante orgánico y el sulfato de aluminio a los recipientes con muestras de agua, que se sometieron a una agitación rápida (velocidad para cada tratamiento) por 1 minuto y posteriormente a una agitación lenta de 30 rpm por 20 minutos, y por último se dejó sedimentar el floculo por 30 minutos (ASTM International, 2008).

Finalmente al sobrenadante de cada jarra sedimentada se le realizaron los análisis para determinar las variables fisicoquímicas mencionadas utilizando las metodologías referidas en el manual de métodos estandarizados APHA-AWWA-WEF (American Public Health Association - American Water Works Association - Water Environment Federation, 2012). La turbidez expresada en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) se determinó con ayuda de un Turbidímetro HACH® 2100P (Patrón de formazina certificado de 100 NTU, con verificación de 99,7 NTU). El análisis de color se realizó mediante un MColorTest® 114421 de Merck®, expresado en Unidades Platino-Cobalto (UPC). El pH se determinó mediante un pH metro WTW-pH315i. Los sólidos totales disueltos (mg/L) se determinaron por el método gravimétrico secando la muestra hasta peso constante a una temperatura de 105°C. La conductividad eléctrica se analizó en un conductímetro WTW® MultiLine 3410 IDS, expresada en microsiemens/cm ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

**Determinación de la eficiencia y análisis estadístico.** Se analizó la clarificación del agua turbia para determinar la dosis óptima de coagulantes considerando los valores de turbidez y color exigidos por las normas Colombianas, sobre los componentes relativos a la calidad del agua potable Resolución 2115 de 2007 y la NTC 813 (Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007; Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2010). La reducción en el valor de la turbiedad respecto del inicial, define la actividad coagulante o eficiencia de los coagulantes de acuerdo con la siguiente ecuación, donde la turbidez residual (RT) corresponde a la turbidez medida en la muestra respectiva (Miller et al, 2008, 4276).

$$\% \text{ Actividad Coagulante} = \frac{\text{RT Control} - \text{RT Muestra}}{\text{RT Control}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1.}$$

El análisis estadístico se realizó con base a un ANOVA multifactorial para determinar si hay diferencias significativas entre los tratamientos, para cada una de las variables respuesta. Se aplicó una prueba de comparación de medias por el método de la Diferencia Significativa Honesta de Tukey (DSH), determinando que tratamientos presentan diferencias significativas y así determinar los que confirieron mejores resultados para cada propiedad fisicoquímica. Los datos obtenidos se manejaron a un nivel de significancia de  $\alpha=0,05$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades fisicoquímicas iniciales del agua turbia empleada en el proceso de clarificación se muestran en la Tabla 1 donde se observa una turbidez aproximada de 97,67 NTU, muy inferior a la encontrada en estudios previos de agua proveniente de la misma fuente, 174 NTU (Casas y Montes, 2011, 30).

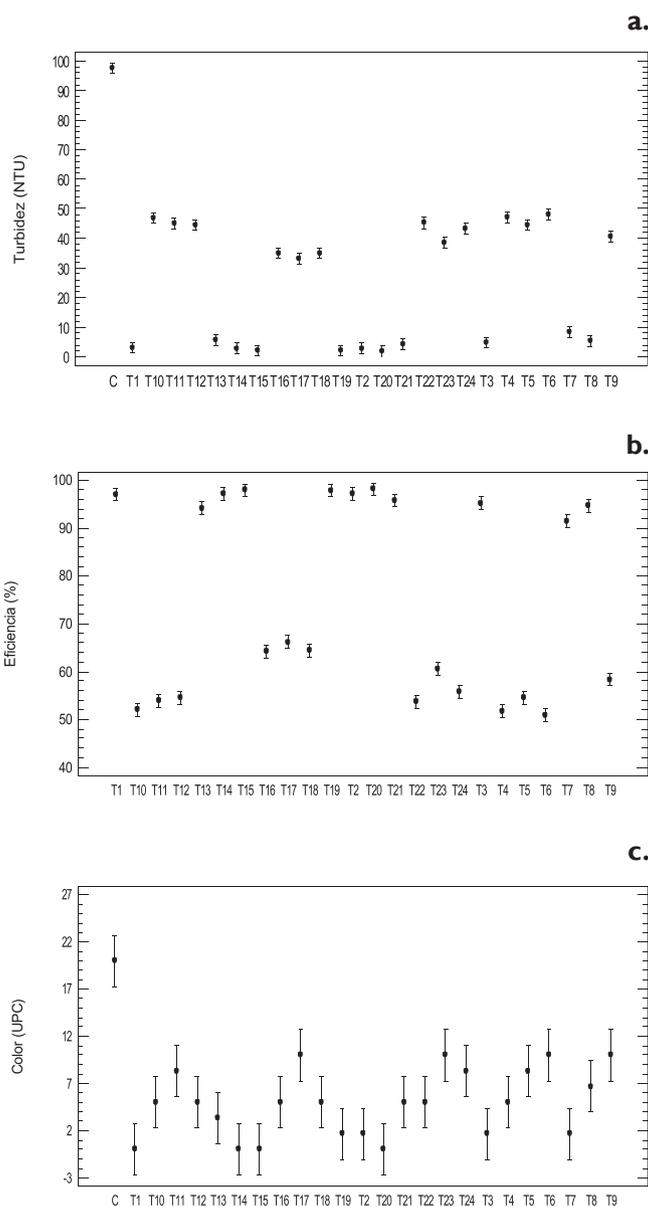
**Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del agua turbia**

Turbidez (NTU)	Color (UPC)	pH	STD (mg/L)	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
97,67 $\pm$ 4,16	20 $\pm$ 1,00	7,11 $\pm$ 0,05	3209,00 $\pm$ 16,34	119,00 $\pm$ 0,97

### Turbidez, color y eficiencia de la actividad coagulante

Los tratamientos tienen un efecto significativo sobre la turbidez del agua ( $p < 0,05$ ). La prueba de rangos múltiples de Tukey permitió identificar 5 grupos homogéneos (Figura 1a). Los tratamientos que otorgaron menores niveles de turbidez, bajo las condiciones estudiadas son el Tratamiento 20 (Concentración de 40 mg/L, 10 % Opuntia – 90% Alumbre, pH 7 y 200 rpm) con una media de 1,78

NTU y el Tratamiento 15 (Concentración de 35 mg/L, 20 % Opuntia – 80 % Alumbre, pH 6 y 200 rpm) con una media de 1,99 NTU; estos no presentaron diferencias significativas. Como se percibe, estos resultados se obtuvieron con las proporciones más bajas del coagulante natural respecto al coagulante primario sulfato de aluminio, y a una mayor velocidad de agitación en el proceso de clarificación. Resultados similares de turbidez lograron Jingdong, Fang, Yuhong, y Yang (2006, 731) aplicando solo opuntia como coagulante natural, reportándose valores inferiores a 5 NTU, mientras que en otras investigaciones con opuntia se obtuvieron valores superiores que no logran superar al sulfato de aluminio que produjo resultados inferiores a 2 NTU (Gonzalez, Marcano, Mendoza y Fuentes, 2009, 368-369; Alméndarez De Quezada, 2004, 52-53; Olivero, Mercado y Montes, 2013, 23-24).



**Figura 1. Medias de tratamientos y Tukey HSD 95 % para turbidez, eficiencia y color**

El principio activo del mucílago de nopal para reducción de turbidez en el agua se ha investigado recientemente. Miller et al. (2008, 4276) han informado que el ácido galacturónico es posiblemente un ingrediente activo que proporciona la capacidad de coagulación de *Opuntia spp*, ya que se ensayó en combinación con otros azúcares presentes en el cactus y mostraron reducciones de turbidez del 50 %, lo que sugiere que la presencia de componentes adicionales en el mucílago del cactus son parcialmente responsables. Estos resultados probablemente se deban a 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 (Manunza, Deiana, Pintore y Gessa, 1997, 85-87).

La eficiencia de la actividad coagulante en el proceso de clarificación se midió con base a la disminución de los valores iniciales de Turbidez. Existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre tratamientos para la eficiencia del proceso de clarificación y se identificaron 7 grupos homogéneos (Figura 1b). Con todos los tratamientos aplicados se logró una eficiencia superior al 50 %. El tratamiento que consiguió una mayor remoción de la Turbidez y por lo tanto una mayor eficiencia, aproximada al 98 %, es el tratamiento 20 con el que se también se obtuvo menor nivel de turbidez en el agua tratada, similarmente a los tratamientos 15 y 19, los cuales no mostraron diferencias y alcanzaron eficiencias superiores al 96 %; estos presentan proporciones bajas de mucílago de nopal entre 10 y 20 % respecto al coagulante primario. Los resultados de eficiencia son superiores a los reportados por Jingdong et al. (2006) que obtuvieron 90 % de eficiencia con el uso del nopal en combinación con cloruro de aluminio y 70 % cuando se aplicó solo el cactus; igualmente a los de Gonzalez et al. (2009) que reportan porcentajes de remoción de turbidez hasta 93,78 % y Torres, Carpinteyro y Vaca (2012) de 65 % aplicando solo opuntia como coagulante, por debajo de resultados obtenidos con coagulantes como cloruro férrico y sulfato de aluminio.

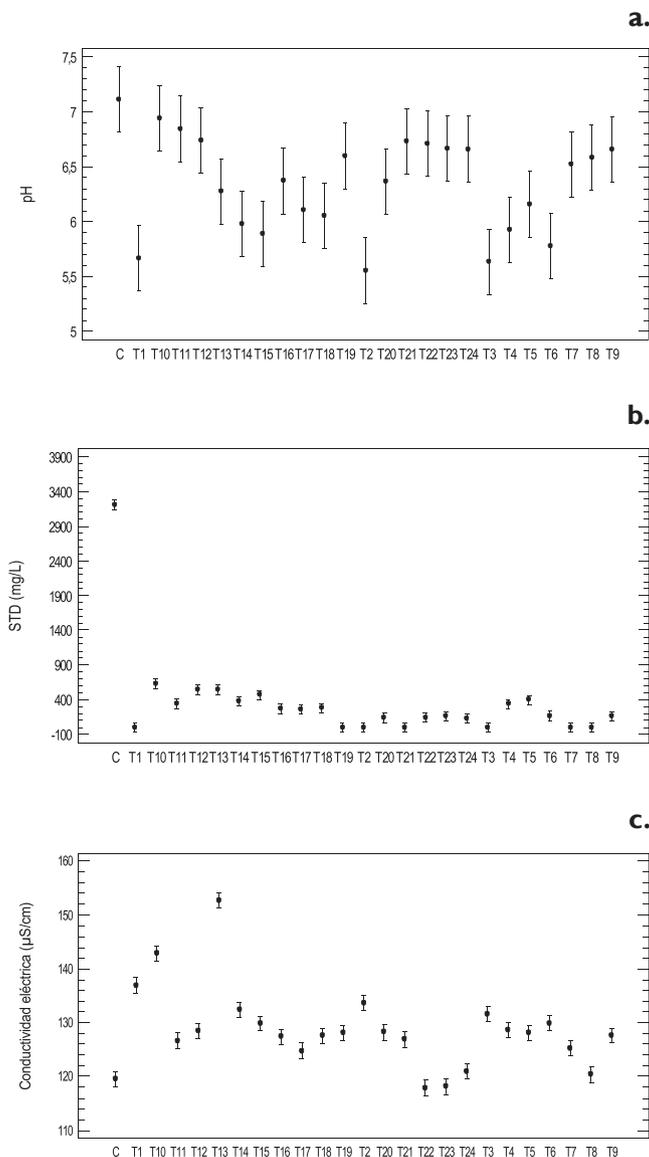
El Color aparente mostró diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ) encontrándose 5 grupos homogéneos (Figura 1c). Los tratamientos que presentaron mejores resultados en la reducción de Color en las muestras de agua turbia son el Tratamiento 20 (Concentración de 40 mg/L, una Proporción de 10 % Opuntia – 90 % Alumbre, pH 7 y 200 rpm), el Tratamiento 15 (Concentración de 35 mg/L, 20 % Opuntia – 80 % Alumbre, pH 6 y 200 rpm), y el Tratamiento 19 (Concentración de 35 mg/L, 10 % Opuntia – 90 % Alumbre, pH de 7 y 200 rpm), los cuales lograron una reducción del color en el agua tratada hasta 0 UPC, confirmando una eficiencia en remoción de color de 100 % de estos tratamientos, que también consiguieron las mayores eficiencias en la eliminación de turbidez, superiores al 96 %. Lo anterior se explica porque el color en agua es el resultado de la presencia de materia orgánica e inorgánica suspendida y organismos microscópicos que son también responsables de la turbidez del agua (Shilpa y Kavita, 2012, 187). Gonzales et al. (2009) han reportado igualmente una remoción de 100 % en el Color del agua aplicando solo nopal como coagulante, contrario a Irma et al. (2013) que obtuvieron con el cactus *Opuntia dillenii* eficiencias de remoción de color aparente muy bajas.

Consecuentemente a los resultados de turbidez final, color y eficiencia en la clarificación, se considera como dosis óptima de coagulantes la aplicada bajo las condiciones del Tratamiento 20, que corresponde a 40mg/L de la mezcla de coagulantes en proporción 10 % nopal – 90 % sulfato de aluminio, para valores de turbidez inicial de agua superficial alrededor de  $97,67 \pm 4,16$  NTU, debido a que este tratamiento presentó mejores resultados en la remoción de turbidez y color en el agua tratada.

### **STD, pH y Conductividad eléctrica**

Los tratamientos tuvieron efecto significativo sobre los sólidos totales disueltos ( $p < 0,05$ ), determinándose 7 grupos homogéneos (Figura 2a). Los que presentaron menores niveles de STD en las

muestras clarificadas fueron el Tratamiento 2 (Concentración de 40 mg/L, 10 % Opuntia – 90 % Alumbre, pH 6 y 100 rpm), el Tratamiento 19 (Concentración de 35 mg/L, 10 % Opuntia – 90 % Alumbre, pH 7 y 200 rpm) y el Tratamiento 8 (Concentración de 40 mg/L, 10 % Opuntia – 90 % Alumbre, pH 7 y 100 rpm), que lograron reducir el contenido de STD hasta en un 100 % respecto al control. Se observa en estos tratamientos una menor proporción del coagulante natural respecto al primario.



**Grafico 2. Medias de tratamientos y Tukey HSD 95 % para pH, STD y Conductividad eléctrica**

La mitad de los tratamientos estudiados dieron resultados de STD inferiores a 200mg/L, con una disminución del contenido de STD en el agua tratada superiores al 94 % respecto a las muestras sin tratamiento. Entre estos se incluyen los tratamientos 20 y 19 que también resultaron los de mayor efi-

ciencia en la remoción de turbidez y color. Los resultados muestran una posible relación entre estas propiedades fisicoquímicas, ya que la turbidez es el resultado de una variedad de partículas disueltas, incluyendo los sedimentos suspendidos, partículas inorgánicas o fuentes biológicas, y los STD indican la presencia de estos materiales que se encuentran en suspensión en el agua.

Los resultados de pH en el agua tratada muestran diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ), con 10 grupos homogéneos (Figura 2b). El resultado deseable es que los tratamientos tengan menor incidencia sobre esta variable, ya que el valor aceptado de pH para agua potable en las normas colombianas es 7 (pH neutro). El agua sin tratamiento presentó un pH ligeramente superior de  $7,11 \pm 0,05$ , mostrando diferencias significativas con el tratamiento que ocasionó menor variación en el pH del agua luego de la clarificación, que fue el Tratamiento 10 (Concentración de 40 mg/L, 20 % Opuntia – 80 % Alumbre, pH 7 y 100 rpm) ya que produjo una disminución leve en el pH de 7 a 6,94. Los demás tratamientos también se presentaron reducciones tenues que no resultaron mayores a 0,7 unidades de pH. Los resultados son similares a los de Villabona et al. (2013) que indican que el coagulante natural adicionado extraído del nopal no altera en gran medida el pH del agua tratada.

Para la conductividad eléctrica se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados ( $p < 0,05$ ) con 11 grupos homogéneos (Figura 2c). Los tratamientos que otorgaron menores niveles de conductividad fueron el Tratamiento 22 (Concentración de 40 mg/L, 20 % Opuntia – 80 % Alumbre, pH 7 y 200 rpm) y el Tratamiento 23 (Concentración de 35 mg/L, 50 % Opuntia – 50 % Alumbre, pH 7 y 200 rpm) con valores de  $117,87 \mu\text{S/cm}$  y  $118,13 \mu\text{S/cm}$  respectivamente, incluso menores que en la muestra control que presentó  $119,47 \mu\text{S/cm}$ . Los demás tratamientos confirieron una conductividad mayor en el agua clarificada que en el agua sin tratamiento; estos tenían proporciones de nopal igual o inferiores al 20 %, lo que podría significar que el coagulante natural no incide directamente en el aumento de esta variable. Sin embargo, el sulfato de aluminio es un coagulante metálico, muy sensible al pH y a la alcalinidad; si el pH no está en un rango adecuado es posible que se solubilice el aluminio, esto incrementa la conductividad eléctrica y la reducción del pH en la muestra (Hernández, Gonzales, Arriaga, Aranda, y Barra, 2013, 2) lo que podría explicar el aumento de la conductividad luego del tratamiento en presencia de este coagulante inorgánico.

## CONCLUSIONES

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

## AGRADECIMIENTOS

Al Departamento administrativo para la ciencia, tecnología e innovación –COLCIENCIAS- y al grupo de investigación *Procesos Agroindustriales y Desarrollo sostenible* –PADES- de la Universidad de Sucre, quienes mediante el programa Jóvenes Investigadores e Innovadores 2012 impulsaron el desarrollo

del presente trabajo investigativo. A la Corporación Autónoma regional de Sucre –CARSUCRE- por su colaboración en la disposición del Laboratorio de Calidad Ambiental “Morrosquillo”.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22a. ed.). Washington, DC: AWWA.
- Andrew Young, K. (2006). The mucilage of *Opuntia ficus indica*: a natural, sustainable, and viable water treatment technology for use in rural Mexico for reducing turbidity and arsenic contamination in drinking water. (Tesis inédita de Maestría). University of South Florida, USA.
- ASTM International. (2008). Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water. D 2035- 08. USA: ASTM.
- Buttice, A. (2012). Aggregation of Sediment and Bacteria with Mucilage from the *Opuntia ficus-indica* Cactus. Tesis Doctoral. University of South Florida, USA.
- Casas, D. y Montes, L. (2011). Determinación de las propiedades del nopal (*Opuntia ficus-indica*) en la clarificación de aguas en dos puntos del río Magdalena (Gambote y Magangué) del departamento de Bolívar. (Tesis inédita de pregrado). Universidad de Sucre, Colombia.
- Chaudhari, S, Mandloi, M. y Folkard, G. (2004) Evaluation of natural coagulants for direct filtration. *Environmental Technology*, 25 (4), 481–489.
- Chung-Yang, Y. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*, 45 (9), 1437–1444.
- Cogollo, J. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxloruro de aluminio. *Dyna*, 78 (165), 18-27.
- Fox, D. I.; Pichler, T.; Yeh, D. y Alcantar, N. (2012). Removing Heavy Metals in Water: The interaction of cactus mucilage and arsenate (As (V)). *Environmental Science and Technology*, 46 (8), 4553-4559.
- Gonzalez, Y.; Marcano, N.; Mendoza, I. y Fuentes, L. (2009). Efectividad de una suspensión de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae) en la clarificación de aguas sintéticas con alta turbidez. *Revista arbitrada venezolana del Núcleo Luz- Costa Oriental del Lago*, 4 (2), 361 – 374.
- Goycoolea, F. y Cárdenas, A. (2003) Pectins from *Opuntia* spp: A Short Review. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 5, 17-29.
- Guardián, R. y Coto, J. (2011). Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la coagulación-floculación de aguas residuales. *Tecnología en Marcha*, 24 (2), 18-26.
- Hernández, I.; Gonzales, R.; Arriaga, M.; Aranda, J. y Barra, G. (2013). Clarificación de agua del arroyo el Hueleque de Poza Rica, Ver, utilizando cal, sulfato de aluminio e hidroxloruro de aluminio. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9 (1), 1-10.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2007). Requisitos fisicoquímicos y microbiológicos del agua potable. NTC 813. 2007-06-20. Bogotá D.C: El instituto.
- Irma, N.; Yéwègnon, A.; Agbangnan, C.; Koudoro, A.; Achille, C.; Pépin, M.; Mama, D. y Codjo, D. (2013). Evaluation of the *Opuntia dillenii* Natural Coagulant in Water Clarification: Case of Treatment of Highly Turbid Surface Water. *Journal of Water Resource and Protection*, 5 (12), 1242-1246.
- Jingdong, Z.; Fang, Z.; Yuhong, L. y Yang, H. (2006). A Preliminary Study on Cactus as Coagulant in Water Treatment. *Process Biochemistry*, 41 (3), 730-733.
- Manunza, B.; Deiana, S.; Pintore, M. y Gessa, C. (1997). Molecular dynamics study of polygalacturonic acid chains in aqueous solution. *Carbohydrate Research*, 300 (1), 85-88.
- Miller, S.; Fugate, E.; Craver, V.; Smith, J. y Zimmerman, J. (2008). Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. As a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environmental Science and Technology*, 42 (12), 4274-4279.
- Ministerio de la Protección Social. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Resolución N° 2115. Bogotá: El Ministerio.
- Muthuraman, G. y Sasikala, S. (2014). Removal of turbidity from drinking water using natural coagulants. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20 (4), 1727-1731.
- Olivero, R.; Mercado, I. y Montes L. (2013). Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus-indica*. *Producción + Limpia*, 8 (1), 19-27.
- Pritchard, M.; Mkandawire, T.; Edmondson, A.; O'Neill, J. G. y Kululanga, G. (2009). Potential of using plant extracts for purification of shallow well water in Malawi. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34 (13), 799-805.
- Rodríguez, S, García, O. y Muñoz, R. (2002). Una solución factible para la clarificación de aguas para consumo humano. *Noticias Técnicas del Laboratorio*. 1, 21-22.
- Sáenz, C.; Berger, H.; Corrales, J.; Galletti L.; García, V.; Higuera, I. (2006). *Utilización agro-industrial del nopal*. (Boletín de servicios agrícolas 162). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Shilpa, A. y Kavita, G. (2012). Evaluation of Cactus and Hyacinth Bean Peels as Natural Coagulants. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*. 3(3), 187-191.
- Torres, L.; Carpinteyro, S. y Vaca, M. (2012). Use of *Prosopis laevigata* seed gum and *Opuntia ficus-indica* mucilage for the treatment of municipal wastewaters by coagulation-flocculation. *Natural Resources*, 3, 35-41.
- Trachtenberg, S. y Mayer, A. (1981). Composition and Properties of *Opuntia ficus indica* Mucilage. *Phytochemistry*, 20 (12), 2665-2668.
- Vargas, M. y Romero, L. (2006). Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 19 (4), 37-41.
- Villabona, A.; Paz, I. y Martínez, J. (2013). Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 5(1), 137-144.