

## Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural

### Characterization of *Opuntia ficus-indica* for using as a natural coagulant

Ángel Villabona Ortiz\*, Isabel Cristina Paz Astudillo\*\*, Jasser Martínez García\*\*\*

#### Resumen

Actualmente municipios de la Costa Atlántica Colombiana no cuentan con suministro de agua potable. La aplicación artesanal de la Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante es una práctica tradicional en comunidades rurales. En esta investigación se realiza la caracterización del tallo de la Tuna que crece de manera silvestre en el departamento de Bolívar, y del polvo extraído de esta planta, con el fin de identificar componentes asociados a su poder coagulante para la remoción de turbidez y de color en aguas crudas. Las pencas de la planta se sometieron a operaciones de corte, pelado, secado, molienda, tamizado y despigmentado para obtener el coagulante. El rendimiento del proceso global fue de 65g de coagulante/Kg de material vegetal. Los resultados indicaron que la penca contiene alto porcentaje de humedad y pequeñas proporciones de saponinas, flavonoides, sales minerales de calcio y hierro; lo cual permitió concluir que estos metabolitos y sales no son los responsables de su poder coagulante debido a las cantidades poco significativas en las que se encuentran. Se consideró que otras especies química tales como el ácido poligalacturónico y compuestos algínicos son realmente los que le confieren la cualidad al biomaterial. También, se evaluó el poder coagulante del material extraído, se analizó el efecto de tres dosis sobre el color, la turbidez y el pH del agua tratada. Los resultados indicaron que tiene la capacidad de remover 50% del color y 70% de turbidez de aguas crudas con alta turbidez inicial, y que no altera significativamente su pH.

**Palabras clave:** aguas crudas, clarificación, flavonoides, saponinas, turbidez.

#### Abstract

Currently, municipalities in the Colombian Atlantic Coast do not have potable water supply. The implementation of the Tuna as a coagulant is a traditional practice in rural communities, but is used in craft way. In the present investigation, the characterization of the stalk of Tuna (*Opuntia ficus-indica*) growing in the wild in the Bolivar department, and of the powder extracted from this plant was realized with the purpose to identify components associated with its coagulant power to remove color and turbidity in raw water. The stalks of this plant were subjected to cutting, peeling, drying, grinding, sieving and depigment for obtaining the coagulant. The overall process yield was 65g of coagulant/kg of vegetal material. The results also indicated that the stalk of Tuna contains high moisture content and low amounts of saponins, flavonoids, minerals, calcium and iron. It allowed concluding that these metabolites and salts are not responsible of the coagulant power of plant due to the insignificant amounts in which they are present. Therefore, it is presumed that other chemical species such as polygalacturonic acid and alginic compounds are those that confer the quality to the biomaterial. Also, the coagulant power of extracted material was evaluated. The effect of three dosis on the color, turbidity and pH of trated water was analyzed.

\* Ingeniero Químico, Esp. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Programa de Ingeniería Química, Universidad de Cartagena, Sede Piedra de Bolívar, Calle 30 No. 48B-152 Ofc. 307., Cartagena de Indias, Colombia. E-mail: avillabonao@unicartagena.edu.co.

\*\* Ingeniera Química, M.Sc., Ph.D. Programa de Ingeniería Química, Universidad de Cartagena, Sede Piedra de Bolívar, Calle 30 No. 48B-152 Ofc. 307, Cartagena de Indias, Colombia. E-mail: ipaza@unicartagena.edu.co.

\*\*\* Ingeniera Química, M.Sc., Ph.D. Programa de Ingeniería Química, Universidad de Cartagena, Sede Piedra de Bolívar, Calle 30 No. 48B-152 Ofc. 307., Cartagena de Indias, Colombia. E-mail: ipaza@unicartagena.edu.co.

The results indicated that it has the capacity to remove 50% of color and 70% of turbidity from crude water with high initial turbidity. Also, it does not affect significantly its pH.

**Key words:** raw water, clarification, flavonoids, saponoids, turbidity.

**Recibido:** octubre 20 de 2012

**Aprobado:** junio 15 de 2013

## Introducción

La coagulación es una etapa crítica del proceso de potabilización del agua, y solo puede conseguirse mediante la adición de un agente coagulante, capaz de neutralizar las cargas electrostáticas de los coloidales suspendidos en el agua, permitiendo su aglomeración hasta formar macropartículas de fácil sedimentación. En la actualidad, los coagulantes más usados son las sales minerales de hierro y aluminio; no obstante, estos compuestos químicos son arrastrados durante la sedimentación de los lodos, lo cual se convierte en un problema ambiental, ya que en altas dosis pueden llegar a ser tóxicos. Además, al ser productos especializados y de alta demanda comercial poseen un precio considerable (Singley, 1986).

Como alternativa a estos agentes químicos, al inicio de los años setenta, en varios países latinoamericanos se propuso utilizar coagulantes naturales extraídos de especies vegetales o animales nativos (Antov *et al.*, 2010; Beltrán-Heredia *et al.*, 2010; Díaz *et al.*, 1999; Patel y Vashi, 2012; Šciban *et al.*, 2009). Los polímeros naturales se producen de manera espontánea, debido a reacciones bioquímicas que ocurren en animales y plantas. Poseen una compleja estructura química, por lo general están constituidos por varios tipos de polisacáridos y proteínas. Algunos de ellos tienen propiedades coagulantes o floculantes y en muchos lugares son utilizados en forma empírica por los nativos para aclarar el agua turbia con muy buenos resultados (Vásquez, 1994). Entre el grupo de sustancias conocidas que poseen estas propiedades aglomerantes se encuentran algunos compuestos orgánicos de origen vegetal, los cuales pueden obtenerse del tallo o las semillas de una enorme variedad de plantas como la moringa oleífera, el frijol, el maíz entre otros. Estos además de presentar una alta efectividad para aguas con una baja turbidez, también presentan buena eficiencia en aguas industriales.

Por estas razones, se considera pertinente buscar fuentes naturales para la producción de coagulantes amigables con el medio ambiente y más accesibles a las economías emergentes de los países en vía de desarrollo. En general, estas no deben afectar la cadena

alimenticia y tener una mínima o nula toxicidad (Rodríguez *et al.*, 2007). Allí radica la importancia de este trabajo, donde se busca obtener un coagulante natural, a partir de la Tuna (*Opuntia ficus indica*) útil para la remoción de la turbidez y el color en aguas crudas.

Entre las principales características de la Tuna, se destaca que son plantas arborescentes, arbustivas o rastrojeras, con forma simple o de matorrales. Poseen un tronco leñoso muy definido, con ramificaciones esparcidas o en forma de copa, con tallos y ramas articuladas (Warner, 1972). Pueden llegar a medir hasta 5 m de alto. Sus partes oblongas llamadas pencas alcanzan los 30 a 50 cm de ancho y 2 cm de espesor, son de color verde opaco. Algunas tienen espinas, cortas, débiles, blancas o amarillas. Poseen flores y frutos, ovalados de color rojo, naranja o amarillo (Rivas, 1998). Además es una planta que no requiere tierras de gran calidad, pues puede crecer en terrenos poco fértiles y de escasa humedad, los cuidados que necesitan son mínimos, sin embargo, se ven afectadas por las bajas temperaturas. Es originaria de América, hay 258 especies reconocidas, 100 de las cuales están en México donde se estima que hay 10,000 hectáreas cultivadas con Tuna. También es muy cultivada en Italia, España y Sudáfrica, para consumo humano la producción mundial de Tuna se estima en 400.000 toneladas. En Colombia es una planta silvestre utilizada algunas veces para ornamentación.

Además, estudios fitoquímicos realizados a la Tuna (*Opuntia ficus-indica*) han indicado la presencia de proteínas, carbohidratos, azúcares reductores como glucosa y fructosa, y de metabolitos secundarios tales como saponinas, en forma de triterpenos y flavonoides, y la ausencia de taninos y alcaloides (Kiesling, 2001; Kiesling y Ferrari, 2005; Vásquez, 1994).

Muchas especies de cactus hacen parte de la larga lista de sustancias ensayadas para obtener coagulantes naturales alrededor del mundo. En México se extrajo el agente activo de varias especies nativas de cactus (*Opuntia imbricata* y *Opuntia lindheimeri*), los coagulantes naturales obtenidos fueron utilizados para el tratamiento de aguas sintéticas, aguas residuales domésticas y para la remoción de metales pesados. Los

resultados obtenidos permitieron concluir, que los cactus pueden utilizarse, como coagulantes por sí solo, o trabajar junto con el alumbre para aumentar su eficiencia (Vásquez, 1994; Zhang et al., 2006).

En años recientes científicos malayos revisaron las investigaciones más sobresalientes, realizadas acerca de los coagulantes naturales de origen vegetal, durante este trabajo se enfocaron en analizar las principales fuentes, procesos de obtención, eficacia y mecanismos de funcionamiento. En el artículo referencian a autores que atribuyen el poder coagulante del Nirmali (*Strychnos potatorum*) a un polielectrolito anionico, presente en sus semillas. Respecto a la *Moringa oleifera*, muchos expertos del tema, sugieren que una proteína de alto peso molecular es responsable de su capacidad coagulante. Por el lado del cactus, esta propiedad se le adjudica al ácido poligalacturónico. Al final, concluyeron que en su mayoría los coagulantes naturales funcionan mediante un mecanismo de adsorción seguido por la neutralización de carga (Chun-Yang, 2010).

A su vez, en Colombia se han realizado investigaciones sobre la utilización de coagulantes naturales, como el almidón de yuca y el almidón de maíz, los cuales han sido evaluados junto con el sulfato de aluminio B y un polielectrolito comercial, como agentes coagulantes de aguas crudas superficiales, utilizadas para el abastecimiento de una planta potabilizadora. Los resultados

obtenidos mostraron un buen desempeño del almidón de maíz, comparable con el polielectrolito y mejor que el sulfato de aluminio. Por el contrario el almidón de yuca presentó un mal desempeño en las condiciones trabajadas y fue el menos efectivo de los agentes coagulantes evaluados (Rodríguez et al., 2007).

De acuerdo con lo anterior, este trabajo tiene como objetivo caracterizar la Tuna (*Opuntia ficus-indica*) y extraer un coagulante de la misma, con el propósito de determinar características necesarias que lo hacen un potencial para remover turbidez en aguas. Se espera que la información recopilada sirva como base para investigaciones futuras, que permitan medir su efectividad y establecer si es viable utilizar este producto a escala industrial, en los procesos de potabilización.

## Materiales y métodos

### Caracterización de la Tuna

La penca de la Tuna fue lavada y posteriormente cortada en pequeñas tiras (tamaño promedio 10 cm). Las muestras obtenidas se sometieron a un análisis fitoquímico con el fin de determinar el contenido de humedad, cuantificar metabolitos secundarios tales como saponinas y flavonoides, y establecer la presencia de metales (hierro y calcio) en la planta. Las técnicas de análisis utilizadas se resumen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Técnicas de análisis para la caracterización del tallo de la Tuna.

Parámetros	Método	Equipo	Norma
pH	Potenciométrico	pH/ORP Meter HI 9126	-
Humedad (%)	Termogravimetría	Mufla Cole-Parmer	AOAC 978.18
Calcio (%)	Absorción Atómica	UNICAM 969 AA Spectrometer	AOAC 975.03
Hierro (ppm)	Absorción Atómica	UNICAM 969 AA Spectrometer	AOAC 975.03
Flavonoides (mg/g)	Extracción + espectrofotometría UV-visible a 510 nm.	Pharma Spec UV-1700 UV-visible Spectrophotometer SHIMADZU	Prueba de Shinoda*
Saponinas (mg/g)	Extracción + espectrofotometría UV-visible a 500 nm.	Pharma Spec UV-1700 UV-visible Spectrophotometer SHIMADZU	Prueba de Espuma

\* A 1 ml de extracto diluido se le agrega un trozo de viruta de magnesio amalgamado y 5 gotas de ácido clorhídrico concentrado. La aparición de colores (rojo a magenta) indica la presencia de una flavonona o dihidroflavonol.

### **Obtención del coagulante en polvo**

Para extraer el coagulante en polvo se aplicó un procedimiento similar al sugerido por Almendárez (2004). La metodología general involucra cinco etapas, las cuales consisten en reducción inicial de tamaño, secado, molienda y tamizado, extracción de clorofila, y eliminación de solvente.

La planta de Tuna fue obtenida en la zona urbana de la ciudad de Cartagena. Siete pencas, de 21 cm de largo, 12 cm de ancho y 1.2 cm de espesor en promedio, y con un peso total de 1201.5g fueron lavadas y peladas para retirar la capa exterior (cutícula). La pulpa libre de cáscara se cortó en pequeñas tiras, las cuales, de inmediato, fueron sometidas a un proceso de secado durante 48 horas continuas a una temperatura de  $60 \pm 1$  °C. A consecuencia de la deshidratación, las tiras sufrieron una disminución considerable de su tamaño, tornándose frágiles y quebradizas. Se utilizó un mortero manual para triturarlas con el objeto de reducir el tamaño de partícula del material; como producto se obtuvo un polvo de color amarillo.

El polvillo se tamizó durante 5 minutos mediante una serie de tamices Tyler normalizados con el fin de garantizar que las partículas utilizadas en la etapa posterior tuvieran un diámetro de partícula inferior a 0.5 mm para favorecer la extracción de pigmentos. De los "finos" obtenidos, 20.23g fueron sometidos a un proceso de extracción Soxhlet durante 2.5 horas. Etanol al 96% fue utilizado como solvente. Durante este procedimiento se observó que el solvente al entrar en contacto con el material cambió de incoloro a amarillo, y al final de la operación, se obtuvo una solución verde oscura que contenía el etanol y los pigmentos retirados de la Tuna. El polvo adquirió un color marfil, el cual se almacenó en un desecador a temperatura ambiente (alrededor de 30°C) hasta ser utilizado en pruebas posteriores.

### **Caracterización del coagulante**

Después de obtenerse el coagulante en polvo, este fue analizado con el fin de determinar las propiedades del material que tienen relación directa con su capacidad para remover turbidez y color del agua. Se estableció su estado físico y color por observación. Con el objetivo de determinar el grado de acidez del coagulante, se preparó una solución al 1% másica en agua destilada, y se halló el pH de la solución utilizando un pHmetro digital (Multiparámetro 900 Bante Instrument). El contenido de Nitrógeno X 6,35 fue estimado a través del método de Kjeldahl (Norma AOAC 984.13). El conte-

nido de carbohidratos fue hallado mediante termogravimetría.

### **Evaluación del poder coagulante**

Para evaluar el poder coagulante del material, se aplicó una prueba de jarras, de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma ASTM D2035 - 08 (Almendárez, 2004; Zhang *et al.*, 2006). La muestra de agua cruda natural fue obtenida del Canal del Dique, a la altura de Puerto Badel corregimiento de Arjona - Bolívar.

Para una velocidad de agitación constante de 30 rpm, se analizó el efecto de tres dosis del coagulante obtenido, de 50, 75 y 90 mg/L, sobre el color, la turbidez residual y el pH del agua. Los porcentajes de reducción de color y remoción de turbidez fueron calculados con base en las propiedades iniciales del agua cruda. Cada prueba experimental se realizó por duplicado.

Para medir el color a cada una de las muestras de agua, antes y después de someterse a la prueba de jarras, se utilizó un colorímetro digital Lovibond PFX 195. Así mismo, para medir la turbidez de las muestras se usó un turbidímetro portátil marca Thomson. Además, el potencial de hidrógeno fue medido con el fin de identificar si el coagulante modificaba el pH del agua a tratar.

## **Resultados y discusión**

### **Caracterización de la Tuna (*Opuntia ficus-indica*)**

El valor determinado para los parámetros que fueron analizados en este estudio se presenta en la tabla 2. Así mismo, se indica el valor reportado por otros autores.

El valor hallado para el pH indicó que el material es medianamente ácido, lo cual está de acuerdo con lo publicado por Rodríguez-García *et al.*, (2007). Así mismo los resultados indicaron que el tallo de la planta presenta un alto contenido de humedad ya que perdió el 90,23% de su peso durante la prueba de termogravimetría. El valor es consistente con la información reportada por Almendárez (2004) y Vásquez (1994) para la Tuna (*Opuntia ficus-indica*). También se observó la presencia de saponinas, flavonoides y hierro, acorde con las cantidades halladas por otros autores (Vásquez, 1994; Rodríguez-García *et al.*, 2007).

Por otro lado, el contenido de calcio determinado para esta especie fue bajo en comparación al reportado por otros autores; se considera que este valor puede ser diferente debido a que, como lo indica Rodríguez-García *et al.* (2007), el contenido de este mineral varía

**Tabla 2.** Análisis fitoquímico de la Tuna (*Opuntia ficus-indica*).

Parámetro	Valor	Valor Otros estudios	Referencia
pH	4,42	4,25	(Rodríguez-García et al., 2007)
Humedad (%)	90,23	90,83	(Almendárez, 2004)
		94	(Vásquez, 1994)
Calcio (%)	0,27	1,35	(Rodríguez-García et al., 2007)
		2,71	(Vásquez, 1994)
Hierro (ppm)	32,55	12,35	(Rodríguez-García et al., 2007)
		42,67	(Vásquez, 1994)
Flavonoides (mg/g)	10,16	5,23	
Saponinas (mg/g)	0,70	0,56	

con el grado de madurez de la planta, lo cual fue una variable que no se tuvo en cuenta para el análisis fitoquímico desarrollado en el presente estudio.

Finalmente, los resultados permitieron establecer que la planta que crece de manera silvestre en el departamento de Bolívar posee características similares a las de la Tuna originaria de países de Norte-América. Así mismo, debido a las pequeñas proporciones de saponinas, flavonoides, sales minerales de calcio y hierro presentes en la planta, se dedujo que estos metabolitos y sales no son los responsables del poder coagulante de la planta.

#### **Obtención del coagulante en polvo**

El balance de masa del proceso global y de cada una de las operaciones desarrolladas para obtener el coagulante en polvo se presenta en la tabla 3.

Los resultados indican que el rendimiento global del proceso a escala de laboratorio es bajo. Por cada kilogramo de penca de Tuna tratado se obtienen 65g de coagulante pigmentado. Lo anterior se debe al alto contenido de humedad y de cutícula, los cuales corresponden al 91,7% de la planta. No obstante, es importante tener en cuenta para un posterior diseño y evaluación económica del proceso a escala industrial, que los coagulantes se consumen en pequeñas dosis, del orden entre 50 y 100 mg por litro de agua cruda.

#### **Caracterización del coagulante en polvo**

El análisis del coagulante se llevó a cabo en el laboratorio de Energías Limpias y Medio Ambiente de la Universidad de Cartagena sede Piedra de Bolívar, y en el Laboratorio de Servicios Ambientales de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas de la Universidad de Cartagena. Para realizar estas pruebas se requirieron 15.14g

**Tabla 3.** Balance de masa por operación.

Operación	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida (g)	Pérdida de la operación (%)	Pérdida global (%)
Remoción de la cutícula	1201.5	989.9	211.6	17.61	17.61
Corte	989.9	969.5	20.4	2.06	1.69
Secado	969.5	79.0	890.5	91.85	74.11
Triturado	79.0	78.5	0.5	0.63	0.04
Tamizado	78.5	78.2	0.3	0.38	0.02
Total	-	-	1123.3	-	93.49

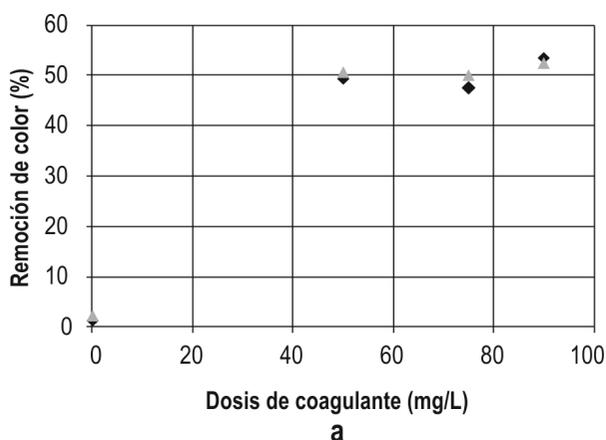
de coagulante en polvo libre de pigmentos. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 4.

**Tabla 4.** Propiedades del polvo extraído de la Tuna.

Parámetro	Valor/Cualificación
pH	6.19
Estado físico	Sólido
Color	Blanco marfil
Nitrógeno X 6,35 (%)	7.39
Carbohidratos (%)	58.77
Densidad a granel (g/ml)	0.626

Según los datos obtenidos, el coagulante en polvo extraído de la tuna tiene un grado de acidez bajo; lo cual, sumado a su estado sólido, indica que, antes de ser suministrado al agua cruda, debe realizarse una dispersión del mismo para evitar la formación de geles poco solubles en agua.

Por otro lado, el bajo contenido de proteínas sugiere que estas especies bioquímicas no son las principales responsables del poder coagulante del material; mientras que el alto contenido de carbohidratos señala que estos compuestos deben favorecer la coagulación. Lo anterior se respalda en lo señalado por Chun-Yang (2010), Almendárez (2004) y Arboleda Valencia (1992), quienes le atribuyen el poder coagulante a los compuestos alginicos derivados del almidón presente en la planta.



### Evaluación del poder coagulante

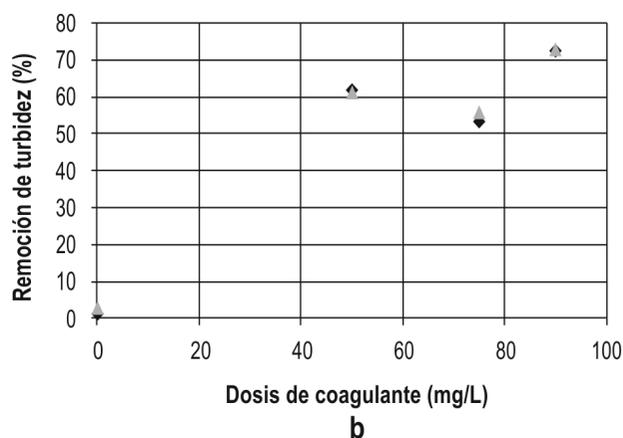
En la tabla 5 se reportan los valores de color, turbidez y pH que se determinaron para el agua cruda sin tratar.

**Tabla 5.** Condiciones iniciales del agua cruda.

Parámetro	Valor
Color (UPC)	167.99
Turbidez (NTU)	170.96
pH	7.8

Después de que el agua fue tratada con el coagulante, se observó que las muestras presentaron medidas del color residual entre 78 y 88 Unidades de Platino Cobalto (UPC), y de turbidez entre 46 y 80 Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU). La figura 1 muestra los porcentajes de remoción de color y de turbidez obtenidos con diferentes dosis del coagulante. Se observó que la remoción de color y de turbidez tiende a aumentar a medida que se incrementa la dosis de coagulante para las condiciones estudiadas. Se obtuvo un máximo de remoción de color del orden del 54%, y una remoción de turbidez de 72% cuando se aplicó coagulante en una dosis de 90 mg/L a agua cruda con una turbidez inicial de 171 NTU.

De acuerdo con lo anterior, la actividad del coagulante obtenido de la Tuna cruda se consideró comparable a la de otros materiales similares; tal como el proveniente del *Cactus lefaria* crudo, para el cual se reporta una remoción de turbidez entre 80 y 90%, cuando fue aplicado como agente coagulante en una dosis óptima



**Figura 1.** a. Porcentaje de remoción de color en función de la dosis de coagulante. b. Porcentaje de remoción de turbidez en función de la dosis de coagulante. ▲ - Ensayo 1; ◆ - Ensayo 2.

de 10 mg/L para un proceso de clarificación de aguas crudas con turbidez inicial de 30 NTU (Martínez *et al.*, 2003).

Por otro lado, los valores residuales de color y turbidez obtenidos no cumplen con las características mínimas exigidas en el Decreto 1575 del 2007 para el agua potable (<15 UPC y < 5 NTU); no obstante, es importante tener en cuenta que el proceso de clarificación es una de las primeras etapas implementadas durante el tratamiento del agua cruda, y el valor deseado para los parámetros en mención se puede alcanzar en etapas posteriores con un proceso de filtración ascendente

para agua clarificada con una turbidez menor a 50 NTU.

La figura 2 presenta los valores medidos para el pH del agua cuando fue tratada con dosis de coagulante de 50, 75 y 90 mg/L. Los resultados indicaron que el pH del agua para las diferentes dosis se mantuvo alcalino, con valores entre 7.5 y 7.9; lo cual indica que el material adicionado no altera en gran medida el pH del agua tratada. No obstante, en general, se observó una leve tendencia a disminuir el pH de la muestra, lo cual se atribuye a que en el proceso de coagulación se precipitan las arcillas disueltas que le dan carácter alcalino al agua cruda (Deloya, 2006).

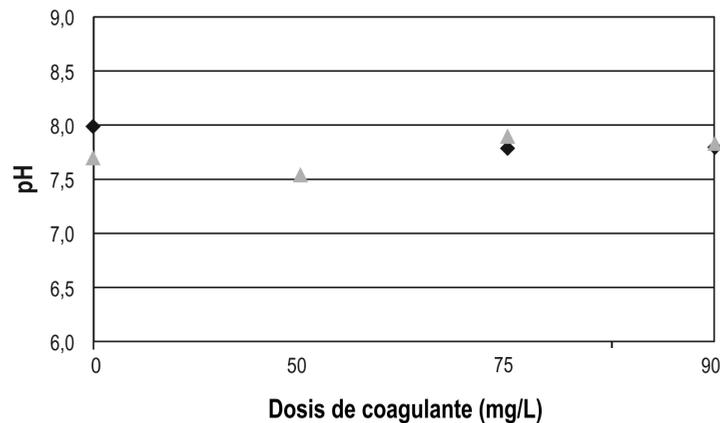


Figura 2. Efecto de la dosis de coagulante sobre el pH del agua tratada.

## Conclusiones

Los resultados permitieron concluir que la Tuna que crece de manera silvestre en el departamento de Bolívar posee características similares a las de aquella originaria de países centroamericanos. Se determinó que esta tiene un pH medianamente ácido, y que contiene un alto porcentaje de humedad, y pequeñas proporciones de saponinas, de flavonoides, y de sales minerales de calcio y hierro. La obtención del coagulante en polvo a partir de la Tuna se logró a través de operaciones unitarias de poca complejidad. El rendimiento global del proceso fue bajo, del orden de 65 g de coagulante/Kg de penca de Tuna, como consecuencia de la alta cantidad de agua y cutícula presente en la planta. Pese al bajo rendimiento, la cantidad de coagulante obtenido por cada kilo de material vegetal es suficiente para tratar 650 litros de agua cruda.

Por otro lado, se determinó que el material extraído de *Opuntia ficus indica* presenta una alta actividad como coagulante debido a su capacidad para remover 50% del color y 70% de turbidez de aguas crudas con

alta turbidez inicial. También se logró establecer que el material no altera significativamente el pH del agua tratada. Todo lo anterior evidenció su potencial aplicación como alternativa a los coagulantes sintéticos. No obstante, se expone la necesidad de evaluar la dosis óptima de coagulante, y el efecto de otras variables, tales como la velocidad de agitación, en el desempeño del material en procesos de clarificación, con el fin de diseñar procesos sustentables.

Así mismo, el estudio evidenció la necesidad de caracterizar más propiedades de interés del coagulante, tales como el potencial Z con el fin de identificar su carácter iónico. Además, es importante determinar el contenido de ácido poligalacturónico y compuestos algínicos presentes en la Tuna, para establecer el rendimiento de obtención del compuesto activo.

## Referencias bibliográficas

Almendárez, 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.

- Antov, M; Šciban, M; Petrovic, N. 2010. Proteins from common bean (*Phaseolus vulgaris*) seed as a natural coagulant for potential application in water turbidity removal. *Bioresource Technology*. 101: 2167–2172.
- Arboleda-Valencia, J. 1992. Teoría y práctica de la purificación del agua. Bogotá, Colombia, Editorial Acodal. p 1 – 19.
- Beltrán-Heredia, J; Sánchez-Martín, J; Gómez-Muñoz M. C. 2010. New coagulant agents from tannin extracts: Preliminary optimization studies. *Chemical Engineering Journal*. 162: 1019–1025.
- Chun-Yang Y. 2010. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*. 45: 1437 – 1444.
- Deloya, A. 2006. Métodos de análisis físicos y espectrofométricos para el análisis de aguas residuales. *Tecnología en Marcha*. 19: 2-33.
- Díaz, A; Rincón, N; Escorihuela, A; Fernández, N; Chacín, E; Forster, C. F. 1999. A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela. *Process Biochemistry*. 35: 391–395.
- Kiesling, R. 2001. Origen - Domesticación y Distribución de *Opuntia ficus-indica*. Instituto de Botánica Darwinion. p. 1 – 3.
- Kiesling, R; Ferrari, O. 2005. 100 cactus argentinos. Buenos Aires, Argentina: Editorial Albatros, p 27.
- Martínez, D; Chávez, M; Díaz, A; Chacín, E; Fernández, N. 2003. Eficiencia del *Cactus Lefaria* para su uso como coagulante en la clarificación en aguas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería*. Universidad de Zulia. 26(1): 27-33.
- Patel, H; Vashi, R. T. 2012. Removal of Congo Red dye from its aqueous solution using natural coagulants. *Journal of Saudi Chemical Society*. 16: 131 - 136.
- Rivas, M. 1998. Cactáceas de Costa Rica. San José, Costa Rica: EUNED. p 33.
- Rodríguez J., Lugo I., Rojas A., Malaver C. 2007. Evaluación del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora. *Umbral Científico*. 11: 8 – 16.
- Rodríguez-García M., De Lira C., Hernández-Becerra E., Cornejo-Villagas M., Palacios-Fonseca A., Rojas-Molina I. 2007. Physicochemical Characterization of Nopal Pads (*Opuntia ficus indica*) and Dry Vacuum Nopal Powders as a Function of the Maturation. *Plant Foods Hum Nutrition*. 62: 107–112.
- Šciban, M; Klačnja, M; Antov, M; Škrbic, B. 2009. Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. *Bioresource Technology*. 100: 6639 – 6643.
- Singley, J. 1986. Revisión de la teoría de coagulación del agua. Gainesville, Estados Unidos: Universidad de la Florida. p. 9-26.
- Vásquez, O. 1994. Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales [tesis]. Monterrey, México: Universidad Autónoma de Nuevo León. pp. 28-57.
- Warner, E. 1972. Impacto Económico de los Nuevos Procesos de Tratamiento de Agua. Asunción, Paraguay: Memorias Simposio Nuevos Métodos de Tratamiento de Agua. 527 – 536.
- Zhang, J; Zhang, F; Luo, Y; Yang, H. 2006. A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment. *Process Biochemistry*. 41: 730 – 733.